



**HAL**  
open science

# Techniques de communication numériques au service des systèmes de transports intelligents

Yassin El Hillali

► **To cite this version:**

Yassin El Hillali. Techniques de communication numériques au service des systèmes de transports intelligents. Electronique. Université Polytechnique Hauts-de-France, 2018. tel-03997424

**HAL Id: tel-03997424**

**<https://uphf.hal.science/tel-03997424>**

Submitted on 20 Feb 2023

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

**N° d'ordre : 18/05**

**HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES**  
présentée à  
l'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE HAUTS-DE-FRANCE

par  
**Yassin ELHILLALI**

**Laboratoire d'accueil :** Institut d'Électronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, Département Opto-Acousto-Électronique (IEMN/DOAE) – UMR CNRS 8520

---

Techniques de communications numériques au service des systèmes de transports intelligents

---

Soutenue le 11/12/2018, devant le jury composé de :

Rapporteur (Président) **Mme GENEVIÈVE BAUDOUIN**, Professeur, L'ESIEE, Paris,  
Rapporteur **Mr THIERRY CHONAVEL**, Professeur, IMT Atlantique, Brest  
Rapporteur **Mme MARIA-GABRIELLA DI BENEDETTO**, Professeur,  
Université La Sapienza, Rome  
Examineur **Mr CHARLES TATKEU**, Directeur de Recherche, IFSTTAR  
Examineur **Mr LAURENT VERMEIREN**, Professeur LAMIH, UPHF  
Examineur **Mme ATIKA RIVENQ MENHAJ**, Professeur IEMN-DOAE, UPHF  
Invité **Mr JEAN-MICHEL ROUVAEN**, Professeur IEMN-DOAE, UPHF

# Dédicace

A mes chers parents,

A mon épouse et à mes enfants.

Mes frères, ma sœur

Ma famille

Et mes amis

Je dédie ce travail,

Yassin.

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Jean-Michel Rouvaen de m'avoir accueilli dans son équipe et d'avoir accepté de diriger mes travaux de thèse de Doctorat. Sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements, sa sympathie et ses qualités humaines et de chercheur ont été et seront des éléments déterminants dans la réalisation de mes travaux passés, présents et futurs. Sa rigueur ainsi que son esprit critique m'ont toujours permis d'avancer dans les bonnes directions afin de mener à bien mes travaux de recherche. Je voudrais particulièrement remercier le professeur Jamal Assad pour ses enseignements et ses conseils. Il m'a toujours encouragé à avancer et facilité toutes mes démarches.

Je voudrais aussi particulièrement adresser mes vifs remerciements à Mme. le Professeur Atika RIVENQ. Je suis très sensible à sa grandeur d'âme et à ses qualités humaines. Sa disponibilité, sa motivation, ses conseils ont été pour moi d'une grande richesse tout au long de mes travaux. La confiance qu'elle m'a accordée tout au long de ces années de recherche et la part très active qu'elle a pris dans mon encadrement, pendant et après ma thèse de Doctorat, s'est avérée essentielle après le départ en retraite de M. Rouvaen.

Je remercie M ou Mme prénoms, noms, organismes, de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et d'en être les rapporteurs. Je remercie également M ou Mme prénoms, noms, organismes, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je suis très honoré qu'ils aient accepté de faire partie de mon jury de HDR.

Je tiens particulièrement et très sincèrement à remercier les chercheurs du LEOST de l'IFFSTAR de Villeneuve d'Ascq, Mesdames Fouzia Boukour et Messieurs Charles Tatkeu, Jean-Pierre Ghys, Marc Heddebaut, d'avoir mis à ma disposition du matériel lors

de mes différentes phases expérimentales et d'avoir, au fil des années, poursuivi une collaboration amicale et fructueuse avec le DOAE, ponctuée par plusieurs opérations de recherche et beaucoup de publications et communications scientifiques communes, ainsi que des thèses co-encadrées.

Je veux aussi signaler combien j'ai apprécié la collaboration étroite que nous avons menée avec l'équipe de chercheurs du Département d'Informatique du LAMIH de Valenciennes dirigée par M. le Professeur Smail Niar. Outre des liens d'amitié, cette collaboration a débouché sur des encadrements communs de thèses et un nombre non négligeable de publications (articles et conférences).

J'exprime aussi ma gratitude à tous mes collègues du laboratoire IEMN-DOAE ainsi que tous ceux, dont le nom n'apparaît pas ici, qui, de diverses manières, m'ont accueilli, apporté leur amitié, leur contribution scientifique, leurs conseils et leurs encouragements. Que les doctorants que j'ai encadrés reçoivent ici l'expression de ma gratitude pour avoir supporté mon autorité bienveillante et je leur adresse mes vœux de réussite dans leur carrière future.

Je remercie évidemment toute ma famille pour son irremplaçable et inconditionnel soutien, même à distance pour certains. Ils ont été là pour écarter les doutes, soigner les blessures et partager les joies. Ce travail est un peu le leur. J'adresse mes pensées particulièrement à vous, mes chers parents, mes chers frères et soeur, mon épouse, mes enfants, pour votre confiance, votre soutien, votre affection et la patience dont vous avez dû parfois faire preuve au cours de ces dernières années.

Enfin, ma reconnaissance va à tous mes amis qui m'ont manifesté leur soutien affectif tout au long de ce travail et ont rendu ces années les plus agréables possibles.

# Résumé et mots-clés

## • Résumé

Ce mémoire présente les diverses tâches d'enseignement, travaux de recherche et activités administratives que j'ai accomplies depuis la soutenance de ma thèse de Doctorat et ma nomination en tant que Maître de Conférences.

Mes activités d'enseignement devant des groupes d'étudiants (cours, travaux dirigés et pratiques) et d'encadrements de stages sont d'abord décrites. Les responsabilités que j'ai exercées dans ce cadre sont citées, ainsi que mes collaborations au niveau national et international.

Après avoir exposé rapidement mon cadre général de travail et la méthodologie des études menées, une synthèse de mes activités de recherche est ensuite fournie (publications, communications, livre, brevet, encadrement doctoral, participation à des contrats et projets). Mes responsabilités et collaborations liées à la recherche sont alors exposées, au niveau local et régional, puis national et enfin international, ainsi que mes activités de valorisation. Une liste de mes publications et communications est enfin donnée.

L'aspect recherche est encore complété par une présentation détaillée des travaux de recherche que j'ai encadrés, occasion de présenter et d'illustrer, à la fois, les thématiques choisies et les buts poursuivis. Ainsi cette partie expose les techniques d'émission et de réception électromagnétiques ou encore de localisation et de détection d'obstacles employées. La démarche suivie, de la théorie, à la conception et à la simulation de systèmes et leur synthèse à l'aide de circuits programmables, avec pour objectif final l'élaboration de prototypes ou de démonstrateurs.

Enfin, un certain nombre de développements prospectifs sont présentés, tant en matière d'enseignement que pour mes futurs travaux de recherche.

**• Mots-clefs**

Enseignement : Cyber-défense et sécurité de l'information, Modélisation et prototypage de circuits, Systèmes de transport intelligents, Traitement du signal avancé, FPGA. Recherche : Communication et localisation dans les transports, Systèmes radiofréquences, Communications ultra-large-bande (ULB), Communications intervéhiculaires V2V et entre véhicules et infrastructure V2I, Réseaux de capteurs, unités de traitement temps réels, FPGA.

**• Abstract**

This dissertation develops the various teaching tasks, research works and administrative activities that I carried since the defense of my doctoral thesis and my appointment as associate professor.

I will start by describing the classes I taught (courses, seminars, practical works) and training courses I supervised. The responsibilities I was in charge of, on these occasions, are quoted, together with my national and international collaborations.

After giving a short presentation of the general scope and methodology of the conducted studies, a summary of my research activities is then supplied (articles, communications, book, patent, doctoral thesis management, contribution to research projects and contracts). My research responsibilities and collaborations are then emphasized at the local, regional, national and international levels, together with my development activities. A detailed list of my published works is finally given.

The research point of view is moreover completed using a detailed presentation of the research works and theses I contributed to manage. This furnishes an opportunity to present and illustrate at once the chosen thematics, the pursued goals, the used electromagnetic emission and reception or localisation and obstacle detection techniques. This part presents also the followed approach, from theory to the conception and simulation of systems, their synthesis into programmable circuits and, finally, prototype or demonstrator construction.

In the end, some prospective developments are given, opening new ways for my future teaching courses and research works.

• **Keywords**

Teaching : Cyber-defence and security of information, System modeling and prototyping, Intelligent transport systems, Advanced signal processing.

Research : Communication and localisation in transport systems, Radiofrequency systems, Ultra-wideband communications (UWB), Intervehicular (V2V) and vehicle to infrastructure (V2I) communications, wireless Sensor networks, Real Time signal processing units.





# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Résumé et mots-clés</b>	<b>iii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>vii</b>
<b>Table des figures</b>	<b>xv</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 Avant-propos . . . . .	1
1.2 Curriculum vitæ . . . . .	3
1.2.1 Etat civil . . . . .	3
1.2.2 Fonctions actuelles . . . . .	3
1.2.3 Diplômes et titres universitaires . . . . .	4
1.2.4 Parcours professionnel . . . . .	4
1.3 Plan du document . . . . .	4
<b>2 Activités d'enseignement</b>	<b>7</b>
2.1 Introduction . . . . .	7
2.2 Enseignements devant des groupes d'étudiants . . . . .	8
2.2.1 Historique . . . . .	8
2.2.2 Enseignements de l'année 2017-2018 . . . . .	8
2.2.3 Encadrement de stages . . . . .	10
2.2.4 Encadrement de Projets . . . . .	11

2.2.5	Collaborations internationales . . . . .	15
2.3	Responsabilités liées à l'enseignement . . . . .	16
2.4	Vulgarisation . . . . .	17
2.5	Perspectives . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Activités de recherche</b>	<b>19</b>
3.1	Plan du chapitre . . . . .	20
3.2	Contexte et motivation . . . . .	21
3.3	Synthèse des résultats de recherche . . . . .	22
3.3.1	Publications et communications . . . . .	22
3.3.2	Encadrement doctoral . . . . .	22
3.3.3	Participation à des contrats et projets de recherche . . . . .	22
3.3.3.1	Contrat RAVIOLI : Projet RAdar et VIsion Orientable, LIdar . . . . .	22
3.3.3.2	Contrat RAVIOLI 2 : suite de RAVIOLI dans le cadre de TAT . . . . .	24
3.3.3.3	Contrat CARVAT : Couplage Automatique des rames par Radar et Vision Artificielle pour Transports guidés .	24
3.3.3.4	Contrat MODEASY : MOdel Driven dEsign for Auto- motive Safety embedded sYstem . . . . .	25
3.3.3.5	Contrat PRIMA-CARE : Prévention de la collision Rou- tière par association Intelligente Multi-capteurs radar, aveC gestion dynamique d'Alertes sonores, fonction du Risque Encouru . . . . .	25
3.3.3.6	Projet LET'S GO : modeLisation vERificaTion, and SI- mulation in Guided transportation cOmmunications . .	25
3.3.3.7	Contrat ANR Cyclope (en cours) . . . . .	26
3.3.3.8	Projet INTERCOR (en cours) . . . . .	27
3.3.3.9	Projet PHC MAGHREB TRANSVERSAL 2019 intitulé UID - RATSr : RFE . . . . .	29
3.3.3.10	Projet ELSAT . . . . .	30
3.3.4	Responsabilités et collaborations liées à la recherche . . . . .	32
3.3.4.1	Au niveau local et régional . . . . .	32
3.3.4.2	Au niveau national . . . . .	34

3.3.4.3	Au niveau international . . . . .	35
3.3.4.4	Valorisation . . . . .	37
3.4	Plateformes . . . . .	37
3.5	Publications et production scientifique . . . . .	41
3.5.1	Articles dans une revue internationale avec comité de lecture . . . . .	41
3.5.2	Conférences internationales avec comité de lecture et actes . . . . .	43
3.5.3	Article dans une revue nationale avec comité de lecture . . . . .	51
3.5.4	Communications Nationales avec actes . . . . .	51
3.5.5	Chapitre de livre . . . . .	52
3.5.6	Brevet . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Présentation détaillée des travaux de recherche encadrés</b>	<b>53</b>
4.1	Présentation du contexte . . . . .	54
4.1.1	Systèmes de communication dans les transports . . . . .	55
4.1.2	Systèmes de localisation et de détection d'obstacles . . . . .	56
4.1.3	Intégration des systèmes au moyen de circuits logiques programmables . . . . .	57
4.1.4	Réseaux de capteurs . . . . .	57
4.1.5	Présentation de la suite du chapitre . . . . .	58
4.2	Thèses soutenues . . . . .	58
4.2.1	Thèse de SAKKILA Laila . . . . .	58
4.2.2	Thèse de ELABED Amel . . . . .	60
4.2.3	Thèse de KOSSONOU Ignace . . . . .	61
4.2.4	Thèse de TAHRI Tarik . . . . .	63
4.2.5	Thèse de TOUATI Nadjah . . . . .	64
4.2.6	Thèse de HAMIDOUN Khadijah . . . . .	66
4.2.7	Thèse de ELABBOUBI Adil . . . . .	68
4.2.8	Thèse de SASSI Aymen . . . . .	70
4.2.9	Thèse de ALOUANI Ihsen . . . . .	71
4.2.10	Thèse de MAATOUGI Lamyae . . . . .	73
4.2.11	Projet de Thèse de SALEM Fatma . . . . .	74
4.2.12	Thèse de PERTUISOT Geoffroy . . . . .	75
4.3	Thèses en cours . . . . .	76
4.3.1	Projet de Thèse de SAHRAOUI Selima . . . . .	76

---

4.3.2	Projet de Thèse de SADLI Rahmad . . . . .	76
4.3.3	Projet de Thèse de RIBOUH Soheyb . . . . .	78
4.3.4	Projet de Thèse de DIDOUH Ahmed . . . . .	79
4.3.5	Projet de Thèse de KIASI Mouad . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>83</b>
5.1	Conclusion générale . . . . .	83
5.2	Perspectives . . . . .	84
5.2.1	Continuation et développement des axes actuels . . . . .	84
5.2.2	Projets concernant les transports intelligents . . . . .	85
5.2.3	Initiative IEMN concernant le projet phare de "Télécoms UHD" . . . . .	86
5.2.4	Action "Miroir intelligent" - TIGA . . . . .	88

<b>ANNEXES</b>	<b>88</b>
<b>A Notions sur la technologie ULB</b>	<b>89</b>
A.1 Contenu . . . . .	89
A.2 La technique ULB . . . . .	89
A.2.1 Introduction . . . . .	89
A.2.2 Principe de la technologie ULB . . . . .	90
A.2.3 Normalisation en ULB . . . . .	91
A.2.3.1 Normalisation aux Etats-Unis . . . . .	92
A.2.3.2 Normalisation en Europe . . . . .	92
A.2.4 Les techniques de transmission pour l'UWB . . . . .	94
A.2.5 Principaux avantages de l'IR-ULB . . . . .	96
A.3 Les formes d'ondes ultra large bande . . . . .	97
A.3.1 L'impulsion gaussienne et ses dérivées . . . . .	98
A.3.2 Les polynômes orthogonaux - Fonctions de Gegenbauer Modifiées (MGF) . . . . .	100
A.4 Les techniques de modulation ULB-IR . . . . .	102
A.4.1 Modulations associées à l'ULB-IR . . . . .	102
A.4.1.1 La modulation de position (PPM) . . . . .	102
A.4.1.2 La modulation antipodale (BPSK) . . . . .	102
A.4.1.3 La modulation d'amplitude (PAM) . . . . .	104
A.4.2 Les nouvelles modulations M-OAM . . . . .	104
A.4.2.1 La modulation 4-OAM . . . . .	105
A.4.2.2 La modulation 16-OAM . . . . .	106
A.4.2.3 La modulation 64-OAM . . . . .	107
A.4.3 Les techniques de multiplexage proposées . . . . .	109
A.4.3.1 La technique de simple étalement ULB . . . . .	110
A.4.3.2 La technique d'étalement séquentiel de spectre à deux codes ULB (ESS2-ULB) . . . . .	112
A.4.3.3 La technique CPM-ULB (Code Position Modulation) . . . . .	112
A.4.3.4 La technique $2\pi M$ -ULB . . . . .	114
A.4.3.5 La technique $2\pi$ CPM . . . . .	114
A.4.3.6 Les techniques de multiplexage "haut débit" . . . . .	115

A.5	Réalisations expérimentales . . . . .	120
A.5.1	Le dispositif expérimental . . . . .	120
A.5.1.1	Le générateur . . . . .	121
A.5.1.2	Les antennes . . . . .	121
A.5.1.3	L'amplificateur . . . . .	123
A.5.1.4	L'oscilloscope . . . . .	123
A.5.2	Résultats expérimentaux . . . . .	124
A.5.2.1	Le système M-AOM . . . . .	124
A.5.2.2	Mesures et expérimentations des nouvelles techniques de multiplexage . . . . .	127
A.6	Nouveau système multi-utilisateur ULB basé sur les modulations M-OAM	135
A.6.1	Principe du nouveau système ultra large bande multi-utilisateurs DS-MGF-ULB . . . . .	136
A.6.2	Évaluation des performances du système M-OAM sous l'effet des canaux IEEE et les nouvelles solutions de récepteurs . . . . .	137
A.6.3	Canaux de propagation ULB . . . . .	138
A.6.4	Évaluation des performances du système M-OAM sous l'effet des canaux IEEE . . . . .	139
A.6.4.1	L'effet des canaux IEEE 803.15.3a . . . . .	139
A.6.4.2	L'effet des canaux IEEE 803.15.4a . . . . .	140
A.6.5	Amélioration des performances du système M-OAM . . . . .	141
A.6.5.1	Les performances du système M-OAM dans le cas du récepteur RAKE . . . . .	141
A.6.5.2	Les performances du système M-OAM dans le cas de l'égalisation MMSE . . . . .	143
A.6.5.3	Évaluation des performances du système DS-MGF-OAM sous l'effet des canaux IEEE et de l'égalisation MMSE . . . . .	145
A.7	Conclusion . . . . .	147
<b>B</b>	<b>Généralités sur les systèmes de localisation et de détection d'obstacles</b>	<b>149</b>
B.1	Notions fondamentales sur les systèmes de localisation . . . . .	151
B.1.1	Le repère . . . . .	152
B.1.2	Le support de transmission . . . . .	152
B.1.3	Les éléments du processus de localisation . . . . .	153

---

B.1.4	Les observables ou paramètres de position . . . . .	155
B.1.5	Méthodes de base de positionnement . . . . .	155
B.1.6	Infrastructure et protocoles de positionnement . . . . .	155
B.2	Les différents critères d'évaluation des performances de localisation . . .	157
B.3	Les sources d'erreur du système de localisation . . . . .	158
B.4	Les métriques et méthodes de localisation . . . . .	160
B.4.1	La métrique de l'angle d'arrivée . . . . .	161
B.4.2	La métrique de la puissance du signal reçu . . . . .	161
B.4.3	La métrique du temps d'arrivée . . . . .	163
B.4.4	La métrique de la différence de temps d'arrivée . . . . .	164
B.4.5	Les métriques hybrides . . . . .	168
B.5	Les méthodes de localisation . . . . .	171
B.6	Système de positionnement en milieu confiné utilisant les techniques ULB	176
B.6.1	Introduction . . . . .	176
B.6.2	Le bloc émetteur . . . . .	177
B.6.2.1	Paramètres du signal de positionnement . . . . .	177
B.6.2.2	Techniques de codage pour l'accès multiple . . . . .	179
B.6.3	Méthode de localisation . . . . .	181
B.6.3.1	Détection du premier trajet . . . . .	182
B.6.3.2	Algorithme de localisation . . . . .	183
B.6.3.3	Algorithme 3-D . . . . .	185
<b>C</b>	<b>Intégration des systèmes au moyen de circuits logiques programmables</b>	<b>189</b>
C.1	Introduction . . . . .	190
C.2	Présentation des composants électriques : FPGA, CAN, CNA . . . . .	191
C.2.1	FPGA . . . . .	193
C.2.1.1	Présentation du composant FPGA . . . . .	193
C.2.1.2	La carte de traitement . . . . .	194
C.2.1.3	Description du convertisseur Numérique/Analogique CNA . . . . .	197
C.2.1.4	Description du convertisseur Analogique/Numérique CAN . . . . .	198



---

C.3	Synthèse d'un système ULB . . . . .	200
C.3.1	Architecture globale du système . . . . .	200
C.3.2	Synthèse du corrélateur . . . . .	205
C.3.2.1	Problème de la limite d'échantillonnage . . . . .	205
C.3.3	Architecture parallèle . . . . .	206
	<b>Bibliographie</b>	<b>211</b>

# Table des figures

2.1	photo d'un des drones construit par les étudiants . . . . .	13
2.2	L'objectif de la plateforme Tidicart . . . . .	14
2.3	photo de l'imprimante 3D construite par les étudiants . . . . .	15
3.1	Interaction entre les cyclistes et le bus, les angles morts du bus. . . . .	27
3.2	les partenaires du projet, et le tracé du corridor prévu. . . . .	28
3.3	Quelques équipements de la plateforme UWB . . . . .	38
3.4	photo de la plateforme Syfra . . . . .	39
3.5	a :RSU; b :OBU; c :l'interface de gestion de la plateforme ITS-COM . . .	40
3.6	Plan de déploiement des RSU sur le campus et sur la voie publique. . .	40
A.1	Régulation initiale de la FCC. . . . .	92
A.2	Régulation de la FCC en 2002. . . . .	93
A.3	La première régulation de l'ETSI. . . . .	93
A.4	Progression des réglementations ULB en Europe établies par l'ETSI, seconde proposition de 2005. . . . .	94
A.5	Progression des réglementations ULB en Europe établies par l'ETSI, proposition de 2007. . . . .	95
A.6	La représentation temporelle des impulsions gaussienne, monocycle, et doublet. . . . .	99
A.7	La représentation fréquentielle des impulsions gaussienne, monocycle, et doublet. . . . .	99
A.8	La représentation temporelle des quatre premières impulsions modifiées de Gegenbauer. . . . .	101
A.9	La modulation PPM. . . . .	103

A.10 La modulation BPSK. . . . .	103
A.11 L'algorithme de décodage des signaux modulés en 4-OAM. . . . .	106
A.12 L'algorithme de décodage des signaux modulés en 16-OAM. . . . .	107
A.13 Performances des modulations M-OAM en terme de BER. . . . .	109
A.14 Architecture interne du système proposé. . . . .	110
A.15 Signal envoyé avec la technique simple étalement. . . . .	110
A.16 Algorithme de la chaîne de transmission avec la technique simple étalement. . . . .	111
A.17 Signal envoyé avec la technique ESS2. . . . .	112
A.18 Algorithme d'émission et de réception de la technique ESS2. . . . .	113
A.19 Trame générée avec la technique CPM. . . . .	113
A.20 Signal envoyé codé par la technique $2\pi M$ -ULB. . . . .	114
A.21 Algorithme de réception de la technique $4 - 2\pi PSM$ . . . . .	116
A.22 Principe de la technique $2\pi OAM2$ . . . . .	117
A.23 Algorithme de réception de la technique $2\pi OAM2$ . . . . .	118
A.24 Signal envoyé codé par la technique $2\pi OAM1$ . . . . .	118
A.25 Algorithme de réception de la technique $2\pi OAM1$ . . . . .	119
A.26 Résultats <i>BER</i> en fonction du <i>SNR</i> pour la technique $2\pi OAM1$ . . . . .	119
A.27 Schéma synoptique du système de communication ULB réalisé. . . . .	120
A.28 Le générateur d'impulsions. . . . .	121
A.29 Les types d'antennes. . . . .	122
A.30 L'amplificateur. . . . .	123
A.31 L'oscilloscope. . . . .	124
A.32 La séquence d'apprentissage. . . . .	125
A.33 La référence 2. . . . .	126
A.34 La modulation 4-OAM. . . . .	126
A.35 Le signal 4-OAM final. . . . .	127
A.36 Schéma descriptif du système interrogateur/répondeur. . . . .	128
A.37 Schéma descriptif du système interrogateur/répondeur modifié. . . . .	128
A.38 Les références. . . . .	129
A.39 Algorithme général de réception. . . . .	130
A.40 La technique ESS2. . . . .	131
A.41 Corrélacion circulaire du signal $2\pi M$ reçu synchronisé avec la référence 2. . . . .	131
A.42 Les quatre références utilisées dans la technique $2\pi PSM$ . . . . .	132

A.43 Les quatre corrélations circulaires du signal $2\pi PSM$ reçu synchronisé avec les quatre références. . . . .	133
A.44 Signal $2\pi OAM$ à 2 séquences à 2 états reçu par l'antenne réceptrice du répondeur. . . . .	134
A.45 Les deux corrélations circulaires du signal $2\pi OAM$ à 2 séquences à 2 états reçu synchronisé avec : (a) la référence 21 (b) la référence 22. . . . .	135
A.46 Schéma du nouveau système DS-MGF-ULB. . . . .	136
A.47 Système DS-MGF avec la modulation 4-OAM. . . . .	137
A.48 La chaîne de transmission M-OAM avec les canaux IEEE. . . . .	139
A.49 Les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15.3a. . . . .	140
A.50 Les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15.4a. . . . .	140
A.51 Le schéma bloc du récepteur RAKE. . . . .	142
A.52 Les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15.3a après introduction du récepteur Rake. . . . .	142
A.53 L'apport du récepteur Rake sur les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15. 4a. . . . .	143
A.54 L'égaliseur MMSE. . . . .	144
A.55 La contribution de l'égalisation MMSE dans le cas des canaux IEEE 802.-15.4a. . . . .	144
A.56 L'effet des canaux IEEE.802.15.4a sur le système d'accès multiple DS-MGF-OAM. . . . .	146
A.57 La contribution de l'égalisation MMSE dans l'amélioration des performances du système DS-MGF-OAM. . . . .	146
B.1 Principe du positionnement endogène. . . . .	153
B.2 Principe du positionnement exogène. . . . .	154
B.3 Schéma bloc du processus de localisation ou de positionnement. . . . .	154
B.4 Méthode de l'inter-corrélation généralisée pour l'estimation des TDOA. . . . .	167
B.5 Schéma de principe de la triangulation. . . . .	171
B.6 Méthode de localisation par trilatération. . . . .	173
B.7 Méthode de localisation par multilatération. . . . .	175
B.8 Exemple de lieu géométrique de multilatération. . . . .	175

---

B.9	Architecture générale du système de localisation. . . . .	177
C.1	Architecture générale des systèmes. . . . .	192
C.2	Schéma bloc de la carte porteuse ADC-EMC. . . . .	192
C.3	Le fonctionnement interne d'un FPGA. . . . .	194
C.4	La conception logique et la génération du flux binaire. . . . .	195
C.5	Schéma bloc de la carte de traitement ADM-XRC-5T1. . . . .	196
C.6	La carte XRM-DAC-D4/1G. . . . .	197
C.7	Schéma bloc de la carte CAN XRM-ADC-S4/3G. . . . .	199
C.8	Architecture générale d'implémentation sur FPGA. . . . .	201
C.9	Architecture du récepteur d'un système de communication ULB. . . . .	201
C.10	Diagramme de décodage. . . . .	203
C.11	Algorithme de développement VHDL pour la modulation 4_OAM. . . . .	204
C.12	Décimation réalisée par le CAN ( $M = 4$ ). . . . .	207
C.13	Architecture parallèle de la corrélation ( $N = 8$ et $M = 4$ ). . . . .	208
C.14	Bloc de sous-corrélation de l'architecture parallèle ( $N=8$ ). . . . .	208

# Liste des tableaux

3.1	Liste des thèses encadrées. . . . .	23
A.1	Les symboles de la modulation 4-OAM. . . . .	105
A.2	Les symboles de la modulation 64-OAM. . . . .	108
A.3	Comparaison des performances des techniques étudiées. . . . .	115
B.1	Vue générale sur les méthodes de base de positionnement. . . . .	156
B.2	Paramètre $N_d$ en fonction de l'environnement. . . . .	162
B.3	Les fonctions de transfert GCC. . . . .	168
B.4	Tableau récapitulatif des principales métriques de localisation. . . . .	170



# Chapitre 1

## Introduction générale

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Avant-propos</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Curriculum vitæ</b>	<b>3</b>
1.2.1	Etat civil	3
1.2.2	Fonctions actuelles	3
1.2.3	Diplômes et titres universitaires	4
1.2.4	Parcours professionnel	4
<b>1.3</b>	<b>Plan du document</b>	<b>4</b>

---

### 1.1 Avant-propos

Le mémoire d'habilitation à diriger des recherches, bien que certains éléments de son contenu aient été définis comme obligatoires, laisse beaucoup de liberté à son rédacteur quant à la présentation et au degré de développement des diverses parties. Tout est affaire de ressenti personnel et de modération pour ne pas noyer le lecteur sous une foule de détails, tout en lui fournissant une information suffisante pour comprendre et correctement évaluer les travaux et activités présentés. C'est l'occasion pour un



enseignant-chercheur d'effectuer un retour sur ses premières années de carrière en enseignement, recherche et tâches administratives et de montrer, si possible, la cohérence, sinon la nature fructueuse des interactions entre elles. Les activités de recherche sont le fruit d'un projet d'ensemble plus ou moins élaboré dans ses grandes lignes, dont le déroulement ne peut être linéaire et doit être régulièrement révisé. De nombreux facteurs externes viennent interférer dans le déroulement de tous ces travaux : évolution des matières enseignées dans leur contenu et leur nature, modification des responsabilités assumées, développement et extinction de collaborations scientifiques ou de contrats de recherche. C'est en gardant toutes ces remarques à l'esprit que j'ai abordé le long et pénible travail de rédaction du présent mémoire.

Les domaines du transport, de la mobilité et de la logistique sont des piliers du développement économique de la région Hauts-de-France, territoire d'ancrage des compétences du pôle de compétitivité des transports i-Trans. Ils ont permis à l'Université Polytechnique Hauts-de-France de s'inscrire dans une dynamique régionale active porteuse de retombées socio-économiques. Alors naturellement mes travaux de recherche et ceux de mon groupe gravitent autour des systèmes de transports intelligents. Les systèmes ITS regroupent plusieurs thématiques en plein essor actuellement :

- Le véhicule connecté ou autonome
- Les systèmes embarqués temps réel
- La cyber sécurité
- La route intelligente
- Les services logistiques et de gestion de trafic

Les actions de recherche que j'ai menées ou que j'envisage de traiter sont fortement liées à ces thématiques. Outre les matières de base, mes activités d'enseignement sont en parfaite corrélation avec les évolutions constatées ou réalisées durant ces activités de recherche. Nous avons ainsi développé plusieurs outils innovants : Des unités de traitement du signal avancées (temps réels, reconfigurables, efficaces, ...), des algorithmes basés sur l'Intelligence Artificielle, Des récepteurs définis par logiciel (Software Define radio), Techniques radar à identification d'obstacles, techniques ULB haut débit, des liens full Duplex V2V, des codages pour la cryptographie, ...

## 1.2 Curriculum vitæ

### 1.2.1 Etat civil

Nom	EL HILLALI
Prénom	Yassin
Date de naissance	19 juillet 1979
Nationalité	Française
Lieu de naissance	Chemaïa (Maroc)
Situation familiale	Marié, 2 enfants
Coordonnées	860 rue des Arcins, 59310 Beuvry la forêt

### 1.2.2 Fonctions actuelles

Poste	Maître de Conférences (depuis septembre 2007)
Établissement	IUT DE Valenciennes
Departement	GEII
Laboratoire	IEMN (Institut d'électronique de microélectronique et de nanotechnologie)
Coordonnées (1)	IEMN /DOAE UVHC le mont Houy 59310 Aulnoy-lez-valenciennes 03.27.51.13.65
Coordonnées (2)	Batiment Wateau UVHC le mont Houy 59310 Aulnoy-lez-valenciennes

### 1.2.3 Diplômes et titres universitaires

2002/2005	Doctorat en Électronique Université de Valenciennes. Intitulée : " Étude et réalisation d'un système de communication et de localisation, basé sur les techniques d'étalement de spectre, dédié aux transports guidés" <b>Directeur de thèse</b> : Professeur J.M. Rouvaen.
2001/2002	DEA électronique option Télécommunications (Major avec Mention Très Bien) ISTV, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
1999/2001	Maîtrise és Sciences et techniques IEEA (Informatique Electronique Electrotechnique Automatique) (Major avec Mention A.Bien) Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech (Maroc)
2001/2002	DEUG Math/Physique (Mention A.Bien) Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech

### 1.2.4 Parcours professionnel

Depuis 2007	MCF à l IUT GEii de l Université de Valenciennes
2006/2007	ATER à mi-temps à l IUT GEii à l Université de Valenciennes.
2005/2006	ATER à mi-temps à l IUT informatique de Valenciennes (Antenne de Maubeuge).
2002/2005	Allocataire (Bourse Ministérielle) et Moniteur à Université de Valenciennes pendant trois ans (Septembre 2002 à Aout 2005)

## 1.3 Plan du document

Le second chapitre est consacré à la présentation des aspects relatifs à l'enseignement. Le troisième chapitre traite les aspects généraux concernant la recherche. Il est à noter que les aspects relatifs aux tâches administratives sont incorporés dans les deux chapitres précédents. Le chapitre 3 se termine par une liste de mes travaux (publications, communications, brevets).

Les travaux de recherche que j'ai encadrés seront ensuite présentés dans le chapitre 4, avec le support de quatre annexes.

La conclusion générale fait l'objet du dernier chapitre, après lequel sont placées les Annexes.

En fin de manuscrit figure une bibliographie contenant toutes les références introduites dans le texte.



# Chapitre 2

## Activités d'enseignement

### Sommaire

---

<b>2.1 Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Enseignements devant des groupes d'étudiants</b>	<b>8</b>
2.2.1 Historique	8
2.2.2 Enseignements de l'année 2017-2018	8
2.2.3 Encadrement de stages	10
2.2.4 Encadrement de Projets	11
2.2.5 Collaborations internationales	15
<b>2.3 Responsabilités liées à l'enseignement</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Vulgarisation</b>	<b>17</b>
<b>2.5 Perspectives</b>	<b>18</b>

---

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre sont regroupées les tâches d'enseignement que j'ai eu l'occasion d'accomplir en parallèle de la réalisation de mon doctorat, puis en tant que Maître de Conférences : cours magistraux, dirigés et pratiques, encadrement de stages, responsabilités diverses et collaborations avec d'autres Universités ou organismes.

## 2.2 Enseignements devant des groupes d'étudiants

### 2.2.1 Historique

En parallèle avec la préparation de ma thèse de doctorat, j'ai assuré quelques séances de travaux pratiques et dirigés dans les domaines de la physique, de l'électronique, des systèmes numériques de télécommunication et de traitement du signal, dans le cadre d'un monitorat de 3 ans et de 2 années d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à mi-temps à l'Institut Universitaire de Technologie de l'Université de Valenciennes, dans le Département d'Informatique puis dans le Département de Génie Électrique et Informatique Industrielle (GE2I).

J'ai été nommé Maître de conférences à l'Institut Universitaire de Technologie de l'Université de Valenciennes dans le Département GE2I en septembre 2007. J'ai assuré depuis des enseignements divers tant dans leur nature, que dans les disciplines traitées et les niveaux d'étude. J'ai aussi assumé les tâches administratives liées à ces enseignements.

En particulier, dès mes débuts, j'ai assuré à titre transitoire (presqu'une année et demi) la gestion de l'atelier GE2I dont celui d'un service de conception et de réalisation de systèmes logiques à partir de circuits programmables FPGA (Field Programmable Gate Arrays), en attendant l'arrivée d'un professeur technique associé issu de l'enseignement secondaire destiné à me succéder dans ces tâches, puis en l'aidant durant sa période de mise en route. Ces enseignements ont été enrichis par leur rapport étroit, voire leur synergie, avec mes travaux de recherche aussi bien en télécommunications qu'en prototypage de systèmes à l'aide de circuits numériques programmables. J'ai aussi eu l'opportunité d'assurer **la responsabilité pédagogique** de la License Professionnelle par apprentissage EICET (Electronique, Informatique, Communications Embarquées appliquées aux Transports).

### 2.2.2 Enseignements de l'année 2017-2018

A titre informatif, je donne ci-dessous le détail des enseignements dont je suis chargé pour la présente année scolaire, qui correspondent à un horaire total équivalent à 250 heures de Travaux Dirigés.

Une part de mon service est effectuée au sein du Département GE2I de l'IUT de Valenciennes. Elle comprend des enseignements de base :

- TD et TP d'Électronique,
- TD et TP d'Informatique Industrielle,
- Cours et TD de Gestion de Projet\*.
- Cours, TD et TP de Traitement du Signal par DSP (Digital Signal Processor).
- Cours, TD et TP Domotique\*.
- TD et TP programmation smartphone\*.
- Réalité virtuelle et Automatisation\*. Les TP sont sous la forme de jeux sérieux (**serious games**).

Le reste de mes enseignements se déroule au sein de l'Institut des Sciences et Techniques de Valenciennes, dans le cadre du Master Ingénierie des Systèmes Embarqués et Communications Mobiles (ISECOM) :

- Cours, TD et TP de Traitement du Signal Avancé\*,
- Cours et TD de Communications dans les Systèmes de Transport Intelligents\*,
- TD et TP d'Architecture des multiprocesseurs\*,

et du Master Cyber-Défense et Sécurité de l'Information (CDSI) :

- Cours, TD et TP de Sécurité dans les Objets Mobiles Communicants\*,
- Cours et TP de Sécurité dans les Systèmes Électromagnétiques\*.
- TP de Radio intelligente et logicielle\*.

La plupart des enseignements cités précédemment (marqués par une étoile) sont nouveaux et j'ai eu l'opportunité de les créer et de les mettre en place. Ces enseignements sont spécifiques et ont nécessité beaucoup d'investigation théorique et technique de ma part pour la mise en place et la veille technologique.

---

\*. cours élaborées par mes soins.



### 2.2.3 Encadrement de stages

J'ai eu l'opportunité d'encadrer plusieurs stages et projets de master, nationaux et internationaux, dont les thèmes découlaient principalement de mes activités de recherche, par exemple :

*en 2013*

Encadrement de deux stages de Master Professionnel, le premier sur l'implémentation d'un émetteur à débit variable basé sur la technologie ultra-large bande (ULB) sur une plateforme FPGA (étudiant Nur Cahyono Kushardianto, Université de Valenciennes), le second sur l'implémentation d'un récepteur à débit variable basé également sur la technologie ULB sur une plateforme FPGA (étudiant Sadli Rahmad, Université de Valenciennes).

Suite à ces travaux, nous avons réalisé un POC d'un système de communication fonctionnant en temps réel basé sur des composants FPGA.

Encadrement d'un stage de fin d'études d'ingénieur portant sur l'étude et la conception d'un radar à entrées et sorties multiples (MIMO) combinant les techniques ULB et de multiplexage en fréquence (OFDM) (étudiante Sara Iben Jellal, École Nationale des Sciences Appliquées d'El Jadida, Maroc).

*en 2014*

Encadrement de deux stages de Master Professionnel, le premier sur la réalisation d'une tête radiofréquences (RF) end-to-end pour un système de contrôle santé non destructif (étudiant Donchieu Cédric, Université de Valenciennes), le second sur l'étude d'un radar identifiant des cibles, basé sur la technologie ULB OFDM (étudiant Oualid AFIF, Université de Valenciennes).

Encadrement d'un stage de fin d'études d'Ingénieur sur l'implémentation d'un émetteur à débit variable basé sur la technologie ULB sur une plateforme FPGA (étudiant Saad Allah Nabaoui, École Nationale des Sciences Appliquées de Marrakech, Maroc).

J'ai encadré le stage de deux étudiants en licence. Leurs travaux constituaient à modéliser un drone via MATLAB/SIMULINK. Le but étant de préparer une nouvelle thématique pour les projets Master et DUT autour des drones. (XIA Yu, XU Fengye : UVHC)

*en 2015*

Encadrement de deux stages de Master Professionnel, le premier sur le diagnostic à

distance des informations CAN sur véhicule routier (étudiant Labiod Mohamed Ay-men, Université d'ANABA, Algérie), le second sur l'étude et la réalisation d'un radar OFDM-UWB pour l'aide à la conduite routière (étudiante Zerdazi Imene, Université d'ANABA, Algérie). Encadrement d'un stage de fin d'études d'Ingénieur sur le contrôle de structures par capteurs ultrasonores interdigués pilotés par RFID (étudiant Amine Jaouad, École Nationale des Sciences Appliquées d'El Jadida, Maroc).

*en 2017*

j'ai encadré le stage d'un étudiant en Master professionnel en collaboration avec **NO-KIA**. Le but est de concevoir un drone pour cartographier en 3D la couverture du réseau 4G et les niveaux de réception du signal (Sofiane Bouguerab UVHC). Nous avons développé le système de captation des données ainsi qu'un système de planification intelligent de la trajectoire du drone.

## 2.2.4 Encadrement de Projets

Dans toutes les formations que nous proposons les étudiants sont amenés à travailler sur des projets pour les impliquer dans un processus d'apprentissage actif. J'ai proposé plusieurs projets à mes étudiants qui préparent des diplômes différents DUT, L3, LP et Master. J'ai essayé de faire collaborer des étudiants de différentes formations sur le même sujet pour que chacun puisse enrichir le projet avec ses compétences distinctives. Certains projets ont été effectués avec une mise en situation industrielle. En fonction de la formation qu'il prépare, chaque étudiant va se voir affecter un rôle particulier qu'il va endosser. (Chef de projet, architecte, développeur, technicien, Pentester "Personne chargée de tester la sécurité d'un système d'information" ...). Voici quelques exemples de ces projets :

- **Syfra** : J'avais proposé le projet de réaliser un système de diagnostic de véhicule à distance dans le cadre de la plateforme Syfra (pour plus d'informations voir section 3.4 page 37). Nous avons segmenté le projet en plusieurs parties : la conception de la carte électronique embarquée dans la voiture, programmer le microcontrôleur de la carte, et concevoir une application sur smartphone pour interagir avec la voiture via la carte électronique. J'ai proposé chaque partie à des étudiants de formations hétérogènes, chaque étudiant participe avec ses compé-

tences particulières :

- La conception de la carte électronique a été confiée à des étudiants en master ISECOM.
- La carte embarque un microcontrôleur ARM avec un contrôleur, transceiver CAN ainsi qu'une connectivité WIFI.
- La réalisation de la carte ainsi conçue a été prise en charge par des étudiants en L3.
- La programmation du Firmware a été la tâche d'un deuxième groupe en master spécialisé dans les systèmes embarqués.
- En parallèle, j'ai confié le développement d'une application sur Android à un autre groupe d'étudiants, ils ont programmé l'application en JAVA.

Une fois que le système a été réalisé et testé, nous l'avions confié à un groupe d'étudiants en Master CDSI avec un seul but : prendre le contrôle de la voiture en exploitant les failles du système que nous avons greffé au véhicule. Leurs travaux ont été couronnés de succès puisqu'ils ont réussi de prendre le contrôle de la voiture. Les travaux de ce dernier groupe ont été conclus par la rédaction de recommandations à court et à long terme. Les premières ont pour but de combler les failles actuelles du système, les deuxièmes proposent des idées pour la création d'un nouveau système sécurisé dès sa conception (**Secure by design**). Le nouveau système est en train d'être réalisé dans le cadre de projet d'étudiant.

- **Cyber** : J'ai proposé plusieurs sujets en relation avec le domaine de la cybersécurité,
  - Spoofing GPS : les étudiants avaient comme mission de fausser la position estimée par un récepteur GPS. Ces travaux ont porté leurs fruits, nous avons fait croire à l'application google Maps d'une tablette Android que nous faisons un tour au Japon. La méthode est très simple, on récupère l'éphéméride sur internet, on synthétise la somme des signaux que doit recevoir une antenne GPS à la position voulue, et on émet ce signal à l'aide d'une carte USRP. Les signaux ainsi générés sont largement plus puissants que les signaux réels, le récepteur va se caler dessus et ignorer les signaux réels.
  - Réseau 4G : la mission proposée aux étudiants était de créer un réseau 4G complet en utilisant des logiciels dont le code est ouvert . Ce projet a exigé un investissement plus important de ma part, puisqu'il met en œuvre des

compétences hétérogènes (informatique, télécommunication, électronique). Nous avons réussi à créer le réseau à l'aide d'un seul ordinateur exécutant le MME SGW PGW, HSS ainsi que l'eNode B avec un Softmodem. Nous avons utilisé une carte USRP en guise de Frontend. Ces travaux vont ouvrir la porte à d'autres pistes comme l'étude de la sécurité des réseaux 4G, améliorer les performances du Spoofing GPS...

- **Radars** : j'ai eu l'occasion de proposer des projets en relation avec les Radars, soit des projets de découverte et de conceptions de radars ou des projets d'interaction avec les radars du commerce. Par exemple la voiture de la plateforme SYFRA est équipée de plusieurs radars installés tout au tour du véhicule. J'avais proposé un projet pour synchroniser les données des différents radars et transformer les informations captées dans un seul référentiel. Notre but est de pouvoir désigner l'obstacle le plus dangereux. Cet obstacle sera alors signalé au conducteur par un son **spécialisé 3D**.
- **Drone** : j'ai mené plusieurs activités autour des drones. J'ai lancé deux projets. Le but du premier est la conception, le dimensionnement et la réalisation d'un drone. Le deuxième portant sur la programmation et la stabilisation du drone en vol. Les drones et les compétences acquises ont servi de support pour d'autres activités comme les stages la collaboration avec NOKIA et le montage de la plateforme TIDICART.



FIGURE 2.1 – photo d'un des drones construit par les étudiants

- **TIDICART** : Développer et faire évoluer progressivement un petit véhicule électrique, vers une plateforme innovante ayant vocation à participer à la propreté

du campus par le ramassage automatisé, intelligent et circonstancié des déchets extérieurs. Le véhicule sera intégrateur de technologies innovantes mais néanmoins matures ou proches de la maturité. Il sera en réalité un système complexe combinant, a minima, un châssis terrestre motorisé et autonome, un drone embarqué pour le repérage et la cartographie des déchets, un ou plusieurs modes de ramassage embarqués. Le véhicule devra :

- Etre propre (motorisation électrique, gestion et optimisation des ressources énergétiques).
- Offrir plusieurs modes de conduite (manuel, autonome, semi-autonome).
- Offrir la possibilité de mettre en œuvre simultanément ou non plusieurs modes de collecte des déchets (aspiration, saisie, soufflage).
- Permettre le tri des déchets collectés en mode embarqué ou autre.
- Etre communicant (avec son drone, avec sa base, avec tout autre dispositif ad hoc).
- Assurer la sécurité de ses éventuels passagers comme celle des usagers du campus.

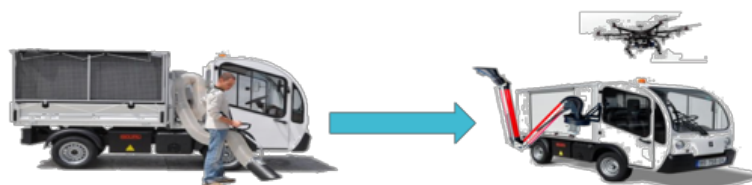


FIGURE 2.2 – L'objectif de la plateforme Tidicart

- **Imprimante 3D** : j'ai lancé à l'IUT un projet sur l'impression 3D, le but était de monter une imprimante 3D et améliorer son fonctionnement. Ce projet était très passionnant et motivant pour les étudiants. Ils ont pu mettre en œuvre des compétences complémentaires, de l'électronique, informatique industrielle, et l'automatique et un peu de mécanique. Après avoir monté les parties électroniques et la partie mécanique, les étudiants se sont penchés sur l'amélioration de quelques fonctionnalités comme la régulation de la température, passer d'une régulation tout ou rien à une régulation progressive avec un PID. Les étudiants ont pu mener un travail multidisciplinaire, implémenter un algorithme automatique dans un microcontrôleur.

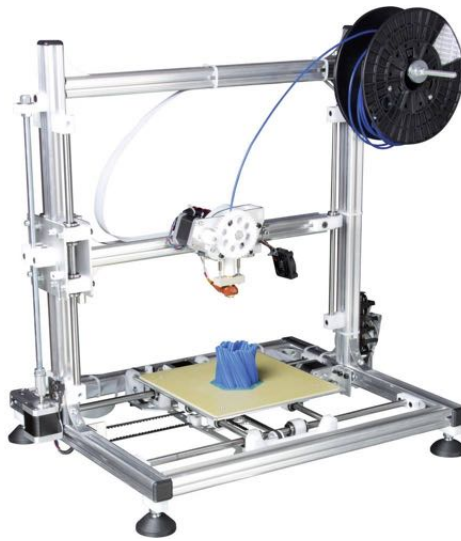


FIGURE 2.3 – photo de l'imprimante 3D construite par les étudiants

### 2.2.5 Collaborations internationales

En tant que professeur invité, j'assure les cours de communications numériques, télécommunications sans fil, systèmes embarqués et VHDL à l'**École Nationale des Sciences Appliquées de Marrakech** (depuis 2013).

Dans le cadre de notre collaboration avec l'**ENSA d'El-Jadida**, nous avons échangé des étudiants en stage et j'ai contribué à la création des modules (cours TD TP) dans le domaine des systèmes embarqués (implémentation des algorithmes de traitement de signal sur des plateformes reconfigurables),.

Durant les dernières années, nous avons établi une collaboration très forte avec le centre des systèmes embarqués (CECS) de l'**Université de Californie Irvine (UCI)**. cette collaboration a été formalisée par la signature d'un Protocole d'Entente (Memorandum of Understanding) et un Inter-Institutional agreement ainsi que l'acceptation d'un ERASMUS+(2018-2019). Dans ce cadre nous avons échangé des étudiants en Master et des Doctorants. Et j'ai initié un axe traitant du développé est le développement de modules qui traite la sécurité des systèmes embarqués.

En 2018, l'université a signé une convention pour délocalisation la délivrance du master CDSI au Maroc **INSTITUT SUPERIEUR D'INGENIERIE ET DES AFFAIRES (ISJA)**

**Casablanca.** Dans le cadre de cette convention, et en étant le responsable pédagogique de ce master, j'ai assuré le transfert des compétences, la mise en place des modules et le choix des intervenants et la sélection des étudiants.

Depuis septembre 2018 je suis en train de monter une formation dans le domaine de la réalité virtuelle avec une université canadienne.

## 2.3 Responsabilités liées à l'enseignement

J'ai mis en place le Master Cyber-Défense et Sécurité de l'Information CDSI en collaboration avec Pr. A. Rivenq. **Je suis responsable pédagogique** de première année, tant en formation initiale qu'en formation continue, depuis septembre 2015 et responsable de deuxième année depuis 2017. La thématique un peu particulière de cet enseignement a nécessité l'équipement et l'installation par mes soins d'une **nouvelle salle cyber** de travaux pratiques indépendante au niveau du réseau informatique de l'Université, ainsi que l'élargissement de nos contacts industriels. Il faut également citer une participation annuelle au **FIC (Forum International de la Cyber-Sécurité)** où je tiens le stand représentant l'Université de Valenciennes et le Master Cyber-Défense et Sécurité de l'Information. J'ai accordé dans ce cadre une interview intitulée "Nos voitures ont des pare-chocs, mais pas de pare-feu" concernant la cyber-sécurité dans les transports, parue dans le journal "**La Voix du Nord**" le 21 novembre 2016.

J'ai accordé une autre interview intitulée « A Valenciennes, la fabrique des hackers éthiques » parue dans **Le Monde** 23/01/2018. Nous avons été interviewés, mes étudiants et moi, par le journal **France 3**, suite à l'épidémie du virus informatique ( le Bitlocker WANNACRY). L'occasion de cette interview nous a permis de renforcer le discours que nous menons sur l'importance de la communication dans la formation de nos étudiants surtout dans leurs futurs métiers de RSSI.

En 2017, et vue la réussite du master surtout en termes des contrats de professionnalisation et la forte demande des entreprises et surtout des institutions étatiques, nous avons décidé d'ouvrir le Master CDSI en **formation par apprentissage**. **J'ai porté le dossier de ce master devant le comité.** J'ai eu à collecter les lettres de soutiens des entreprises, la rédaction du dossier ainsi que sa présentation et sa Défense. Pour conforter le dossier de cette ouverture, nous avons cherché le soutien des collectivités locales par-

ties prenantes de ce projet, surtout que le parcours par apprentissage est localisé sur l'antenne de Maubeuge. Ce qui a impliqué l'établissement d'un accord avec le **pôle numérique à Maubeuge** (dont j'ai participé au dimensionnement et au choix des équipements) pour le partage et la mise à disposition des équipements pour nos étudiants. J'ai rencontré plusieurs difficultés générées, entre autres, par les contraintes que nous nous sommes imposées. Notre but est de **garantir la même qualité de formation** à nos étudiants **FI et FA** par exemple :

- Un programme identique ainsi que des intervenants identiques : nous nous sommes forcés à coordonner la formation en FI et en FA malgré leur différence (répartition du programme théorique en 3 semestres en FI et sur 4 semestres en FA), nous avons aussi motivé les intervenants à dispenser les cours en double à Valenciennes et à Maubeuge.
- Le même environnement de travail qu'à Valenciennes : nous avons dû convaincre l'ISTV et l'UPHF à financer les équipements d'une nouvelle salle et une fibre optique dédiées à la formation Cyber à Maubeuge.
- Le recrutement d'un nombre de contrats minimums pour l'ouverture en alternance.

Toutes ces difficultés ont été surmontées et le master est ouvert en alternance à Maubeuge depuis septembre 2018 (10 étudiants en contrat d'apprentissage M1 et 9 en M2). Le parcours FI est maintenu à Valenciennes (24 étudiants en M1 et 20 en M2)

## 2.4 Vulgarisation

Chaque année, j'anime un atelier imprimante 3D durant les journées **portes ouvertes** de notre établissement dans les locaux du département IUT GEII. Je participe également pour notre Département à la **Fête de la Science**, à l'occasion de laquelle nous accueillons des élèves du cycle primaire (CM1, CM2) autour de petits ateliers développés sur le thème "drone".

Enfin tous les ans, je participe à de nombreux salons : Salon de l'Étudiant, Salon des Masters et Salon des Études Courtes (Lille et Valenciennes).



## 2.5 Perspectives

Depuis janvier 2018, je participe activement à la construction des maquettes de **la nouvelle spécialité Electronique et Systèmes Embarqués ESE** de l'INSA-HF, j'ai proposé des modules et des contenus en accord avec mes activités de recherche, voici quelques exemples :

- Communications inter et intra véhicules.
- Sécurité des systèmes embarqués.
- Systèmes multi-processeurs embarqués.
- Hardware Software Co-Design.
- Communications numériques avancées.
- Architecture temps réel pour l'embarqué.
- Intelligence artificielle (réseau de neurones, Deep learning).

J'ai l'intention aussi de porter un DU ou une LP spécialisé dans « RÉALITÉ VIRTUELLE ET AUGMENTÉE » en collaboration avec **Champlain** College Saint-Lambert au Canada.

Suite à ma participation au dernier colloque du DUT GEII à Nîmes en tant que conférencier dans la commission Cybersécurité, Je souhaite oeuvrer pour introduire une sensibilisation à la cybersécurité dans le PPN du DUT GEII. Sensibilisation que nous avons réussi à intégrer dans le programme de la licence Geii à l'ISTV en collaboration avec le chef de département électronique à l'ISTV ainsi qu'une introduction à l'intelligence artificielle.

# Chapitre 3

## Activités de recherche

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Plan du chapitre</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Contexte et motivation</b>	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Synthèse des résultats de recherche</b>	<b>22</b>
3.3.1	Publications et communications	22
3.3.2	Encadrement doctoral	22
3.3.3	Participation à des contrats et projets de recherche	22
3.3.3.1	Contrat RAVIOLI : Projet RADar et VIsion Orientable, Lidar	22
3.3.3.2	Contrat RAVIOLI 2 : suite de RAVIOLI dans le cadre de TAT	24
3.3.3.3	Contrat CARVAT : Couplage Automatique des rames par Radar et Vision Artificielle pour Transports guidés	24
3.3.3.4	Contrat MODEASY : MOdél Driven dEsign for Automotive Safety embedded sYstem	25
3.3.3.5	Contrat PRIMA-CARE : Prévention de la collision Routière par association Intelligente Multi-capteurs radar, avec gestion dynamique d'Alertes sonores, fonction du Risque Encouru	25

3.3.3.6	Projet LET'S GO : modelisation vÉrificaTion, and SI- mulation in Guided transportation cOmmunications .	25
3.3.3.7	Contrat ANR Cyclope (en cours) . . . . .	26
3.3.3.8	Projet INTERCOR (en cours) . . . . .	27
3.3.3.9	Projet PHC MAGHREB TRANSVERSAL 2019 intitulé UID - RATSr : RFE . . . . .	29
3.3.3.10	Projet ELSAT . . . . .	30
3.3.4	Responsabilités et collaborations liées à la recherche . . . . .	32
3.3.4.1	Au niveau local et régional . . . . .	32
3.3.4.2	Au niveau national . . . . .	34
3.3.4.3	Au niveau international . . . . .	35
3.3.4.4	Valorisation . . . . .	37
<b>3.4</b>	<b>Plateformes . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>3.5</b>	<b>Publications et production scientifique . . . . .</b>	<b>41</b>
3.5.1	Articles dans une revue internationale avec comité de lecture .	41
3.5.2	Conférences internationales avec comité de lecture et actes . . .	43
3.5.3	Article dans une revue nationale avec comité de lecture . . . . .	51
3.5.4	Communications Nationales avec actes . . . . .	51
3.5.5	Chapitre de livre . . . . .	52
3.5.6	Brevet . . . . .	52

## 3.1 Plan du chapitre

Le présent chapitre est consacré à un résumé de mes activités de recherche, dont le contexte et la motivation seront d'abord présentés, suivis d'une synthèse de ces résultats et d'une liste de travaux détaillée.

## 3.2 Contexte et motivation

J'ai préparé de 2002 à 2005 une thèse de doctorat en électronique à l'université de Valenciennes intitulée " Étude et réalisation d'un système de communication et de localisation, basé sur les techniques d'étalement de spectre, dédié aux transports guidés" sous la direction du professeur Jean-Michel Rouvaen.

Je suis actuellement Maître de Conférences à l'IEMN (Institut d'Électronique, de Micro-électronique et de Nanotechnologie) au sein du Département d'Opto-Acousto-Électronique. Mes activités de recherche depuis 2002 ont été effectuées d'abord au sein de l'équipe de recherche Radio-Détection et Traitement de Signaux dirigée par le professeur Jean-Michel Rouvaen, puis depuis 2012 en tant que membre du groupe Communications Numériques, dirigé actuellement par Mme Atika Rivenq.

Dès le départ, mes travaux se sont orientés principalement vers le domaine des transports intelligents. Après avoir développé un système de communication et de localisation pour les transports guidés automatiques, j'ai accordé une attention particulière à la technologie ultra-large bande appliquée aux systèmes de télécommunication pour les transports terrestres, avec comme objectifs la conception de systèmes embarqués dans des véhicules, destinés à la localisation et la détection d'obstacles, ainsi que celle de systèmes de communication entre véhicules afin de partager les informations pertinentes recueillies par leurs capteurs.

Tous ces travaux ont été systématiquement validés par des campagnes de mesure en situation réelle, et la plupart ont débouché sur la réalisation d'un prototype fonctionnel destiné à démontrer la faisabilité du système à l'aide d'unités de calcul autonome. Le développement de ces prototypes m'a ouvert la porte pour initier des collaborations avec des chercheurs dans des domaines adjacents (notamment l'Institut de Recherche en Informatique et Automatique de Lille dans le domaine de l'informatique et le Laboratoire d'Automatique, Mécanique et Informatique industrielle de Valenciennes en ce qui concerne le développement des systèmes informatiques embarqués).

Signalons également que ces pistes de recherche ont été en partie développées dans le cadre de projets et de collaborations nationaux et européens, dans lesquels je suis impliqué de manière active dès le départ, dans les phases de montage et de constitution de consortium, et dans l'exécution et l'administration en étant responsable d'opérations.

## 3.3 Synthèse des résultats de recherche

### 3.3.1 Publications et communications

### 3.3.2 Encadrement doctoral

J'ai participé activement et de façon très significative à l'encadrement de 17 thèses, dont 11 thèses soutenues et 1 (CIFRE) stoppée avant la soutenance. Je co-encadre actuellement 5 thèses de doctorat, dont deux seront prochainement soutenues. Les financements de ces thèses sont divers et variés : contrat doctoral, Projet ANR, européen ou des financements Industriel, ou régional. Le tableau 3.1 présente la liste des thèses encadrées.

### 3.3.3 Participation à des contrats et projets de recherche

Pour enrichir mes activités de recherche, et concrétiser mes collaborations, j'ai eu la chance de participer à plusieurs projets et contrats de recherche. Mon engagement dans ces projets a pris plusieurs formes au début comme participant puis par la suite comme responsable ou porteur du projet. Monter des projets ou participer au montage des projets est une tâche très prenante et fastidieuse et pas souvent couronnée de succès. Nous avons eu la chance de bénéficier de soutien de plusieurs programmes et projets (Européens, ANR, CPER, INTERREG, Industriels, ...)

#### 3.3.3.1 Contrat RAVIOLI : Projet RAdar et VIsion Orientable, LIdar

Objectif : Ce projet avait pour but de concevoir un système de fusion multi-capteurs pour la perception de l'environnement dynamique d'un véhicule. Ce projet, financé par le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional), et le FRT (Fonds de la recherche technologique), entre dans le cadre du programme TACT (FEDER/FRT). Il a commencé début 2004 et s'est terminé mi-2005.

Partenaires : Les participants étaient : UVHC-DOAE, INRETS, USTL-I3D, ULCO-LASL, Université d'Artois-LabOGP, Nortek, Université du Kent, IUTA-GMP et THALES.

Nom	Prénom	Date début	Date fin	Pourcentage	Devenir
Sakkila	Laila	01/10/2006	03/12/2009	50%	Ingénieure
Elabed	Amel	01/12/2008	27/01/2012	35%	Ingénieure
Tahri	Tarik	01/10/2010	29/09/2014	50%	E-C Maroc
Kossonou	Ignace	01/10/2010	27/05/2014	30%	Ingénieur
Touati	Nadjah	01/10/2012	20/11/2015	30%	Ingénieure
Sassi (co-tutelle Tunisie)	Aymen	01/11/2009	25/11/2016	40%	MCF Tunisie
Hamidoun (co-tutelle Maroc)	Khadija	01/01/2013	29/02/2016	50%	E-C Maroc
Elaboubbi	Adil	01/03/2013	4/04/2016	30%	Ingénieur
Alouani	Ihsen	01/04/2013	30/01/2017	40%	MCF
Pertuisot	Geoffroy	01/01/2014	arrêt juin 2016	50%	Ingénieur
Maatougi (co-tutelle Maroc)	Lamya	01/10/2013	12/04/2017	50%	E-C Maroc
Sahraoui	Selima	01/10/2015	début 2019	30%	en cours
Sadli	Rahmad	01/10/2015	début 2019	40%	en cours
Salem	Fatma	25/01/2016	6/09/2018	60%	MCF Lybie
Ribouh	Soheyb	01/11/2017	fin 2020	50%	en cours
Didouh	Ahmed	01/09/2018	fin 2021	60%	en cours
Kiassi	Mouad	08/01/2018	fin 2021	30%	en cours

TABLE 3.1 – Liste des thèses encadrées.

Contribution personnelle : la réalisation d'une unité de traitement des données radar basé sur une carte FPGA générant des codes pseudo-aléatoires à 50 MHz.

### 3.3.3.2 Contrat RAVIOLI 2 : suite de RAVIOLI dans le cadre de TAT

Objectif : Ce projet de recherche et développement, qui rentrait dans le cadre du Contrat Plan État Région pour les Technologies Avancées pour les Transports (TAT), avait comme objectif final l'amélioration de la sécurité de conduite grâce à la perception de l'environnement du véhicule par l'intermédiaire d'un ensemble de capteurs de type radar, lidar et vision artificielle. Il a commencé début 2006 et s'est terminé mi-2007. Il était motivé en grande partie par des questions posées par nos partenaires industriels, équipementiers ou constructeurs de véhicules.

Contribution personnelle : Interface de communication entre les capteurs radar et vision et acquisition des données destinées au module de fusion. Co-Encadrement d'un étudiant Master Professionnel Électronique et Télécommunication.

### 3.3.3.3 Contrat CARVAT : Couplage Automatique des rames par Radar et Vision Artificielle pour Transports guidés

Objectif : Le but de ce projet était de réaliser un système permettant le couplage automatique des rames de métro des réseaux de transports guidés en mettant en oeuvre l'association de radars et de systèmes de vision artificielle.

Projet commencé début 2008 et terminé fin 2009 (ITRANS).

Partenaires : IEMN-DOAE, Alstom, INRETS, LAGIS-USTL

Contribution personnelle : utilisation des techniques de codage et multiplexage que j'ai développées pendant ma thèse dans le système radar réalisé. J'ai donc contribué à la planification et à l'exécution de certaines étapes du projet et à l'estimation du matériel technique nécessaire à la réalisation du volet radar.

### **3.3.3.4 Contrat MODEASY : MOdel Driven dEsign for Automotive Safety embedded sYstem**

Projet INTERREG III.

Objectif : réalisation et intégration d'un système de contrôle d'allure intelligent associant les informations provenant d'un GPS et d'un radar anti-collision.

Partenaires : IEMN-DOAE, INRIA Future (LIFL), Université du Kent à Canterbury.

Durée 36 mois, Début : Octobre 2004, Fin : Décembre 2007.

Apport personnel : Optimisation des algorithmes de détection des signaux radar utilisant les statistiques d'ordre supérieur afin de les implémenter sous FPGA. Encadrement d'un étudiant Master Recherche Informatique.

### **3.3.3.5 Contrat PRIMA-CARE : Prévention de la collision Routière par association Intelligente Multi-capteurs radar, avec gestion dynamique d'Alertes sonores, fonction du Risque Encouru**

Projet ANR PREDIT.

Objectif : L'objectif du projet était de démontrer l'intérêt et la faisabilité technique d'un système de sécurité actif basé sur le suivi intelligent d'obstacles en milieu routier avec gestion intelligente d'alarmes sonores spatialisées en 3D liées au niveau et à la localisation précise du danger encouru afin de renforcer la vigilance du conducteur, de protéger les passagers et d'éviter des collisions. Début : juin 2008, Fin : mai 2011.

Partenaires : INRETS; A-VOLUTE- France 3D Sound Expert; IEMN-DOAE; UVHC-LAMIH-ROI.

Apport personnel : Participation et contribution au montage scientifique et financier du projet.

### **3.3.3.6 Projet LET'S GO : modeLisation vErificaTion, and SIMulation in Guided transportation cOmmunications**

Projet INTERREG IV. Suite de MODEASY

Objectif : ce projet se plaçait dans le contexte du transport guidé. L'objectif était de concevoir un système permettant, d'une part, une localisation globale et relative des



trains sur les lignes et entre trains dans les différents environnements électromagnétiques rencontrés, et, d'autre part, une communication à débit variable, en fonction de la pertinence des données inter-trains ou entre le train et le centre de contrôle. La collaboration avec les autres entités participant au projet visait à l'utilisation d'une nouvelle Plateforme de calcul temps réel combinant FPGA et GPU, et le développement d'un outil de génération de codes partant d'un modèle algorithmique de haut niveau.

Partenaires : INRETS; IEMN-DOAE; INRIA Future (LIFL), Université du Kent à Canterbury, Université d'ESSEX, UltraSoc, GPUTEK.

Soumis dans le cadre l'Appel à propositions 2008 INTERREG IVA 2 Mers Seas Zeeën (Entre Deux Mers), projet non retenu.

Apport personnel : Participation et contribution au montage scientifique et financier du projet en qualité de responsable côté IEMN-DOAE.

### 3.3.3.7 Contrat ANR Cyclope (en cours)

Objectif : L'objectif est de proposer des équipements de sécurisation pour les cyclistes en lien avec des dispositifs d'avertissement pour les conducteurs de bus dans un contexte de circulation urbaine. Il s'articule autour des deux volets "techniques radio" et "sciences humaines et sociales" menés en forte interaction afin d'anticiper l'impact des choix techniques sur le comportement des usagers et d'adapter au mieux l'information délivrée pour favoriser leur collaboration.

Partenaires : IETR (Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes - UMR CNRS); IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies pour le Transport, l'Aménagement et les Réseaux, Établissement Public à caractère Scientifique et Technologique); IEMN-DOAE; KEOLIS Rennes (STAR), opérateur de transport collectif de Rennes Métropole et gestionnaire du parc de vélos (Vélo Star); A-Volute, PME spécialisée en spatialisation 3D du son.

Durée : 42 mois.

Début : Juin 2015.

Apport personnel : Participation et contribution au montage scientifique et financier du projet, responsable du projet pour l'IEMN. compétences et expérience en ce qui concerne la poursuite radar, le suivi d'obstacles, l'intégration et l'implémentation des algorithmes de traitement en temps réel et surtout des techniques de traitement de signal associé aux applications radar. Ce projet était l'occasion d'introduire le **Deep lear-**

ning et autres techniques d'intelligence artificielle pour améliorer les performances de notre radar. En effet nous avons développé un radar permettant de mesurer la distance avec une très bonne précision et qui était capable d'identifier les cibles (voiture, vélo, piéton). Et pour améliorer ces performances nous avons introduit les algorithmes d'IA, jusqu'alors réservés au traitement d'images et vidéo, et nous avons aussi amélioré les algorithmes de suivi pour prendre en compte le type de la cible.



FIGURE 3.1 – Interaction entre les cyclistes et le bus, les angles morts du bus.

### 3.3.3.8 Projet INTERCOR (en cours)

Le projet INTERCOR (Interoperable Corridors) est un volet du programme européen CEF (Connecting Europe Facilities) qui finance des projets d'intérêt public dans les domaines des transports, de l'énergie et des télécoms. Ce projet regroupe 4 pays : France, Belgique, Royaume-Uni, Pays-Bas et 16 partenaires universitaires et industriels (10 français, dont l'IEMN/DOAE). La thématique traitée est celle des Systèmes de transport coopératifs intelligents (C-ITS), impliquant des systèmes de communication supportant de futurs services vehicle-to-vehicle (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I) et/ou infrastructure-to-infrastructure (I2I). Les objectifs généraux des C-ITS sont la réduction des coûts d'infrastructures, l'amélioration de la sécurité routière, la réduction des congestions de trafic, la réduction de la consommation d'énergie et de l'impact

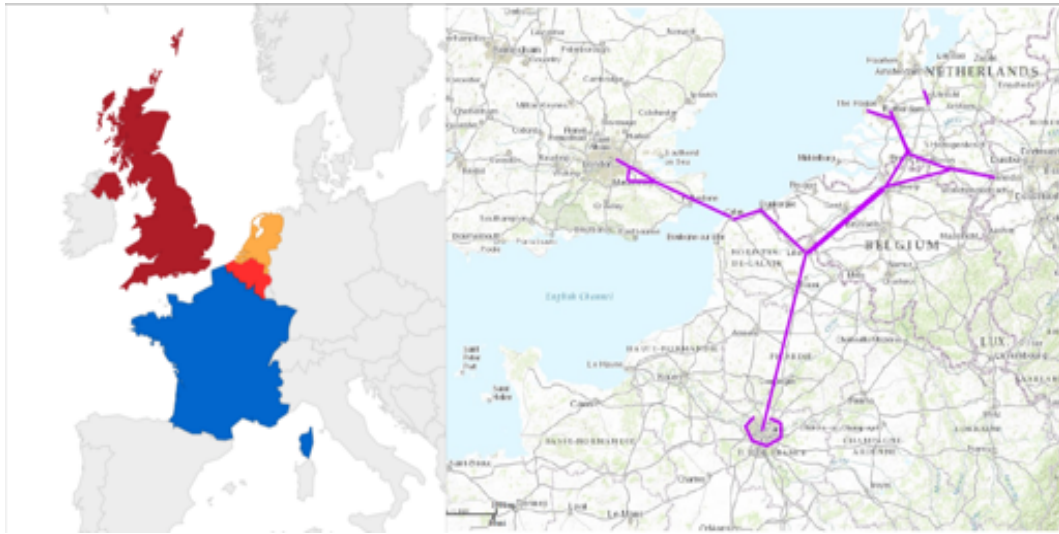


FIGURE 3.2 – les partenaires du projet, et le tracé du corridor prévu.

environnemental, l'optimisation de l'efficacité des transports de personnes et de biens (convois de camions " Truck platooning), l'optimisation des transports multimodaux. Les objectifs techniques du projet INTERCOR sont :

- d'élaborer d'un démonstrateur de déploiement à grande échelle d'un système C-ITS interopérable (FR, NL, B, UK) permettant des transports de biens et de personnes plus sûrs, plus efficaces et plus confortables,
- de favoriser l'interopérabilité transfrontalière sur 4 pays en assurant les tests d'interopérabilité, la sécurité et la fiabilité des données et des transmissions, la continuité de services, d'exploitation et de maintenance,
- de fournir des services C-ITS à large échelle tout en spécifiant, utilisant et favorisant une approche "communication hybride" combinant communications cellulaires et ITS-G5,
- d'assister les autres états membres dans le déploiement de systèmes C-ITS, dans une approche favorisant la performance économique et la pérennité des solutions au travers d'un réseau de corridors cohérent et cohésif,
- d'évaluer au travers de critères communs les bénéfices réels et cumulatifs des applications C-ITS favorisant l'accroissement de la sécurité, de l'efficacité, de la flexibilité et la durabilité des transports routiers afin d'assister et d'inciter les par-

tenaires publics et privés à investir dans les C-ITS.

Les types de messages envisagés sont DENM pour prévenir les usagers de la route des travaux routiers sur leurs itinéraires (RWW - Road Work Warning ), IVI pour informer les conducteurs sur les panneaux routiers statiques et dynamiques (IVS -In Vehicle Signage), CAM pour améliorer l'information sur les conditions de circulation, l'état de la route (et éventuellement de ses environs) et permettre à l'opérateur routier d'améliorer les conditions de circulation, la sécurité et l'environnement (PVB - Probe Vehicle Data), avertissements virtuels DENM pour informer les usagers de la route des incidents qui peuvent entraîner un risque de collision pour le véhicule (CRW - Collision Risk Warning).

Après une phase de test au laboratoire IEMN/DOAE, où les premiers travaux scientifiques ont débuté au cours du dernier trimestre 2016, les installations techniques liées au projet sont actuellement dans la première phase de déploiement d'équipements ITS sur le campus de l'Université de Valenciennes. Une seconde phase de déploiement d'équipements autour du campus sera prochainement entamée (voir dans la partie prospective de la conclusion générale).

date de début : 1 septembre 2016

date de fin : 31 août 2019

### 3.3.3.9 Projet PHC MAGHREB TRANSVERSAL 2019 intitulé UID - RATSr : RFE

Objectif : Le projet entre dans le cadre des communications inter-véhiculaires V2X basées sur les systèmes de transport intelligents ITS, chargés de collecter les informations, de les trier, en retenant les plus pertinentes, pour élaborer une décision. La mise en oeuvre d'un système de transmission intelligent proposée vise à l'amélioration de la communication inter-véhiculaire V2X. Elle comporte deux volets complémentaires.

Un système d'identification faciale et de reconnaissance émotionnelle (identification du conducteur, accès à ses habitudes de conduite ou environnementales dans l'habitacle (lumière, température, position des rétroviseurs, liste de contacts téléphoniques) et de reconnaissance anticipée de la fatigue au volant, de malaises ou de comportements dangereux, devrait permettre d'éviter si possible des accidents. Un système de détection des objets de l'environnement du véhicule permettrait d'identifier les autres véhicules l'entourant, les types d'obstacles rencontrés, les infrastructures routières et

les types de routes.

Le second volet consiste en un système dynamique et réactif d'aide à la transmission basé essentiellement sur une architecture modulaire pour assurer l'indépendance de chaque composant et sur l'analyse des données pour lui conférer un aspect intelligent. Il s'agit d'un système à la croisée entre l'intelligence artificielle et l'aide à la décision, capable d'adapter de manière dynamique la communication inter-véhiculaire basée sur les systèmes ITS aux multiples contraintes de l'environnement, d'identifier le moment optimal pour prendre en charge le système de transmission et de mettre en place une solution hybride (entre technologies ITS V2X d'une part et cellulaires de nouvelle génération 5G full duplex d'autre part).

Partenaires : IEMN / DOAE ; Laboratoire LESIA, Université Mohamed Khider Biskra (Algérie) ; Laboratoire TIM, École Nationale des Sciences Appliquées, Université de Marrakech, Maroc ; PRIMATEC Engineering, Sfax (Tunisie).

#### 3.3.3.10 Projet ELSAT

Le projet ELSAT 2020 Écomobilité, Logistique, Sécurité et Adaptabilité dans les Transports à l'Horizon 2020, se veut un prolongement, plus large et pluridisciplinaire incluant les SHS, par rapport au projet phare du précédent CPER 2007-2013.

Le projet ELSAT 2020 répond aux enjeux posés tant au niveau européen à travers les feuilles de route technologiques dictées par les besoins industriels (ACARE, ERRAC, ERTRAC, JTI Shift2Rail, PPP Green vehicles) ou les programmes de recherche adoptés tel Horizon 2020, qu'aux éléments clés du développement national et régional établis dans le 34 plans de reconquête industrielle, dans les 7 ambitions de la Commission Innovation 2030, dans la SRI-SI et le Master Plan pour la Troisième Révolution Industrielle régionale.

Le projet ELSAT2020 a pour objectif de relever des grands défis sociétaux pour des Transports et une Écomobilité, plus sûrs, plus Intelligents, plus respectueux de l'environnement, plus Intégrés, Personnalisés, Acceptables et Économiquement performants.

Ce projet est soutenu et co-financé par l'Union Européenne avec le Fonds Européen de Développement Régional, par l'Etat et la Région Hauts de France dans le cadre du

CPER 2015-2020. Il est construit autour d'Objectifs Stratégiques majeurs et se déclinent en 22 projets. je participe activement à deux d'entre eux, SECOURT et ORIO, qui font partie de l'OS4

- **SECOURT** : Cyber-Sécurité dans les systèmes COmmUnicants pour les Transports. L'augmentation de nombre d'accidents sur les routes, l'ampleur de leur gravité, les catastrophes naturelles et les actes terroristes dans les transports sont des événements graves qui mettent en danger un très grand nombre des usagers des moyens de transport ainsi que des piétons. Ces situations d'urgence et de crises requièrent une réaction rapide incluant l'enrôlement d'un personnel professionnel, un équipement spécialisé, des ressources matérielles et techniques, rarement disponibles sous la main. Dans le cadre de cette gestion des situations d'urgences et de crises (GSUC), un accent particulier sera mis, dans SECOURT, sur le besoin accru de communiquer l'information entre véhicules et avec l'infrastructure. La sécurisation de ces communications est fondamentale afin qu'elles ne soient pas perturbées intentionnellement et donc rendues inopérantes en situation de crise. La Cyber-sécurité des moyens de transports communicants sera donc abordée afin d'augmenter la sécurité et la fiabilité des systèmes de traitement et de communication des informations dans la GSUC, prenant en compte les risques de cybers attaques tout en rendant possible la détection rapide, robuste et automatique des accidents et de développer de nouveaux outils de communications véhicule à véhicule et véhicule à infrastructure résilients. D'autre part, ce projet a pour vocation d'accompagner des actions nationales ou internationales et à ce titre, une demande de labellisation R5G sera effectuée. Cela permettra d'intégrer des réseaux mêlant organismes de recherche, constructeurs automobile, constructeurs et opérateurs routiers et de diffuser nos résultats auprès de ces autres acteurs.

- **ORIO** : Observation des peRformances des Infrastructures urbaines et de la mobilité / prévention des collisions avec des personnes vulnérables à l'aide de radar Opportunistes.

Ce projet se compose de deux volets : (a) la protection des personnes vulnérables à l'aide de radar opportuniste et (b) l'observation des performances des infrastructures urbaines et de la mobilité

- (a) Protection des personnes vulnérables à l'aide de radar opportuniste Nous proposerons des solutions innovantes pour assurer une bulle de protection autour du véhicule roulant afin d'éviter les zones de non-détection. Pour protéger les usagers les plus vulnérables (piétons, cyclistes), nous réaliserons un système complet optimisé pour l'anticollision et l'alerte. Il exploitera des signaux opportunistes présents dans l'environnement immédiat du véhicule pour la détermination de la nature de la cible et le suivi intelligent d'obstacles. La visibilité des « vulnérables » sera améliorée en utilisant des signaux électromagnétiques, en lien avec l'usage de gilets adaptables ou de modules rigides pour le cycliste et/ou le piéton. Ce projet comparera les technologies existantes et montrera l'apport du système proposé pour une meilleure visibilité du conducteur dans différents contextes.
- (b) Observation des Performances des Infrastructures Urbaines et de la Mobilité Nous définirons des méthodes extrayant de données vidéo et LIDAR les éléments utiles à la construction de modèles et d'indicateurs (flux, détection de collisions, blocages, comportements accentogènes, etc.), dans des conditions très variables. Ces données, complétées par d'autres mesures (radar en particulier), serviront à modéliser les infrastructures de transport et les comportements de leurs usagers. La définition de KPIs significatifs, permettant d'évaluer des propositions d'améliorations des infrastructures au travers de simulations basées sur le concept « d'agents » sera un objectif stratégique. Des algorithmes de compression / décompression intelligentes seront développés pour gérer ce flux de données. ORIO s'appuiera sur la plateforme mobile VLAD qu'il s'agira de construire durant ce projet.

### 3.3.4 Responsabilités et collaborations liées à la recherche

#### 3.3.4.1 Au niveau local et régional

Je suis responsable de la thématique "Transports intelligents - Systèmes de localisation et de communication pour la sécurité" du groupe COMNUM (COMMunications NUMériques) de l'IEMN depuis 2011. Cette thématique regroupe 9 permanents et 8 doctorants. La Région Nord Pas de Calais (devenue Hauts-de-France) est un pôle lea-

der en recherche dans le domaine des transports (pôle de compétitivité Transports I-TRANS). Cette position est renforcée par la création du CISIT (Campus International sur la Sécurité et l'Intermodalité dans les Transports) et par celle d'un IRT (Institut de Recherche Technologique) Railenium. Les organismes de tutelle de notre Département, l'Université de Valenciennes et l'IEMN, mettent l'accent sur cette thématique. J'ai également participé à l'organisation de la deuxième édition de l'École de Printemps du GDR Ondes sur le thème "Systèmes de localisation et continuité de service", les 22 et 23 mars 2012 à Valenciennes.

Depuis avril 2017, je suis co pilote du thème 3 "Réseaux de capteurs, communications embarquées et mobilité" de la La Fédération de Recherche CNRS Transports Terrestres & Mobilité. Ce thème s'inscrit dans des objectifs de conception de nouveaux services mobiles pour les transports, sur de nouvelles architectures multi-capteurs embarquées et utilisant des systèmes communicants (ITS-G5, 3G/4G/5G, ...) et de conception de nouveaux systèmes d'aide à la conduite (ADAS), Intelligence embarquée pour le véhicule autonome. L'originalité du thème

- Nouveaux paradigmes pour la collecte, le traitement et l'exploitation des données
- Approche multi-niveaux pour l'amélioration de la sécurité du véhicule connecté et de sa fiabilité (tolérance aux fautes)

Les impacts scientifiques

- Développement de nouvelles applications et d'architectures
- Traitement de grande quantités d'information (Big Data) : grand nombre de capteurs
- Ressources adaptées à la position du véhicule et aux besoins des applications et des services
- Mise en œuvre de nouvelles architectures de communication embarquées et sécurisées

Au niveau de l'IEMN/DOAE, je suis responsable du projet transversal PREDICTION (développement d'un Réseau De capteurs sans fil pour le Contrôle continu des éléments de l'Infrastructure des transports ferroviaires innovants). Le but de ce projet



est de faire collaborer les membres des différents axes de recherche de notre Département afin de construire des démonstrateurs pour accroître notre visibilité.

Je suis également co-responsable de la plateforme d'investissement SYFRA "Systèmes de Sécurité pour les Voitures Autonomes" (budget annuel de 443 706 euros) financé par le CPER-CISIT (International Campus on Safety and Intermodality In Transportation). La plateforme est constituée de systèmes embarqués sur des véhicules de test offrant des services de communication, de localisation et d'aide à la conduite pour une meilleure sécurité. Elle émane d'un ensemble de réflexions d'un groupe d'enseignants-chercheurs afin de promouvoir le domaine des transports intelligents à la fois en recherche et en enseignement dans la région et de fédérer plusieurs actions collaboratives et pédagogiques dans ce domaine. Cette plateforme est dédiée au développement des systèmes embarqués selon trois volets d'investigation : Recherche, Formation et Transfert de technologie. Je suis aussi responsable de la plateforme de mesure ULB, permettant d'effectuer des mesures dans des conditions réelles. Plusieurs de nos partenaires ont été ou sont intéressés pour tester leurs techniques ou leurs algorithmes (par exemple IFSTART LEOST, IETR de Rennes, Télécoms Bretagne, **London South Bank University, Université La Sapienza de Rome ...**).

#### 3.3.4.2 Au niveau national

Au niveau national, je collabore activement avec plusieurs laboratoires de recherche (IFSTTAR-LEOST, Télécoms Bretagne, INRIA, INPG).

Je me suis très fortement impliqué dans 3 actions de recherche du programme CPER-CISIT 2008-2013 SYMSEO COLOR, dont le budget annuel est de 300 k euros depuis 2008. J'ai contribué au montage scientifique et financier du projet IEMN "New Balise", dont je suis le responsable scientifique, labelisé par le pôle de compétitivité ITRANS et financé par le FUI (Fonds Universitaire Interministériel). J'ai aussi effectué le montage technique et scientifique du projet "CUB4" de l'IEMN-DOAE dans le cadre de l'ANR. Je suis interlocuteur et responsable scientifique côté IEMN pour le projet ANR "CYCLOPE" (Protection électronique pour les cyclistes), démarré en janvier 2015, labellisé par les pôles de compétitivité I-TRANS et MoVéo (pôle automobile et mobilité).

J'ai répondu à une interview pour l'émission Enquêtes de Région sur France 3, diffusée le 2 novembre 2016 sous le titre "Ferroviaire, fluvial, routier, aérien, quel avenir pour

les transports dans les Hauts de France".

### 3.3.4.3 Au niveau international

#### • Collaborations

Au niveau international, je collabore avec divers groupes de recherche.

Aux USA, notre principale collaboration implique le Centre des Systèmes Embarqués (CECS) de l'Université de Californie Irvine (UCI) sur le thème de la robustesse et de la fiabilité des calculateurs embarqués dans les systèmes de reconnaissance d'obstacles ainsi que sur les systèmes de communication. Les retombées de cette collaboration sont l'échange d'une doctorante en 2018 (Selima Sahraoui sur les "Nouveaux systèmes de communications V2V basés sur la 5G, Anthony Lopez travaille sur la génération de clé de chiffrement pour les communications intervéhiculaire) et plusieurs publications en commun en cours.

En outre, un protocole de collaboration en enseignement et recherche a été signé en décembre 2015 entre l'UCI et l'UVHC, complété par un accord inter-institutionnel pour la période 2016-2020, signé en septembre 2016, permettant les échanges d'étudiants de niveau Master en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC). Un programme de coopération et d'échanges ERASMUS+ est en cours (2017-2019).

En Europe quelques collaborations avec la Grande-Bretagne et une plus importante avec l'Université La Sapienza de Rome (Italie) sur le thème de la radio cognitive et du retournement temporel ULB, dont les retombées sont l'échange de doctorants, la réalisation de campagnes de mesures et d'essais de transmission ULB communs en 2013, ainsi que des publications en commun.

En Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie), une forte collaboration en recherche et pédagogie a été développée avec l'École Nationale des Sciences Appliquées de Marrakech (ENSA) et la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech (FSSM) - Université Cadi Ayyad. Outre l'élaboration de cours de Master communs, les retombées concernent l'encadrement et l'échange de doctorants ainsi que plusieurs publications en commun.

La collaboration avec le Laboratoire Electronic and Technology Information Laboratory (LETI) de l'Université de Sfax en Tunisie concerne la thématique d'optimisation, avec comme retombées l'encadrement d'un doctorant et plusieurs publications en commun. Enfin, quelques collaborations ont été établies avec l'Université d'Annaba (Algérie) et l'École Nationale des Sciences Appliquées de Khouribga (Maroc).

D'autre part, je suis responsable du LIA Capteurs et Télécommunications pour les transports intelligents et leur sécurité (CapTTIS) impliquant notre laboratoire et 4 laboratoires marocains associés au CNRST. Les principaux laboratoires impliqués sont, le DOAE-IEMN, le Laboratoire TIM (de l'ENSA/Université Caddi Ayad de Marrakech, Maroc), l'ENSA de Fez, le LRIT (de l'Université Rabat Agdal, Maroc) et l'Université Chouaib Doukkali (El Jadida, Maroc). Je suis actuellement le responsable du thème Capteurs et Télécommunication pour les Transports Intelligents et leur Sécurité de ce LIA.

- **Comités de congrès :**

Enfin, je suis impliqué dans les comités de plusieurs congrès internationaux comme DSD (Euromicro Conference on Digital System Design) 2016 et 2017, ASAIT (Architectures and Systems for Automotive and Intelligent Transportation) 2016. J'ai été président de séance d'une session spéciale ITS au congrès IESM 2013 (parue dans IEEEExplore). J'ai rapporté sur plusieurs articles proposés aux revues internationales IJCS (International Journal on Communication Systems), EURASIP, Sensors, TRC et dans des conférences internationales (ITST, MSLT, ISIVC, ICTTA). J'ai participé à l'organisation de la première édition d'une École d'Hiver du 02 au 04 mars 2013 à Marrakech sur le thème "Techniques Avancées pour les Systèmes de Localisation Indoor et Outdoor et Nouvelles Applications". J'ai également co-encadré des thèses internationales (ENIT avec le Pr. L. Kamoune, ENSA Marrakech avec le Pr. K. Elbaamrani).

Enfin, on peut citer ma participation et ma contribution au montage du projet ARCUS "Environnement, Énergie, Développement Durable" (E2D2) Liban, Maroc, Palestine. Ce projet a été accepté pour un financement dans le cadre du 7ème AAP ARCUS

#### 3.3.4.4 Valorisation

Je travaille actuellement avec **VINCI Autoroutes** sur l'implémentation et l'optimisation des algorithmes d'intelligence artificielle sur une plateforme hétérogène comportant CPU et plusieurs GPUS (depuis juillet 2018).

J'ai participé au projet d'industrialisation d'une solution de contrôle non destructif sans fil et sans contact dans le domaine médical avec l'entreprise Clariance en 2016.

J'ai travaillé avec la société WayKonect dans le cadre des transports intelligents pour extraire plus d'informations comportementales sur la conduite d'un utilisateur en exploitant les données recueillies par les capteurs de la plateforme Syfra.

Je collabore enfin avec Airbus Hélicoptère dans le cadre des systèmes embarqués. Cette collaboration concerne le Hardware-Software Co-design (sujet de thèse CIFRE de Mr Pertuisot).

### 3.4 Plateformes

Durant mes activités de recherche, nous avons développé des plateformes expérimentales pour réaliser nos expérimentations. Ces plateformes servent à valider nos développements théoriques, nos simulations et à présenter des Preuves de concept (Proof of concept). Ces plateformes renforcent la visibilité de notre laboratoire et nous ouvrent des perspectives de collaborations nationales et internationales.

- **UWB**

La première est la plateforme de mesure ULB, dont j'ai pris la responsabilité, permet d'effectuer des mesures dans des conditions réelles. Elle correspond à un investissement supérieur à 400 k€. Elle est constituée d'éléments qui facilitent la construction d'une chaîne de transmission complète. Elle inclut plusieurs oscilloscopes et générateurs arbitraires antennes et amplificateurs très large bande. Plusieurs de nos partenaires sont intéressés pour tester leurs techniques ou leurs algorithmes par exemple (IFSTART LEOST, IETR de Rennes, Télécoms Bretagne, London South Bank University, Université La Sapienza de Rome). Nous mettons cette plateforme au service des enseignements spécifiques ou des projets de nos étudiants en masters.

- **Syfra**



FIGURE 3.3 – Quelques équipements de la plateforme UWB

La deuxième est la plateforme d'investissement PISM SYFRA ( SYstem For smart Road Application) budget : 440 k€ financé par CPER-CISIT (International Campus on Safety and Intermodality In Transportation) dont je suis coresponsable. La plateforme prend la forme d'une voiture intelligente dans son environnement intelligent. Le véhicule embarque des capteurs de perception de l'environnement ainsi que des systèmes embarqués offrant des services de communication, de localisation et d'aide à la conduite. Le parking est équipé de capteurs et des systèmes de communication et localisation dédiés. Notre but est de promouvoir le domaine des transports intelligents à la fois en recherche et en enseignement dans la région et de fédérer plusieurs actions collaboratives et pédagogiques dans ce domaine. Cette plateforme est dédiée au développement des systèmes embarqués selon trois volets d'investigation : Recherche, Formation et Transfert de technologie.

#### • ITS-COM

La dernière est la plateforme ITS-COM (Intelligent transportation system communication) budget : 400 k€ financement hétérogène. Notre but est d'établir une couverture Hybrid 4G et ITS-G5. Une première partie des équipements ITS-G5 couvrira la bretelle d'autoroute ainsi que la route départementale menant à l'université, et la deuxième partie sera déployée tout au long du Campus du Mont Houy pour assurer une couverture optimale. Cette plateforme fonctionnera en tandem avec la nouvelle piste de



FIGURE 3.4 – photo de la plateforme Syfra

test automobile qui sera hébergée dans notre université. J'ai activement participé au dimensionnement de cette piste ainsi que son montage (budget 3,5 M€, lancement des travaux est prévu en janvier 2019).

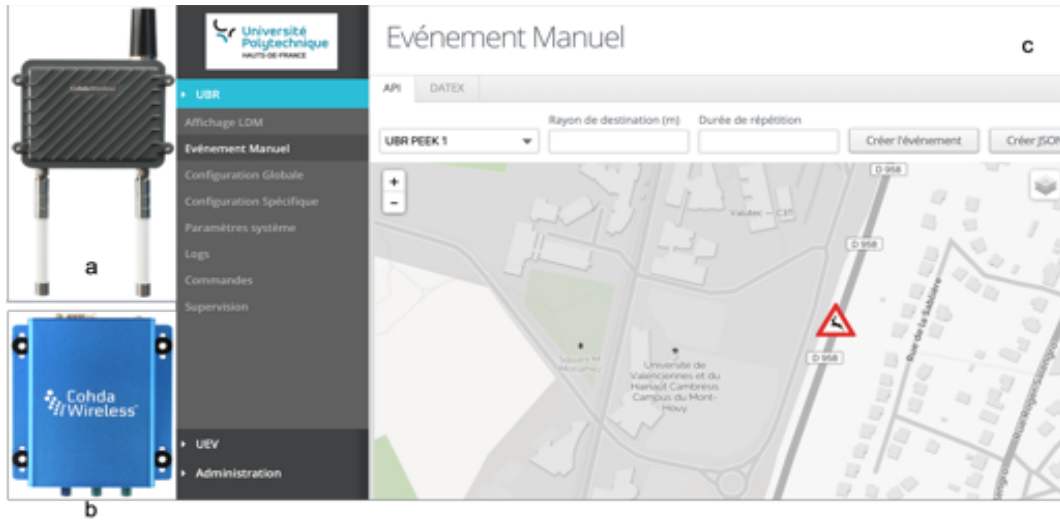


FIGURE 3.5 – a :RSU ; b :OBU ; c :l'interface de gestion de la plateforme ITS-COM



FIGURE 3.6 – Plan de déploiement des RSU sur le campus et sur la voie publique.

## 3.5 Publications et production scientifique

### 3.5.1 Articles dans une revue internationale avec comité de lecture

- 1 R. Sadli, C. Tatkeu, K. Hamidoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, *UWB radar recognition system based on HOS and SVMs*, **The Institution of Engineering and Technology Sonar & Navigation**, ( IET Radar, Sonar & Navigation), Volume 12, Issue 10, p. 1137 - 1145, October 2018.
- 2 F. SALEM, **Y. Elhillali**, S. NIAR, *Efficient modeling of IEEE 802.11p MAC output process for V2X interworking enhancement*, **The Institution of Engineering and Technology Networks**, (IET Networks), Volume 7, Issue 4, p. 210 - 219, July 2018.
- 3 K. Hamidoun, R. Sadli, **Y. Elhillali**, R. Ellassali, A. Rivenq-Menhaj, K. Elbaamrani, *Implementation of a new IR-UWB system based on M-OAM modulation on FPGA component*, **International Journal of Wireless & Mobile Networks**, (IJWMN), vol. 10(2), April 2018.
- 4 A. Sassi, **Y. Elhillali**, F. Charfi, *Evaluating experimental measurements of the IEEE 802.11p communication using ARADA LocoMate OBU device compared to the theoretical simulation results*, **Wirel. Pers. Commun.**, vol. 97(3), p. 3861–3874, 2017.
- 5 J. Zaidouni, A. Rivenq-Menhaj, K. Ghoumid, S. Mekaoui, A. El-Moussati, **Y. Elhillali**, *Improving ROCs of constant false alarm coded anti-collision radar in very noised cases*, **Int. J. Electron. Telecommun.**, vol. 63(2), p. 127–135, 2017.
- 6 R. Ellassali, K. Hamidoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, F. Elbahhar, K. Elbaamrani, L. Maatougui, *Performance evaluation of high data rate M-OAM UWB physical layer for intelligent transportation systems*, **Wirel. Pers. Commun.**, vol.94(4), p. 3265–3283, 2017.
- 7 N. Touati, C. Tatkeu, A. Rivenq-Menhaj, T. Chonavel, **Y. Elhillali**, *Multi-user radar waveforms based on doubly coded Costas signals*, **IET Radar Sonar Navig.**, vol. 11(2), p. 277–284, 2017.
- 8 A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, R. Ellassali, **Y. Elhillali**, *DS-UWB and TH-UWB energy consumption comparison*, **J. Telecomm. Inf. Technol.**, vol.1, p. 101–109, 2016



- 9 A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, R. Ellassali, **Y. Elhillali**, *Energy efficiency analysis of a TR-UWB system*, **J. Comput. Sci.** vol. 12(1), p. 19–30, 2016.
- 10 A. Sassi, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, F. Charfi, L. Kamoun, *Enhancing V2X communication based on a new comb-pilot estimation approach*, **Int. J. Veh. Technol.**, Hindawi, article ID 8341490, 14 pages (available online : <http://www.hindawi.com/journals/ijvt/aip/8341490>, 2016.
- 11 L. Sadoudi, E. Moulin, J. Assaad, F. Benmeddour, M. Bocquet, **Y. Elhillali**, *Experimental study of acoustic noise correlation technique for passive monitoring of rails*, **Mat. Sci. Appl.**, vol. 7(12), p. 848–862, 2016.
- 12 K. Hamidoun, R. Ellassali, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, K. Elbaamrani, F. Boukour, *A new multi-user ultra wide band system based on modified Gegenbauer functions and M-OAM modulation for communication of intelligent transportation systems*, **Wirel. Pers. Commun**, vol. 82(4), p. 2115–2134, 2015.
- 13 I. Kossonou, **Y. Elhillali**, M. Bocquet, A. Rivenq-Menhaj, J. Assaad, *Non-iterative three dimensional positioning algorithm based on time difference of arrival technique*, **International Journal of Computer Science Issues**, (IJCSI), vol. 11(2), p. 19–29, 2014.
- 14 T. Tahri, **Y. Elhillali**, L. Sakkila, A. Rivenq-Menhaj, *UWB cooperative radar for localization and communication dedicated to guided transport*, **Int. J. Intell. Syst. Appl.**, vol. 6(10), p. 27-33, 2014
- 15 A. Elabed, F. Elbahhar, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, R. Ellassali, *UWB Communication System Based on Bipolar PPM with Orthogonal Waveforms*, **Wireless Engineering and Technology**, vol. 3(3), Article ID :21474, 8 pages, 2012.
- 16 A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, *OFDM transmission performance evaluation in V2X communication*, **International Journal of Computer Science Issues**, IJCSI Press, vol. 9, p 141–148, 2012.
- 17 H. LIU, S. Niar, **Y. Elhillali**, A. RIVENQ-MENHAJ, *Embedded Architecture with Hardware Accelerator for Target Recognition in Driver Assistance Systems.*, **ACM SIGARCH Computer Architecture News**, (ACM CAN), ISSN 0-89791-534-8, 2011.
- 18 **Y. Elhillali**, C. Tatkeu, P. Deloof, L. Sakkila, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Enhanced*

- high data rate communication system using embedded cooperative radar for intelligent transports systems*, **Transport. Res. Part C : Emerging Technol.**, vol. 18(3), p. 429-439, 2010
- 19 J. Khan, S. Niar, M. Saghir, **Y. Elhillali**, A. Menhaj-Rivenq, *Trade-off exploration for target tracking application in a customized multiprocessor architecture*, **EURASIP J. Embedded Systems**, paper 175043, p. 1–21, 2009.
  - 20 **Y. Elhillali**, C. Tatkeu, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, J.P. Ghys, *Location and communication using cooperative radar system dedicated to guided transports*, **Transport. Res. Part C : Emerging Technol.**, vol. 16(2), p. 141–152, 2008.
  - 21 **Y. Elhillali**, A. Rivenq, C. Tatkeu, J.M. Rouvaen, J.P. Ghys, *Embedded localization and communication system designed for intelligent guided transports*, **Eurasip Journal of Embedded Systems**, art. no. 79095, p. 1–8, 2007.
  - 22 L. Sakkila, P. Deloof, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, S. Niar, *A real time signal processing for an anticollision road radar system*, **IEEE Intelligent Transportation Systems Newsletter**, vol. 9, p. 19–23, March 2007.
  - 23 B. El-Khalidi, J.M. Rouvaen, A. Rivenq, **Y. Elhillali**, *Averaging and oversampling correlator receiver with input quantization*, **Digital Signal Processing**, vol. 16(2), p. 120–136, 2006.

### 3.5.2 Conférences internationales avec comité de lecture et actes

- 1 F. Salem, **Y. Elhillali**, S. Niar, *QoS-based Sequential Detection Algorithm for Jamming Attacks in VANET*, **Future Network Systems and Security** , (FNSS 2018), Paris, France, juillet. 2018.
- 2 F. Salem, **Y. Elhillali**, S. Niar, *Stochastic modeling of IEEE 802.11p MAC output process for V2X interworking enhancement*, **2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology**, (SCVT 2017), DOI10.1109/SCVT.2017.8240315, Nov. 2017.
- 3 F. Salem, **Y. Elhillali**, S. Niar, *User Model-Based Method for IEEE 802.11p Performance Evaluation in Vehicular Safety Applications*, **2017 IEEE International Confe-**

- rence on Vehicular Electronics and Safety Vienna, Austria, p. 63–68, 2017.
- 4 R. Sadli, L. Maatougui, **Y. Elhillali**, C. Tatkeu, A. Rivenq, *Implementation of the 4th Order High Order Statistics (HOS) Based on FPGA for an UWB Short-Range Radar Receiver*, **TELECOM'2017 & JFMMA 10**, 11, Rabat, Maroc, May 2017.
  - 5 R. Sadli, **Y. Elhillali**, L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, *The 4th Order Statistics on Ultra Wideband Short-Range Radar (UWB-SRR) for Cyclist Detection*, **3rd Annual International Conference on Transportation**, Athens, Greece, June 2017.
  - 6 I. Alouani, S Niar, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, *Auto-tuning fault tolerance technique for DSP-based circuits in transportation systems*, **1st Workshop on Resource Awareness and Application Autotuning in Adaptive and Heterogeneous Computing, RES4ANT 2016**, Dresden, Germany, march 14-16, CEUR Workshop Proc. 1643, p. 33–37, 2016.
  - 7 F. Elbahhar, A. Elabboubi, M. Heddebaut, **Y. Elhillali**, *An energy efficiency modulation comparative study in AWGN channel with path-loss*, **Proceedings of 2nd International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2016**, Marrakech, Morocco, october 26-28, paper ID171, 2016.
  - 8 L. Maatougui, K. Hamidoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, A. Hajjaji, H. Ouamane, *An autonomous IR-UWB receiver applied for intelligent transportation system*, **Proceedings of 2nd International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2016**, Marrakech, Morocco, october 26-28, 2016, paper ID373, 2016.
  - 9 M. Ouadou, O. Zytoune, D. Aboutadjine, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, *Cluster-tree topology adapted for indoor environment in Zigbee sensor network*, **11th International Conference on Future Networks and Communications, FNC 2016**, Montreal, QC, Canada, August, Session S-2 - Topological Aggregation Procedia, published in Comput. Sci. vol. 94, p. 272–279, 2016
  - 10 G. Pertuisot, N. Belanger, **Y. Elhillali**, A.M. Eltawil, F.J. Kurdahi, S. Niar, *A co-design space exploration tool for avionic high performance heterogeneous embedded architectures*, **2016 11th International Design & Test Symposium, (IDT)**, p. 77–82, 2016.

- 11 A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, *A bayesian network based estimation technique for IEEE 802.11P vehicular communication systems*, **Proceedings of 12th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference**, IWCMC 2016, Paphos, Cyprus, september 5-9, p. 806–811, 2016.
- 12 I. Alouani, **Y. Elhillali**, S Niar, A. Rivenq, *Modeling Transistor Level Masking of Soft Errors in Combinational Circuits*, **IEEE East- West Design and Test Symposium**, EWDTs, 2015.
- 13 L. Maatougui, K. Hamidoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, A. Hajjaji, H. Ouahmane, *IR-UWB cognitive radio system based on the M-OAM modulations*, **2nd International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems**, WITS 2015, Fez, Morocco, april 29-30, 2015, session COD - Information Coding and Transmission, paper COD-6, *Mediterr. Telecomm. J.* vol. 5(2), p. 98–103, 2015.
- 14 L. Maatougui, K. Hamidoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, A. Hajjaji, H. Ouahmane, *Intelligent receiver for M-OAM IR-UWB modulations system*, **Proceedings of 4th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport**, IEEE ICALT 2015, Valenciennes, France, may 20-22, Session #LSCM - Logistics & Supply Chain Management LSCM II, paper LSCM34, p. 111–115, 2015.
- 15 L. Maatougui, H. Ouahmane, A. Hajjaji, K. Hamidoun, A. Rivenq-Menhaj, **Y. Elhillali**, *Spectrum sensing applied to IR-UWB system based on M-OAM*, **Proceedings of 3rd World Conference on Complex Systems**, WCCS 2015, Marrakech, Morocco, 6 pages, e-ISBN 978-1-4673-9669, November 2015.
- 16 M. Ouadou, O. Zytoune, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, D. Aboutadjine, *Minimum spanning tree topology in real Zigbee-Arduino sensor network*, **Proceedings of 7th EAI International Conference on Ad Hoc Networks**, AdHocNets 2015, San Remo, Italy, september 1-2, p. 57–68, 2015.
- 17 A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, *Experimental measurement for vehicular communication evaluation using OBU ARADA system*, **Proceedings of 11th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference**, IWCMC 2015, Dubrovnik, Croatia, august 24-28, 2015, p. 1358-1364, 2015
- 18 A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, **Y. Elhillali**, *An energy efficiency modula-*

- tion comparative study for a railway beacon*, **Proceedings of 7th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, ISIVC 2014, Marrakech, Morocco, november 19-22 session on Intelligent Transport System, paper 30, 4 pages, e-ISBN 978-1-4244-5997-1, 2014.
- 19 A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, **Y. Elhillali**, *Comparison of UWB modulations over Nakagami-m fading channels with path-loss for an energy efficient railway beacon application*, **Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Ultra-Wideband**, ICUWB 2014, Paris, France, september 1-3, 2014, session S18 - Special Session on Transport Systems, p. 427-432, 2014.
- 20 K. Hamidoun, R. Ellassali, **Y. Elhillali**, K. Elbaamrani, A. Rivenq-Menhaj, F. Boukour, *UWB M-OAM architecture for intelligent transportation system*, **Proceedings of 7th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, ISIVC 2014, Marrakech, Morocco, november 19-22, session on Intelligent Transport System, paper 32, 5 pages, e-ISBN 978-1-4244-5997-1, 2014.
- 21 K. Hamidoun, R. Ellassali, **Y. Elhillali**, K. Elbaamrani, A. Rivenq-Menhaj, F. Boukour, *UWB System Based on the M-OAM Modulation in IEEE.802.15.3a Channel*, **Doctoral conference on Computing Electrical and Industrial Systems 2014**, Springer, p. 507-514, 2014.
- 22 I. Kossonou, **Y. Elhillali**, M. Bocquet, A. Rivenq-Menhaj, J. Assaad, *Direct path detection algorithm in multiple input single output configuration for transport applications*, **Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Ultra-Wideband**, ICUWB 2014, Paris, France, september 1-3, session S18 - Special Session on Transport Systems, p. 438-443, 2014.
- 23 L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, **Y. Elhillali**, J-P. Ghys, *Performances of Micropower UWB Radar Using Orthogonal Waveforms*, **Wireless Engineering and Technology**, vol. 5(3), p. 74-87, 2014.
- 24 N. Touati, C. Tatkeu, A. Rivenq, A. Chonavel, **Y. Elhillali**, *Pulse compression waveforms design and cross-ambiguity processing for radar applications*, **Proceedings of 7th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, ISIVC 2014, Marrakech, Morocco, session on Intelligent Transport Systems, paper 31, 4 pages, e-ISBN 978-1-4244-5997-1 , 2014.

- 25 N. Touati, C. Tatkeu, A. Rivenq, A. Chonavel, **Y. Elhillali**, *Multiuser phase coded Costas signals with improved cross-correlation and partial cross-ambiguity properties*, **International Radar Conference 2014**, october, p. 1–6, 2014.
- 26 A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, **Y. Elhillali**, "A Comparison of energy efficiency for UWB modulations", **Proceedings of 4th Workshop of COST Action IC0902, Cognitive Radio and Networking for Cooperative Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks**, Rome, Italy, october 9-11, 2 pages, 2013.
- 27 G.C. Ferrante, **Y. Elhillali**, M.G. Di Benedetto, F. Boukour, A. Rivenq-Menhaj, *Experimental acquisition of UWB channel impulse responses*, **Proceedings of 4th Workshop of COST Action IC0902, Cognitive Radio and Networking for Cooperative Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks**, Rome, Italy, October 2013, Session #2 - WG1, 3 pages, 2013.
- 28 K. Hamidoun, R. Ellassali, **Y. Elhillali**, F. Elbahhar, A. Rivenq, *New Adaptive Architectures of Coding and Modulation UWB for infrastructure-vehicle communication*, **ISVIC**, Valenciennes, 4-6 Juillet 2012.
- 29 T. Tahri, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, *UWB cooperative radar for location and communication dedicated to railway transport*, **Proceedings of 6th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, ISIVC 2012, Valenciennes, France, paper ID 42, p. 263-266, July 2012.
- 30 A. Elabed, **Y. Elhillali**, R. Ellassali, F. Boukour, A. Rivenq, *Novel coding techniques dedicated to UWB for V2V communication System*, **Proceedings of First International Conference on Mobility, Security, and Logistics in Transport**, MSLT 2011, Hammamet, Tunisia, may 31-june 3, 2011.
- 31 N. HARB, S. NIAR, M. Saghir, **Y. Elhillali**, R. BEN ATITALLAH, *Dynamically Reconfigurable Architecture for a Driver Assistant System*, **IEEE Symposium on Application Specific Processor**, SASP 2011, San Diego, California, USA, juin 2011.
- 32 A. Elabed, F. Boukour, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, *Bipolar PPM coding for asynchronous multi-users UWB communications*, **2nd World Congress on Computer Science and Information Engineering**, CSIE 2011, June 2011, Changchun, China, 2011.
- 33 I. Kossonou, **Y. Elhillali**, M. Bocquet, J. Assaad, A. Rivenq, I. Doumbia, *Three-*

- dimension localization method based on time difference of arrival for ultra wide band*, **Proceedings of 2nd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation**, IPIN 2011, Guimarães, Portugal, september 21-23, pp.1–4, 2011.
- 34 I. Kossonou, **Y. Elhillali**, M. Bocquet, J. Assaad, A. Rivenq, I. Doumbia, *Optimisation of three-dimensional hyperbolic location method*, **Proceedings of First International Conference on Mobility, Security, and Logistics in Transport**, MSLT 2011, Hammamet, Tunisia, may 31-june 3, 2011.
- 35 A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, *The impact of mobility on the performance of V2X communication*, **Proceedings of 4th International Conference on Logistics**, LOGISTIQUA 2011, Hammamet, Tunisia, may 31-june 3, p. 434-438, 2011.
- 36 H. LIU, S. Niar, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, *Heterogeneous Embedded Architecture for Target Recognition in a Driver Assistant System*, **2nd International Workshop on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies**, HEART 2011, London, juin 2011.
- 37 L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, **Y. Elhillali**, J.-P. Ghys, J.M. Rouvaen, *Methods of target recognition for UWB radar*, **IEEE Intelligent Vehicles Symposium**, p. 949–954, 2010.
- 38 L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, **Y. Elhillali**, F. Boukour, J.M. Rouvaen, *Comparison of classical and orthogonal UWB waveforms for radar applications*, **Proceedings of 6th International Colloquium on Signal Processing & its Applications**, CSPA 2010, Malacca, Malaysia, p. 1–5, May 2010.
- 39 **Y. Elhillali**, R. Ellassali, F. Boukour, A. Elabed, A. Rivenq, *Comparison of two coding techniques dedicated to UWB V2V communication system*, **Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications**, ITST 2009, Lille, France, october 20-22, p. 673–676, 2009.
- 40 L. Sakkila, A. Rivenq, F. Boukour, C. Tatkeu, **Y. Elhillali**, J.M. Rouvaen, *Collision avoidance radar system using UWB waveforms signature for road applications*, **Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications**, ITST 2009, Lille, France, October 2009, p. 223-226, 2009.

- 41 I.R. Quadri, **Y. Elhillali**, S. Meftali, J.L. Dekeyser, *Model based design flow for implementing an anti-collision radar system*, **Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications**, ITST 2009, Lille, France, p. 604–608, October 2009.
- 42 2009 : L. Sakkila, ,Y. Zaidouni, A. Rivenq, F. Boukour, C. Tatkeu, **Y. Elhillali**, J.M. Rouvan, *High order statistic receiver applied to UWB radar*, **Proceedings of the 2009 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing PacRim 2009**, Victoria, Canada, august 23-26, p. 643-647, 2009.
- 43 J. Khan, S. Niar, A. Rivenq-Menhaj, **Y. Elhillali**, *Radar Based Collision Avoidance System Implementation in a Reconfigurable MPSoC*, **9th International Conference on Intelligent Transportation System & Telecommunications**, ITST 2009, Lille, septembre. 2009.
- 44 J. Khan, S. Niar, M. Saghir, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, *Driver assistance system design and its optimization for FPGA based MPSoC*, **Proceedings of the 7th IEEE Symposium on Application Specific Processors**, SASP 2009, San Francisco, CA, USA, p. 27–28, July 2009.
- 45 L. Sakkila, C. Tatkeu, F. Boukour, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *UWB Radar system for road anti-collision application*, **Information and Communication Technologies : From Theory to Applications ICTTA 2008**, p. 1-6, 2008.
- 46 L. Sakkila, **Y. Elhillali**, F. Boukour, A. Rivenq, C. Tatkeu, J.M. Rouvaen, *Multi-users UWB inter vehicles communication system using MGF and DS-CDMA*, **10th International Conf. on Applications of Advanced Technologies in Transportation**, AATT 2008, ID 287, 2008.
- 47 C. Tatkeu, F. Boukour, L. Sakkila, **Y. Elhillali**, P. Deloof, A. Rivenq, J.P. Ghys, *Radar system for collision avoidance and target detection in confined areas and subway environment*, **Proceedings of the 2nd International Conference on Wireless Communications in Underground and Confined Areas**, ICWCUCA 2008, Val-d’Or, Québec, Canada, august 25-27, 1-2, [http :/ /www.icwcuca.ca/documents/CharlesTatkeuok\\_000](http://www.icwcuca.ca/documents/CharlesTatkeuok_000), 2008.
- 48 J. Khan, S. Niar, A. Rivenq-Menhaj, **Y. Elhillali**, *Multiple Target Tracking System Design for Driver Assistance Application*, **Design & Architectures for Signal and**



- Image processing**, Brussels, Belgium, pp. 8, novembre 2008.
- 49 J. Khan, S. Niar, A. Rivenq-Menhaj , **Y. Elhillali**, *FPGA Implementation of an MP-SoC for Driver Assistance System Based on Multiple Target Tracking with Radar*, **34th Euromicro SEAA Conference 2008**, SEAA 2008, Parma, Italie, septembre 2008.
- 50 J. Khan, S. Niar, **Y. Elhillali**, A. Rivenq-Menhaj, J. DEKEYSER, *An MPSoC Architecture for the Multiple Target Tracking Application in Driver Assistant System*, **19th IEEE International Conference Application-specific Systems, Architectures and Processors**, ASAP 2008, Leuven, Belgium, juillet 2008.
- 51 L. Sakkila, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Short range automotive radar based on UWB pseudo-random coding*, **International Conf. on Intelligent Transportation Systems and Telecommunications ITST-07**, p. 1–6, 2007.
- 52 **Y. Elhillali**, C. Tatkeu, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *A novel multiplexing method for high data rate communication systems*, **IEEE Vehicular Technology Conf.**, VT-2006, art. 4109876, 2970-2973, 2006.
- 53 J. Khan, **Y. Elhillali**, S.Niar, A. Rivenq-Menhaj, *A low Speed Digital Correlator Architecture Optimized For Resource Savings*, **Reconfigurable Communication-centric SoCs**, RECOSoC 2006, MONTPELLIER (Fr), juillet 2009.
- 54 C. Tatkeu, P. Deloof, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *A cooperative radar system for collision avoidance and communication between vehicles*, **IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems ITSC 2006**, art. 1707354, p. 1012-1016, 2006.
- 55 **Y. Elhillali**, C. Tatkeu, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Implementation of a localization and communication system dedicated to guided transports*, **Conf. on Intelligent Transport System Telecommunications**, ITST 2005, Brest 27-29 june 2005.
- 56 C. Tatkeu, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Evaluation of coding methods for the development of a radar sensor for location and communication dedicated to guided transports*, **IEEE Vehicular Technology Conf.**, vol. 60(3), p. 395–402, 2004.

### 3.5.3 Article dans une revue nationale avec comité de lecture

1. C. Tatkeu, Y. Elhillali, P.G. Deloof, A. Rivenq-Menhaj, *Système de communication et de localisation basé sur un radar coopératif à corrélation pour les transports guidés urbains*, **RTS Recherche Transports Sécurité**, vol. 24, p. 97–113, 2007.

### 3.5.4 Communications Nationales avec actes

- 1 R. Sadli, L. Maatougi, Y. Elhillali, C. Tatkeu, A. Rivenq, *Implementation of the 4th order high order statistics (HOS) based on FPGA for an UWB shortrange radar receiver*, **Actes de TELECOM'2017, 10èmes Journées Franco-Maghrébines des Micro-ondes et leurs Applications**, Rabat, Maroc, session D - Signaux & Images, papier D.4, 4 pages, mai 2017.
- 2 L. Sadoudi, M. Bocquet, E. Moulin, Y. Elhillali, F. Benmeddour, J. Assaad, *Contribution au développement d'un réseau sans fil pour le contrôle santé intégré (CSI) des structures*, **Actes des 17èmes Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-Nanoélectronique**, JNRDM 2014, Villeneuve d'Ascq, France, 4 pages, mai 2014.
- 3 L. Sadoudi, M. Bocquet, E. Moulin, Y. Elhillali, F. Benmeddour, J. Assaad, F. Benmeddour, *Contribution au développement d'un réseau sans fil pour le contrôle santé intégré (CSI) des structures*, **Actes des 17èmes Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-Nanoélectronique**, JNRDM 2014, Villeneuve d'Ascq, France, 4 pages, mai 2014.
- 4 K. Hamidoun, R. Ellassali, K. Elbaarani, Y. ELHillali, F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, *Comparaison entre les formes d'onde Gegenbauer et Hermite dans un système IR-ULB synchrone et asynchrone basé sur les modulations M-OAM*, **TELECOM'2013; 8èmes Journées Franco-Maghrébines des Micro-ondes et leurs applications**, Marrakech, Maroc, papier 257, 4 pages, mars 2013
- 5 T. Tahri, M. Heddebaut, A. Rivenq-Menhaj, L. Sakkila, Y. Elhillali, *Simulation électromagnétique d'une structure rayonnante entre 2 et 6 GHz*, **Actes de TELECOM'2011, 7èmes Journées Franco-Maghrébines des Micro-ondes et leurs Applications**, Tanger, Maroc, session E1, CDROM, papier 113, p.1-6, mars 2011.

- 6 P. Deloof, A. Rivenq-Menhaj, **Y. Elhillali**, C. Tatkeu, A. Elabed, *Codage numérique appliqué au radar embarqué routier*, **Actes de TELECOM'2009, 6èmes Journées Franco-Maghrébines des Micro-ondes et leurs Applications**, Agadir, Maroc, F4, p. 1–4, mars 2009.
- 7 L. Sakkila, A. Rivenq-Menhaj, **Y. Elhillali**, C. Tatkeu, A. Elabed, *Un radar ULB basé sur les statistiques d'ordres supérieurs pour la détection d'obstacles routiers*, **Actes de TELECOM'2009, 6èmes Journées Franco-Maghrébines des Micro-ondes et leurs Applications**, Agadir, Maroc, F2, p. 1–4, mars 2009.
- 8 J. Khan, **Y. Elhillali**, S. Niar, A. Rivenq-Menhaj, *A Multiple Target Tracking SoC for Transport Security*, **Colloque du GDR SOC SIP**, Paris, juin 2007.

### 3.5.5 Chapitre de livre

1. L. Sakkila, C. Tatkeu, **Y. Elhillali**, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Short range radar based on UWB technology*, **Radar Technology**, INTECH - ISBN 978-953-307-029-2, p. 19–38, 2010.

### 3.5.6 Brevet

1. C. Tatkeu, T. Pham, A. Rivenq-Menhaj, S. Niar, R. Greff, **Y. Elhillali**, *Dispositif de détection d'obstacles comportant un système de restitution sonore*, brevet 2010 :  
FR2946936 (A1) 2010-12-24, avec extensions :  
WO2010149927 (A2) 2010-12-29  
WO2010149927 (A3) 2011-02-17  
EP2445759 (A2) 2012-05-02  
FR2946936 (B1) 2012-11-30  
EP2445759 (B1) 2013-08-28

# Chapitre 4

## Présentation détaillée des travaux de recherche encadrés

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Présentation du contexte</b>	<b>54</b>
4.1.1	Systèmes de communication dans les transports	55
4.1.2	Systèmes de localisation et de détection d'obstacles	56
4.1.3	Intégration des systèmes au moyen de circuits logiques programmables	57
4.1.4	Réseaux de capteurs	57
4.1.5	Présentation de la suite du chapitre	58
<b>4.2</b>	<b>Thèses soutenues</b>	<b>58</b>
4.2.1	Thèse de SAKKILA Laila	58
4.2.2	Thèse de ELABED Amel	60
4.2.3	Thèse de KOSSONOU Ignace	61
4.2.4	Thèse de TAHRI Tarik	63
4.2.5	Thèse de TOUATI Nadjah	64
4.2.6	Thèse de HAMIDOUN Khadijah	66
4.2.7	Thèse de ELABBOUBI Adil	68
4.2.8	Thèse de SASSI Aymen	70

---

4.2.9	Thèse de ALOUANI Ihsen . . . . .	71
4.2.10	Thèse de MAATOUGI Lamyae . . . . .	73
4.2.11	Projet de Thèse de SALEM Fatma . . . . .	74
4.2.12	Thèse de PERTUISOT Geoffroy . . . . .	75
<b>4.3</b>	<b>Thèses en cours . . . . .</b>	<b>76</b>
4.3.1	Projet de Thèse de SAHRAOUI Selima . . . . .	76
4.3.2	Projet de Thèse de SADLI Rahmad . . . . .	76
4.3.3	Projet de Thèse de RIBOUH Soheyb . . . . .	78
4.3.4	Projet de Thèse de DIDOUH Ahmed . . . . .	79
4.3.5	Projet de Thèse de KIASSE Mouad . . . . .	80

---

## 4.1 Présentation du contexte

A la suite de la courte introduction fournie au chapitre précédent, j'exposerai de façon plus détaillée les travaux de recherche que j'ai encadrés. Dans le cadre de ma thèse de Doctorat intitulée : "Etude et réalisation d'un système de communication et de localisation, basé sur les techniques d'étalement de spectre, dédié aux transports guidés", j'ai proposé un système de communication, détection et d'identification de rames de métros automatisés, afin d'optimiser, faciliter et enrichir la gestion des réseaux de transports guidés automatisés.

Par la suite, j'ai poursuivi mes travaux de recherche et encadré un certain nombre de travaux de thèses. Ces derniers peuvent être classés dans quatre grands Domaines. Le premier concerne la problématique des systèmes de communication dans les transports. Le second Domaine est celui relatif aux systèmes de localisation et de détection d'obstacles. Le troisième consiste en la réalisation et l'intégration des systèmes au moyen de circuits logiques programmables. Le dernier Domaine, abordé plus récemment, est consacré à l'étude du réseau de capteurs (WSN, Wireless Sensor Nets) constitué par un ensemble de véhicules susceptibles de communiquer entre eux.

L'évolution de mes activités à travers ces domaines s'est opérée de fil en aiguille suivant les résultats obtenus durant les thèses que j'ai encadrées ou les projets de recherche auxquels j'ai eu la chance de participer. Mon implication dans le premier et

deuxième domaine s'est imposée par la nature même de la thématique des ITS. En effet dans cette thématique, il y a un fort besoin de perception d'environnement, de localisation et de communication. Historiquement ces fonctionnalités étaient réalisées par des systèmes indépendants. Une de nos motivations était de proposer un seul système qui assure plusieurs fonctionnalités en même temps. Concernant le troisième domaine, je m'y suis intéressé par intérêt scientifique et aussi pour notre souhait de démontrer la faisabilité des algorithmes proposés et de développer un POC fonctionnant en temps réel pour chaque système que nous concevons. Par la suite, j'ai souhaité prendre de la hauteur dans les couches OSI et de ne pas me limiter à la couche physique. Alors je me suis intéressé au dernier domaine surtout avec l'avènement du cross layer et la motivation de consolider les fonctionnalités complémentaires ou redondantes des différentes couches. Plusieurs thèses que j'ai encadrées sont financées par des projets. Ceci nous a assuré une certaine autonomie pour le financement, mais impose parfois que le travail de thèse porte plus sur de la recherche appliquée.

#### **4.1.1 Systèmes de communication dans les transports**

Mon premier Domaine de recherche est l'Étude et la réalisation de systèmes de communication spécialisés pour les transports, pour lequel nous avons le plus fréquemment utilisé une technique à faible ou moyenne portée et haut-débit, la technique Ultra Large Bande (ULB). Je me suis intéressé aussi à des techniques moins large bande comme l'ITS-G5 et la 5G. Ce Domaine sera dans la suite désigné comme "Domaine A". Une présentation de divers aspects de la technique ULB est introduite dans l'Annexe A.

L'objectif de cette partie de mes travaux est de développer de nouvelles techniques de modulation, de codage et d'accès multiple, elles aussi présentées dans l'Annexe A, afin d'améliorer la communication inter-véhicules ou véhicules-infrastructures, en augmentant le débit offert et en diminuant le taux d'erreur par bit transmis, selon les exigences de chaque type d'application. Pratiquement toutes les thèses que j'ai encadrées relèvent en grande partie de ce Domaine.

### 4.1.2 Systèmes de localisation et de détection d'obstacles

De nos jours, l'explosion des sciences et techniques a conduit aux systèmes de positionnement et de localisation par satellites comme le GPS (Global Positioning System), qui ont maintenant prouvé leur efficacité, leur précision et leur caractère indispensable pour les applications en milieu non confiné (outdoor).

Les systèmes de localisation modernes présentent des insuffisances au niveau des applications en environnement confiné (indoor), soit à cause de la fréquente non-disponibilité des signaux (GPS) dans ce type d'environnement, soit par leur manque de précision, même quand ils utilisent des antennes relais (pseudo-lites) à l'entrée des zones non couvertes ou encore d'autres technologies terrestres. En effet, on rencontre dans les milieux confinés d'autres difficultés : l'existence de nombreux trajets multiples, la non-visibilité directe entre émetteur et récepteur (No Line Of Sight, NLOS en anglais). Ces difficultés rendent très complexe l'estimation exacte de certains paramètres de position, d'où le problème de précision rencontré dans la majorité des systèmes de localisation.

Les transmissions Ultra-Large Bande (ULB) de par leur très grande précision temporelle potentielle et la faible puissance d'émission qu'ils nécessitent (voir Annexe A), constituent une excellente candidate pour résoudre les problèmes en milieu confiné et leur utilisation en milieu libre peut également s'avérer avantageuse [Fon01, Gez09]. Les généralités sur les systèmes de positionnement sont données dans l'Annexe B. Ce Domaine sera dans la suite désigné comme "Domaine B".

Dans chaque cas particulier, il convient de déterminer :

- la forme d'onde la mieux adaptée parmi la gaussienne et ses dérivées, les formes d'ondes générées à partir de fonctions orthogonales (Gegenbauer, Hermite).
- la modulation la plus efficace dans les environnements de propagation visés en termes de robustesse vis-à-vis du canal de propagation et d'erreur de localisation, comme les modulations PPM (Pulse Position Modulation), PAM (Pulse Amplitude Modulation), antipodale, etc,
- les techniques d'accès multiples les plus fiables pour l'application visée : les techniques temporelles et fréquentielles classiques, celles d'étalement à partir de sé-

quences directes (DS-CDMA, Direct Sequence-Code Division Multiple Access), ou par sauts temporels (TH-CDMA, Time Hopping-Code Division Multiple Access), ou encore des techniques plus exotiques,

- les récepteurs les mieux adaptés compte tenu du canal de propagation,
- la technique de radio-localisation la plus adéquate pour obtenir la précision désirée (par exemple centimétrique en 3-D), associée à un temps de calcul raisonnable : Time Of Arrival (TOA), Time Difference Of Arrival (TDOA), Angle Of Arrival (AOA), association TOA/AOA.

### 4.1.3 Intégration des systèmes au moyen de circuits logiques programmables

L'implémentation de démonstrateurs de nos systèmes passe par la mise au point de systèmes embarqués. Avec l'émergence d'applications complexes, ces systèmes embarqués doivent être à la fois performants et fiables. En vertu de leur nature reconfigurable, les FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) représentent un pas considérable pour résoudre le compromis entre performances et flexibilité. Cependant, la reconfiguration dynamique souffre toujours d'une limitation liée à la latence de reconfiguration et constitue donc un point-clé. Les circuits électroniques sont sensibles aux erreurs et défauts transitoires, dont l'impact peut s'avérer catastrophique pour la fiabilité des systèmes embarqués, au sein d'applications critiques comme les systèmes de transport. Ce Domaine sera dans la suite désigné comme "Domaine C". L'Annexe C en fournit des éléments de base.

### 4.1.4 Réseaux de capteurs

Dans le passé, certains travaux ont été effectués au sein de notre équipe sur les réseaux de capteurs, relativement au positionnement optimum de ces capteurs, l'optimisation du routage des informations dans le réseau et la minimisation de la consommation d'énergie [She07a–c]. Des applications aux réseaux constitués sur la base de composants Zigbee ont aussi été testées [Oua15–16].



Mes projets de recherche actuels tentent de converger vers des réseaux de véhicules équipés de capteurs intelligents développés au sein de notre laboratoire. Le travail envisagé consiste principalement en la conception d'algorithmes et d'architectures réseau permettant d'optimiser la communication entre les noeuds et de minimiser la consommation énergétique, dans le cadre de la communication inter-véhiculaire et entre véhicules et infrastructure. Ce Domaine sera dans la suite désigné comme "Domaine D".

#### 4.1.5 Présentation de la suite du chapitre

Dans la suite, je présente successivement les différentes thèses de Doctorat que j'ai encadrées, classées selon leurs dates de soutenance. Chacune d'elles est reliée au divers Domaines définis ci-dessus, les objectifs, solutions retenues et résultats obtenus en sont aussi présentés succinctement.

## 4.2 Thèses soutenues

### 4.2.1 Thèse de SAKKILA Laila

Cette thèse, encadrée à 50% sous la direction du Professeur J.M. Rouvaen et intitulée "Etude et implémentation d'un radar ultra large bande pour la détection et la reconnaissance d'obstacles en milieu routier", a été soutenue le 3 décembre 2009 à l'Université de Valenciennes [Sak09a]. Le travail a fait l'objet de 5 publications [Sak10b, Sak14, Elh10, Tah14, Maa17] et de 8 communications [Sak07a, 07b, 08a, 08b, 09b, 09c, 10a, Tat08]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A , B.et, dans une moindre mesure, C. L'objectif de ce travail était de concevoir et de réaliser une fonction de détection d'obstacles bas coût sur un système embarqué, afin de prévenir et d'éviter des collisions. Le capteur adéquat pour cette fonctionnalité est le radar, du fait de son immunité aux conditions climatiques et environnementales. La présentation du radar proposé permet de définir un cahier des charges.

Les différentes formes d'ondes pressenties pour la réalisation du système radar ULB. sont comparées en termes de précision, par simulation et mesures. L'aspect accès multiple est traité en vue d'assurer la cohabitation entre plusieurs véhicules équipés de

radar avec le moins d'interférences possibles. La réalisation du récepteur adapté au radar ULB pour la détection d'obstacles est ensuite abordée. Une originalité de ce travail consiste en l'étude des récepteurs à corrélation adaptés à la technologie ULB. La théorie de détection du radar ULB en terme de probabilité de détection et de probabilité de fausse alarme permet de positionner au mieux le seuil de détection et de décider ou non de la présence d'une cible. Les réseaux de Caractéristiques Opérationnelles du Récepteur (COR) sont tracés. Enfin, les algorithmes basés sur les Statistiques d'Ordres Supérieurs (SOS) sont introduits afin de réduire l'effet du bruit impulsionnel reçu, dans le but d'améliorer la détection et de permettre l'automatisation de notre système.

Un prototype de laboratoire, dont plusieurs architectures sont envisagées et comparées, est présenté et développé. En vue d'évaluer les performances du radar ULB, plusieurs tests et mesures, mettant en œuvre plusieurs scénarios en environnement réel, sont présentés. Les résultats obtenus sur des signaux modélisés et des signaux réels sont conformes à ceux obtenus avec Matlab. La faisabilité de l'unité de traitement temps réel, est démontrée.

La faculté de reconnaissance des types d'obstacles détectés, en vue d'éliminer ceux qui ne représentent pas de danger dans la phase de suivi d'obstacles, est ensuite considérée. Ceci est possible grâce à la signature radar donnée par chaque type d'obstacle, caractéristique de la nature de l'obstacle. Une architecture complète dédiée à la reconnaissance d'obstacles en temps réel a été proposée. Un algorithme permettant la détection d'obstacles et en même temps l'identification du type d'obstacle est établi. Une base de données contenant les signatures associées aux obstacles les plus courants a été construite.

En conclusion, les objectifs de cette thèse concernant l'étude, la réalisation et le test d'un radar anticollision courte portée basé sur la technique ULB ont été atteints. Le système permet de calculer la distance séparant le véhicule d'un éventuel obstacle avec une précision pouvant atteindre 5 à 10 cm. Il permet aussi d'assurer la gestion multi-utilisateurs avec très peu d'interférences dans le milieu réel, ce qui s'avère original, vu le peu d'études consacrées à la conception d'un radar à accès multiple. La capacité du système à reconnaître les types d'obstacles détectés et à identifier leur nature est satisfaisante. Finalement la faisabilité d'une réalisation temps réel du radar ULB à l'aide de circuits programmables FPGA Xilinx (Virtex 5) est établie. Une solution est proposée pour implémenter le corrélateur, qui permet une décomposition de la tâche en plusieurs sous-corrélations fonctionnant en parallèle à 750MHz. À long terme, ce

radar ULB (ici en bande de base) sera porté autour de la fréquence autorisée pour les radar anti-collision (79 GHz). Cette migration en fréquence préservera certaines performances du radar ULB en bande de base (accès multiple, précision), mais d'autres seront vraisemblablement altérées (signature radar, ...).

#### 4.2.2 Thèse de ELABED Amel

Cette thèse, encadrée à 35% sous la direction du Professeur A. Rivenq et intitulée "Étude et conception d'un système IR-UWB dédié aux communications sans fils haut débit" [Ela12a], a été soutenue le 27 janvier 2012 à l'Université de Valenciennes. Le travail a fait l'objet d'une publication [Ela12b] et de 3 communications [Ela11a, Ela11b, Elh11]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et C. Madame ELABED est actuellement en poste dans l'industrie.

L'objectif de ce travail de thèse est la mise en œuvre de nouvelles techniques de codage pour les signaux Ultra Large Bande (ULB) dans le but d'augmenter le débit offert et d'améliorer la robustesse du lien de communication pour des applications multimédias et transport (communication véhicule-infrastructure). Le développement d'un système de communication sans fil haut débit, basé sur la technique ULB impulsionnelle (IR-UWB), est prévu. De nouvelles modulations dites "M-OAM" ont été proposées et se sont avérées plus adéquates et plus efficaces pour une communication haut débit que les solutions classiques, en utilisant comme critères l'adéquation à l'application visée et les performances obtenues en réception. Des algorithmes de traitement de signaux adaptés à ce nouveau type de codage ont été proposés et testés. L'aspect multi-utilisateurs a aussi été pris en compte pour minimiser les interférences et améliorer la synchronisation. Après une étape de simulation, un prototype a été réalisé pour procéder aux premiers tests des performances du système en conditions réelles, en fonction de la forme d'onde et du type de modulation utilisée.

Finalement, une unité de traitement en temps réel sur une plateforme FPGA Xilinx Virtex 5, offrant des temps de calcul suffisamment brefs avec une horloge à 3GHz, a été réalisée sur la base d'algorithmes de corrélation fonctionnant en parallèle sur des architectures reconfigurables. Des simulations, effectuées avec des signaux théoriques et réels, ont permis d'obtenir des résultats conformes à ceux des simulation avec Matlab, ce qui montre la faisabilité de cette unité de traitement temps réel. Une architecture

complète dédiée au décodage des modulations M-OAM a aussi été proposée. Les travaux de cette thèse ont démontré la possibilité de réaliser un système ULB impulsionnel offrant les plus hauts débits existant actuellement (si l'on exclut ceux atteints uniquement avec la fibre optique). Le système ULB conçu offre la possibilité d'un débit adaptatif (scalable) selon les besoins et la qualité de transmission requise. Il restera à réaliser les codeurs-décodeurs en technologie FPGA (travaux futurs avec Altera et le LAMIH) et à implémenter des algorithmes plus rapides en augmentant le parallélisme et en accélérant les processus de re-configuration. Il conviendra aussi de tester d'autres canaux de propagation en milieu libre et en milieu confiné, d'autres récepteurs (Rake), de concevoir des architectures assurant la double fonctionnalité de communication et de localisation pour les transports (Thèse de Mr Tarik TAHRI), de réaliser un système adaptatif (scalable) offrant des débits adaptables selon les besoins (collaboration avec l'ENSA de Marrakech).

### 4.2.3 Thèse de KOSSONOU Ignace

Cette thèse, encadrée à 30% sous la direction du Professeur A. Rivenq et intitulée "Étude d'un système de localisation 3-D haute précision basé sur les techniques de transmission Ultra Large Bande à basse consommation d'énergie pour les objets mobiles communicants" [Kos14b], a été soutenue le 27 mai 2014 à l'Université de Valenciennes. Le travail a fait l'objet d'1 publication [Kos14a] et de 5 communications [Kos11a, 11b, 11c, 12, 14c]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et B. Monsieur Kossonou est actuellement employé par l'entreprise TRW.

Les transmissions ULB, comme nous l'avons dit plus haut permettent de remédier aux insuffisances des systèmes classiques de localisation. Cette technique a été choisie pour mettre au point un procédé de localisation endogène permettant d'assurer, avec précision, la continuité des services de localisation dans les environnements indoor. Le procédé s'appuie sur un algorithme non-itératif de localisation en trois dimensions (3-D) (voir section B.5.3.3 dans l'Annexe B) qui permet de réduire le temps de calcul et la consommation énergétique. Il utilise la technique temporelle de différentiation du temps d'arrivée (TDOA), qui permet de mieux tirer profit de la bonne résolution temporelle de l'ULB sans problème de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. Pour la transmission ULB les techniques d'accès multiple par séquence directe

(DS-CDMA) [Gol67,Pet95, Pic82] et par sauts temporels (TH-CDMA) [Iac02, Mag01, Nak06] ont été considérées.

Les différents blocs du système ont été modélisés [Pro00] afin de simuler le système dans le canal Gaussien (AWGN) et les canaux IEEE.802.15.4a indoor. Il a été ensuite testé dans différents environnements réels en laboratoire.

Le démonstrateur du système de positionnement réalisé utilise un code pseudo-aléatoire différent pour chaque station de base, modulé par une impulsion de localisation, les codes permettant de différencier les signaux des différents émetteurs. Les instants d'arrivée de chaque signal sont obtenus au moyen d'un récepteur à corrélation implémenté sur MATLAB (post-traitement), ce qui permet de déduire les différences de temps d'arrivée, variables d'entrée de l'algorithme de localisation 3-D.

Différentes géométries ont été testées en variant la position de la cible (matérialisant le mobile à positionner) et les stations de base. Il ressort des résultats que les erreurs de localisation sont fonction de la position estimée, mais demeurent raisonnables. Pour un système de localisation 3-D, avec la technique d'accès multiple DS-CDMA, l'erreur est légèrement supérieure à celle pour la technique TH-CDMA. Ces résultats expérimentaux confirment ceux des simulations réalisées. L'influence de la configuration géométrique des stations de base sur la précision de localisation a été également mise en évidence.

Le système de localisation 3-D, basé sur la technologie radio impulsionnelle ULB proposé permet d'atteindre des erreurs de localisation centimétriques en 3-D pour les applications indoor. De plus, il est susceptible de fournir un service supplémentaire de communication. En présence d'un canal de propagation multitrajets, on pourrait tirer avantage de la technique de retournement temporel [Fal13], qui exploite les multitrajets pour obtenir un gain de focalisation (principe du retour inverse).

Le passage à un démonstrateur totalement intégré nécessitera la miniaturisation des antennes et l'augmentation de l'ouverture de leur diagramme de rayonnement. De plus, il conviendra d'implémenter les fonctions actuellement réalisées en différé (post-traitement Matlab pour obtenir les différences de temps d'arrivée des signaux et exécuter l'algorithme de positionnement 3-D) sur des circuits FPGA.

#### 4.2.4 Thèse de TAHRI Tarik

Cette thèse, encadrée à 50% sous la direction du Professeur A. Rivenq et intitulée "Systèmes radars coopératifs multimodes pour la détection, l'identification des obstacles sur les voies, la localisation et la transmission de données trains-infrastructures", a été soutenue le 29 septembre 2014 à l'Université de Valenciennes [Tah14b]. Le travail a fait l'objet de 2 publications [Tha12, Tha14a]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et B. Monsieur TAHRI est actuellement en poste dans l'enseignement privé.

L'objectif consistait en l'étude et le développement d'un système radar coopératif capable d'assurer, à la fois, une localisation de précision centimétrique, une communication avec un débit de l'ordre d'1 Gbits/s, ainsi qu'une identification des obstacles présents sur les voies. Dans cette optique, l'utilisation de la technologie ULB s'impose (d'où le lien avec le domaine A). Les nouvelles techniques ULB proposées dans la thèse ont été étudiées en détail théoriquement et par simulation sur ordinateur. La localisation au moyen d'un radar ULB, qui se ramène à la mesure d'une distance, a aussi été étudiée (d'où un lien avec le domaine B). Dans ce cadre, différentes techniques de multiplexage et plusieurs techniques de modulation telles que la PPM, l'OAM, la 2 pi-M, et la DS-CDMA ont été développées. Ces techniques ont pour but de séparer les signaux de communication et les signaux de localisation, ainsi que d'augmenter le débit des transmissions de données. Des études théoriques alliées à des simulations ont été réalisées, afin de les comparer en termes de taux d'erreur binaire et de débit. Les résultats théoriques et les simulations du système proposé ont été validés par des expérimentations menées dans un environnement réel. La structure d'un radar coopératif correspondant au cahier des charges a été conçue, un prototype en a été réalisé et testé expérimentalement en laboratoire. Les mesures obtenues ont permis d'effectuer des traitements aboutissant à la détermination, à la fois, de la précision moyenne de localisation et de la qualité d'identification d'obstacles, ainsi que celle de la qualité de transmission (par mesure du taux d'erreur binaire).

Les résultats expérimentaux ont permis de confirmer les résultats de simulation des propriétés du système étudié et, aussi, de valider la qualité de transmission des techniques de multiplexage proposées, telle que la  $2\pi$ -OAM qui permet bien d'atteindre un débit avoisinant 1 Gbits/s.

### 4.2.5 Thèse de TOUATI Nadjah

Cette thèse, encadrée à 30% sous la direction du Professeur A. Rivenq et intitulée "Optimisation des formes d'ondes d'un Radar d'aide à la conduite automobile, robustes vis-à-vis d'environnements électromagnétiques dégradés", a été soutenue le 20 novembre 2015 à l'Université de Lille I [Tou15a]. Le travail a fait l'objet de 3 publications [Tou15b, 16, 17] et de 4 communications [Tou13a,13b, 14a, 14b]. Le sujet lié au Domaine A. Madame TOUATI est actuellement employée par l'entreprise VALEO Stuttgart.

Ce travail est axé sur le développement d'un système radar multi-utilisateurs performant. De nouvelles formes d'ondes, possédant un niveau suffisamment faible d'interférences mutuelles tout en garantissant des propriétés individuelles intéressantes, basées sur la combinaison des codes fréquentiels de Costas et d'autres techniques de compression d'impulsion en exploitant les signaux de Costas modifiés, ont été proposées. L'approche utilisée consiste à remplacer les impulsions rectangulaires constitutives d'un code de Costas par d'autres impulsions offrant une diversité plus importante (nombre de codes disponibles dans une même famille), et d'explorer des types d'impulsions plus variés.

En particulier, nous avons exploité les codes de phase, les familles de séquences codées en amplitude ainsi qu'une approche originale qui consiste à introduire un second code de Costas dans l'impulsion du code principal. Toutes ces approches ont été validées par simulation notamment pour définir les paramètres permettant de corriger le problème des lobes récurrents de la fonction d'autocorrélation. Ces approches ont été, ensuite, analysées et comparées selon plusieurs critères : produit bande passante  $\times$  durée, consommation en bande passante, comparaison des enveloppes des signaux, des propriétés spectrales, des fonctions d'ambiguïté. Nous avons, en particulier, évalué les bornes de Cramer-Rao pour chaque forme d'onde, afin d'apprécier les performances optimales d'estimation de vitesse et de distance. Ces performances optimales sont quasiment similaires pour des formes d'ondes de même durée et même bande passante. La précision en estimation de vitesse est dégradée si une seule impulsion est utilisée, problème qui peut être surmonté utilisant des trains d'impulsions. La précision en vitesse a été améliorée dans un facteur égal au rapport entre la durée du train d'impulsions et celle d'une seule impulsion.

Le cas de l'environnement multi-utilisateurs a ensuite été traité en adaptant les formes d'ondes proposées à ce contexte par l'exploitation de la diversité des impulsions de

base ainsi que celle des codes de Costas. Dans un premier cas, le facteur retenu était l'orthogonalité des impulsions choisies. Ainsi, nous avons pu, à l'aide d'un même code de Costas et d'une famille d'impulsions orthogonales, synthétiser une famille de formes d'ondes présentant un minimum d'inter-ambiguïté dans une zone Doppler restreinte. Le nombre de formes d'ondes a été amélioré au prix d'un PSLR (Peak to SideLobe Ratio, rapport pic sur niveau du lobe secondaire) plus bas de 2 à 3 dB en moyenne par rapport aux signaux de Costas ayant un minimum de coïncidences proposés par la littérature. Dans le second cas, nous avons établi les conditions sur les codes de Costas qui permettent de conserver de bonnes propriétés d'inter-ambiguïté tout en élargissant le nombre de formes d'ondes, en exploitant plusieurs codes de Costas. Le critère de sélection de ces codes se base sur la minimisation du nombre de coïncidences dans la matrice d'inter-ambiguïté de chaque paire de codes. Ainsi, nous avons montré que le nombre de formes d'ondes synthétisées est largement amélioré par rapport à l'état de l'art car nous disposons de plus de degrés de liberté. L'amélioration est d'un facteur égal à la taille de la famille d'impulsions orthogonales utilisée. Les signaux proposés sont différents de ceux existants dans les radars automobiles actuels et les traitements usuels dans ce contexte ne s'y adaptent pas forcément en raison de la complexité introduite par la combinaison de diverses techniques de compression d'impulsions. Le traitement en réception est donc revu, afin de proposer les algorithmes d'estimation de distance et de vitesse qui s'adaptent au mieux à ces nouvelles formes d'ondes. Des méthodes plus génériques, telles que le traitement Doppler dans un train d'impulsions pour l'estimation de la distance et de la vitesse, sont explorées. Dans un souci d'amélioration du niveau de lobes secondaires dans l'espace distance-vitesse, des techniques fondées sur le Compressed Sensing ont été abordées et la validité de cette approche pour les formes d'ondes proposées est démontrée. Pour finaliser l'étude, les performances des formes d'ondes ont été testées expérimentalement dans un environnement réel. Les propriétés des formes d'ondes sont conservées malgré les distorsions introduites par les différents étages de la chaîne de transmission. Les résultats pratiques et théoriques sont très proches en termes de niveaux des lobes secondaires, bien qu'il existe une distorsion importante au niveau de ces derniers, due à l'effet des antennes d'émission et de réception. La proposition de signaux de Costas modifiés, plus robustes à ces distorsions a permis d'améliorer le PSLR pratique de 1 à 3dB en moyenne. L'évaluation pratique des performances d'estimation a montré que, dans le cas du filtre adapté, les erreurs d'estimation sont très faibles et



s'approchent de celles données théoriquement par les bornes de Cramer-Rao. Dans le cas du Compressed Sensing, les performances dépendent de l'espacement entre les points de la grille et donc de la fréquence d'échantillonnage utilisée qui doit être limitée pour garantir une complexité algorithmique raisonnable. Dans ce cas, les erreurs d'estimation sont pratiquement égales à celles obtenus par filtrage adapté à la même fréquence d'échantillonnage. L'analyse des signaux en sortie de ces deux détecteurs a permis de confirmer que, malgré quelques fausses alarmes, le Compressed Sensing montre de très bonnes performances en termes de niveau des lobes secondaires comparé au filtre adapté, surtout pour les faibles distances (SNR plus grand).

Les travaux menés ont permis de proposer un système radar multi-utilisateurs performant, à la fois par les formes d'ondes innovantes qu'il emploie et par le traitement efficace en réception qui permet d'estimer les paramètres de plusieurs cibles simultanément.

#### 4.2.6 Thèse de HAMIDOUN Khadijah

Cette thèse, en co-tutelle marocaine, encadrée à 30% sous la direction des Professeurs A. Rivenq et K. Elbaamrani et intitulée "Nouvelles Architectures Adaptatives de Modulation et Codage ULB selon la QoS requise pour la communication véhicule-infrastructure", a été soutenue le 29 février 2016 à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech [Ham16]. Le travail a fait l'objet de 3 publications [Ham15,18, Ela17] et de 7 communications [Ham12, 14a, 14b, Maa15a, 15b,15c, 16]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et C. Madame HAMIDOUN est actuellement en poste dans l'enseignement privé au Maroc.

L'objectif de ce travail de thèse est d'utiliser la technologie ULB pour concevoir un nouveau système de communication haut débit Radio Impulsionnelle (IR-ULB), basé sur un nouveau schéma de modulation nommé M-OAM (M-Orthogonal Amplitude Modulation) et les formes d'ondes orthogonales MGF (Modified Gegenbauer Functions) et dédié aux applications sans fil à courte portée, notamment pour les communications multimédia et le transport intelligent (ITS). Les modulations M-OAM proposées sont évaluées dans le canal AWGN et les canaux ULB à trajets multiples IEEE.802.15.3a et IEEE.802.15.4a. Les résultats de simulation montrent que la performance du système proposé, en terme de taux d'erreur binaire (BER), est du même ordre que celle des

modulations ULB traditionnelles. Cependant, les modulations M-OAM offrent un très haut débit de données combiné avec une faible complexité d'implémentation. Un tel système doit permettre de servir un grand nombre d'utilisateurs simultanément avec une bonne qualité de service. Dans cette optique, une nouvelle technique d'accès multiple DS-MGF-OAM est proposée, qui fait usage de la technique DS-ULB et de l'orthogonalité des impulsions MGF pour permettre une communication efficace avec un nombre maximal d'utilisateurs. Néanmoins, l'effet des trajets multiples réduit la qualité de la transmission. Ainsi, la contribution de deux architectures de réception dans l'amélioration des performances est étudiée, à savoir le récepteur RAKE et l'égaliseur MMSE (Minimum Mean Square Error). L'étude montre que le système de communication M-OAM offre de bonnes performances en terme de qualité de services (QoS) pour un nombre d'utilisateurs allant au moins jusque 25.

Après l'étape de simulation, des expériences sont menées dont les résultats dans des environnements réels sont analysés et discutés. Enfin, un prototype de traitement en temps réel a été réalisé sur une plateforme FPGA possédant une fréquence d'horloge de 3GHz, grâce à des algorithmes parallèles implantés sur des architectures reconfigurables. Pour cela, le système M-OAM a été conçu et développé en utilisant la programmation VHDL et le logiciel ISIM. Une fois cette étape validée, l'implémentation a été effectuée sur la base du programme VHDL conçu lors de la simulation, après des modifications exigées par les caractéristiques des cartes FPGA et de la carte de conversion numérique-analogique utilisées.

Des tests personnalisés mis en place dans le laboratoire IEMN/DOAE grâce aux instruments numériques disponibles ont été exécutés sur l'implémentation obtenue dans des cas variés. Afin de poursuivre l'intégration du système, une architecture parallèle a été proposée pour la corrélation au niveau de récepteur. Cette corrélation est réalisée sous la forme de plusieurs sous-corrélateurs opérant en parallèle. Des signaux réels ont été utilisés pour effectuer des tests par simulation, puis directement sur l'implémentation, avec de bons résultats. Le bon fonctionnement de tous les blocs de notre système a été validé. Dans le but de faciliter la gestion du système implémenté, une interface utilisateur a été également développée en utilisant Visual C ++. Les résultats de la corrélation ainsi que le signal reçu et traité peuvent ainsi être extraits et tracés. Pour compléter l'intégration, il sera intéressant de développer le système d'accès multiple DS-MGF-OAM proposé sur les composants FPGA, ainsi que les ordres supérieurs des modulations M-OAM à savoir 16-OAM, 64-OAM ou 32-OAM. Une description des

techniques de prototypage sur FPGA est donnée à l'Annexe C.

A l'issue de ces travaux, diverses voies d'amélioration future sont possibles : étude d'un système offrant à la fois un service de communication ULB haut débit basé sur les modulations M-OAM et un service de localisation 3-D de haute précision; étude de l'effet Doppler sur les performances du système relié au problème de mobilité du véhicule; optimisation du système de communication haut débit par l'amélioration de la portée de transmission; implémentation de la radio cognitive sur notre chaîne de transmission afin de réaliser un traitement aveugle des modulation M-OAM.

#### 4.2.7 Thèse de ELABBOUBI Adil

Cette thèse, encadrée à 40% sous la direction du Professeur de M. Heddebaut et intitulée "Étude et évaluation de la consommation énergétique d'une balise ferroviaire fondée sur l'ULB et le Retournement Temporel", a été soutenue le 4 avril 2016 à l'Université de Valenciennes [Ela16c]. Le travail a fait l'objet de 2 publications [Ela16a, Ela16b] et de 5 communications [Ela13, 14a, 14b, Fal15, Elb16]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et C. Monsieur ELABBOUBI travaille actuellement dans l'industrie au Maroc.

Le but de cette thèse est d'optimiser la consommation énergétique des systèmes ferroviaires et, en particulier, des applications de signalisation. Pour une localisation précise et un transfert de données entre voie et trains efficaces, les opérateurs utilisent des balises ferroviaires disposées entre les rails. La communication entre train et balise ne s'effectue que lorsque le train passe au-dessus de la balise, soit pendant une durée très courte. La balise demeure en veille, jusqu'à ce que le train la télé-alimente en s'en approchant par couplage inductif. Ceci nécessite que le train émette en continu un puissant signal radiofréquence. Le fait d'émettre continûment un signal puissant sans réelle nécessité, la difficulté de maintenance des balises liée à leur présence entre les rails, ainsi que la capacité de communication réduite des balises actuelles constituent autant de limitations importantes.

Pour remédier à ces limitations, une nouvelle génération de balises ferroviaires basées sur un lien radiofréquence doit être développée avec comme caractéristiques : une portée plus importante (passage de quelques centimètres à quelques mètres), une précision de localisation maintenue, sinon améliorée, possibilité d'implantation le long des

voies et non entre les rails. Une technique de focalisation du signal émis depuis la balise vers l'antenne embarquée sur le train est retenue. Pour l'alimentation de la balise, ni un couplage inductif, ni une alimentation de toutes les balises du réseau à partir d'une infrastructure centrale ne sont envisageables; une solution raisonnable et économique consiste à générer de l'énergie électrique basse tension localement en utilisant des énergies renouvelables (et en réduisant au maximum la consommation de l'électronique de la balise).

Dans cette optique, notre contribution consiste à développer une couche physique et à l'optimiser en termes d'énergie consommée en proposant les modulations, les techniques de codage, détection et de transmission les plus appropriées.

Pour le développement de cette balise ferroviaire, l'Ultra Large Bande (ULB) est choisie comme technique de communication radio sans fil. L'ULB permet la conception de systèmes d'émission et de réception économes en énergie, de complexité peu élevée, et à bas coût. La bande passante très élevée de l'ULB, pouvant atteindre 480 Mbps sur une portée de 10 mètres [WUSB], permet l'obtention d'un fort débit de communication afin d'échanger les informations utiles dans un faible laps de temps et sur une portée limitée. Il est alors nécessaire d'optimiser les impulsions ULB transmises (modulation, technique d'accès au canal, . . .) en termes de consommation énergétique, tout en conservant le haut niveau de performance nécessaire.

Pour cela, la consommation de certains des composants électroniques clés constituant les émetteurs et les récepteurs, puis l'optimisation des algorithmes au niveau de la couche réseau afin de consommer moins d'énergie sont considérées. Un modèle énergétique de base est ensuite défini, pour la comparaison de divers types de modulation ULB et de différentes méthodes d'accès multiple.

La technique de focalisation du signal transmis par retournement temporel (RT) est alors décrite [Aba10, Ako05, Den11, Liu08, Sag09Sag09]. On peut ainsi focaliser l'énergie rayonnée depuis un émetteur (la balise) vers une zone d'espace particulière (là où le train attend une réception de données issues du sol), ce qui permet de réduire la pollution électromagnétique dans d'autres directions de l'espace non exploitées. La comparaison entre les systèmes ULB avec ou sans retournement temporel est menée dans divers types de canaux. Le modèle énergétique est enfin étendu pour tenir compte de l'influence des interférences multi-utilisateurs sur la consommation.

L'implémentation de deux systèmes ULB sur FPGA (le premier utilisant une modulation PAM et le second une modulation PPM), est réalisée en utilisant le langage VHDL

afin de servir de base à la validation de l'apport des méthodes proposées et de calculer les bilans de consommation associés des systèmes directement sur carte.

#### 4.2.8 Thèse de SASSI Aymen

Cette thèse, en co-encadrement avec la tunisie, encadrée à 40% et intitulée "Étude et mise en oeuvre d'une solution cross-layer pour l'amélioration de la QoE dans les communications inter-véhiculaires, basée sur les réseaux bayésiens", a été soutenue le 25 novembre 2016 à l'Université de Sfax (Tunisie). Le travail a fait l'objet de 3 publications [Sas12, 14, 16b] et de 3 communications [Sas11, 15, 16a]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et B. Monsieur SASSI est actuellement Maître de Conférences en Tunisie. Cette thèse concerne les technologies V2X : les systèmes de communication inter-véhiculaires (V2V) et véhicule-infrastructure (V2I). L'évaluation des performances de ces technologies constitue un pas décisif avant toute possibilité d'intégration et d'utilisation au sein de systèmes réels de communication V2X basés sur le standard IEEE 802.11p (utilisant l'OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) dénommé Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) [Zha13, Qiu15, Tor14].

Le contexte de nos travaux s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la Qualité de Service QoS pour les réseaux de communication V2X. Le but principal est de mettre en place un système de transmission fiable capable de résister à l'effet de la forte mobilité des véhicules tout en assurant des débits importants. A cet effet, l'étude et la mise en place d'une solution Cross-Layer basée sur les réseaux bayésiens ont été effectuées en vue d'assurer une meilleure qualité de services aux usagers de la route.

La particularité du système étudié porte sur le fait qu'il prend en compte un certain nombre de variables hétérogènes relatives à l'environnement de la transmission, qui sont répertoriées selon trois catégories. La première catégorie concerne l'information à transmettre, en prenant en compte les indices de priorité des données et le type du véhicule émetteur. La deuxième catégorie de variables concerne la quantification du facteur obstacles, en considérant dans ce cas la vitesse et la direction du véhicule et le milieu où il se trouve, qu'il soit à l'air libre, dans un tunnel ou même dans un parking. La troisième catégorie prend en considération la qualité de la transmission précédente. Une étude approfondie de la portée de communication V2X a été tout d'abord menée en tenant compte de la mobilité des terminaux. La couche physique de l'IEEE 802.11p

a été simulée et des mesures ont été effectuées avec le système de transmission Arada LocoMate. Les résultats montrent la nécessité d'optimiser la qualité de transmission. A cet effet, une nouvelle technique de peigne-pilote pour améliorer la qualité de transmission OFDM a été proposée. En effet, la normalisation suppose un canal indoor et des terminaux stationnaires comme dans l'IEEE 802.11a. Afin de traiter le problème de la mobilité des terminaux, il est proposé d'utiliser une technique d'estimation du pilote afin de réduire le taux d'erreur par bit (BER) élevé. L'impact d'un ré-arrangement des symboles du pilote sur la qualité de transmission (QOT, Quality Of Transmission) est mis en évidence. De plus, une des contraintes de l'estimation du canal physique (PHY) est levée en ajoutant deux nouveaux symboles au pilote afin de permettre une estimation de canal par moindres carrés (LS, Least Squares) ou par minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE, Minimum Mean Square Error) au niveau du transmetteur.

A l'aide d'une série de simulations, le BER a été calculé en fonction du SNR (Signal to Noise Ratio, rapport signal à bruit). Ceci a permis de montrer que le ré-arrangement de la trame du pilote permet d'obtenir de bien meilleurs résultats que la trame classique standardisée et que les performances sont bien meilleures une fois les deux symboles supplémentaires ajoutés.

Il est extrêmement difficile de nouer une relation entre la qualité de transmission QoT d'un système de communication et son impact sur la qualité des services QoS assurés. Pour cela, une unité d'aide à la décision a été proposée, basée sur la fusion d'un grand nombre de paramètres afin de reproduire le raisonnement humain dans le cadre du diagnostic d'une transmission. Ce diagnostic permet d'évaluer l'éventuel état de la QoS et de rendre ainsi possible la recherche d'une solution adéquate pour l'optimiser. La méthode des réseaux bayésiens pour modéliser le problème est justifiée par ses deux principales particularités : une relation causale entre plusieurs facteurs et l'aspect stochastique de la prise de décision. La méthode permet alors de diagnostiquer, de réagir et de prendre une décision dynamiquement.

#### 4.2.9 Thèse de ALOUANI Ihsen

Cette thèse, encadrée à 50% sous la direction des Professeurs A. Rivenq et S. Niar et intitulée "Conception de systèmes embarqués reconfigurables fiables et application dans

les systèmes de transport par rail", a été soutenue le 30 janvier 2017 à l'Université de Valenciennes. Le travail a fait l'objet de 2 publications [Alo17c, Alo18] et de 10 communications [Alo12a, 12b, 14a, 14b, 15a, 15b, 16a, 16b, Alo17a, 17b]. Le sujet est lié aux Domaines A et B et, plus fortement au domaine C. Monsieur ALOUANI occupe actuellement un poste d'MCF à l'Université de Valenciennes.

Dans cette thèse, une nouvelle technique de reconfiguration dynamique au niveau du grain-moyen pour les circuits à base de blocs DSP48E1 est proposée. L'idée est de profiter de la reprogrammabilité des blocs DSP48E1 couplés avec un circuit d'interconnexion reconfigurable afin de changer la fonction implémentée par le circuit en un cycle d'horloge.

D'autre part, comme les nouvelles technologies s'appuient sur la réduction des dimensions des transistors ainsi que des tensions d'alimentation, les circuits électroniques sont devenus de plus en plus susceptibles d'erreurs transitoires. L'impact de ces erreurs au niveau système peut être catastrophique et les SETs (Single Event Transients) sont devenus une menace tangible pour la fiabilité des systèmes embarqués, en l'occurrence dans les applications critiques comme les systèmes de transport.

Les techniques de fiabilité qui se basent sur des taux d'erreurs (SERs) sur-estimés peuvent conduire à un gaspillage de ressources et par conséquent un coût en consommation de puissance électrique. Il est primordial de prendre en compte le phénomène de masquage d'erreur pour une estimation précise des SERs. Cette thèse propose une nouvelle modélisation inter-couches de la vulnérabilité des circuits qui combine les mécanismes de masquage au niveau transistor (TLM) et le masquage au niveau Système (SLM). Ce modèle est ensuite utilisé afin de construire une architecture adaptative tolérante aux fautes qui évalue la vulnérabilité effective du circuit en fonctionnement. La stratégie d'amélioration de fiabilité est adaptée pour ne protéger que les parties vulnérables du système, ce qui engendre un circuit fiable de coût optimisé. Les expérimentations effectuées sur un système de détection d'obstacles à base de radar pour le transport ferroviaire montrent que l'approche proposée permet d'établir un compromis fiabilité/ressources utilisées.

Les apports de cette thèse sont principalement :

- une technique de reconfiguration ultra-rapide pour les circuits à base de DSP, remédiant à une limitation du processus conventionnel de reconfiguration des FPGA, qui peut alors s'effectuer en une seule période d'horloge,
- une architecture reconfigurable tolérante aux défauts, grâce à la possibilité de chan-

ger la carte de redondance en cours d'exécution sur la base d'une estimation de vulnérabilité.

#### 4.2.10 Thèse de MAATOUGI Lamyae

Cette thèse, en co-tutelle marocaine, encadrée à 40% sous la direction des Professeurs A. Rivenq et H. Ouahman et intitulée "Développement d'un récepteur intelligent dédié aux systèmes sans fil basé sur les modulations M-OAM", a été soutenue le 12 avril 2017 à l'Université d'El Jadida [Maa17a]. Le travail a fait l'objet de 3 publications [Maa16b, Maa17b, Ela17] et de 4 communications [Maa15a, 15b, 15c, 16a]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et C. Madame MAATOUGI occupe actuellement un postDoc à l'Université de Valenciennes.

Dans ces travaux de thèse est proposé un système de communication original permettant d'atteindre un haut débit et de répondre aux exigences de la qualité de service requise pour les communications courte portée dans le cadre du transport intelligent. Ce système se base sur la technologie Ultra Large Bande Impulsionnelle (IR-ULB) et sur un nouveau schéma de modulation nommé M-OAM (M-Orthogonal Amplitude Modulation). Les modulations M-OAM se basent sur le principe des modulations M-QAM en remplaçant les porteuses par des formes d'ondes ULB orthogonales de type MGF (Modified Gegenbauer Function). Ces modulations ont été évaluées sous les conditions d'un canal AWGN et des canaux IEEE 802.15.3a et IEEE 802.15.4a qui tiennent compte des paramètres réels de l'environnement routier.

En plus du haut débit exigé par les communications inter-véhiculaires, il faut assurer un échange d'informations simultané entre plusieurs utilisateurs de la route et garantir une bonne qualité de service. Dans cette optique, une nouvelle technique d'accès multiple adaptée est proposée. Chaque utilisateur a la possibilité d'utiliser la modulation OAM adéquate selon le débit désiré. Le récepteur de ce système se caractérise par un aspect intelligent grâce à l'intégration des principes de la Radio Cognitive (RC) qui permet de détecter l'arrivée du signal et d'identifier les paramètres de la modulation utilisée afin de s'y adapter d'une façon autonome. Une bonne qualité de service est assurée par la proposition d'une nouvelle technique de démodulation qui se base sur les Statistiques d'Ordres Supérieurs (SOS) permettant d'éliminer le bruit Gaussien. Enfin, un prototype utilisant le traitement en temps réel sur une plateforme FPGA



a été réalisé en exploitant des algorithmes parallèles sur des architectures reconfigurables. Les bonnes performances du système de communication M-OAM ont ainsi été démontrées et l'ensemble des aspects proposés a été validé expérimentalement au sein du laboratoire IEMN-DOAE.

Le système proposé répond aux exigences d'accès multiple, de l'intelligence du fonctionnement et de la qualité de transmission. Au niveau de l'émission, l'utilisateur sélectionne la modulation convenable au débit envisagé pour chaque application. Au niveau de la réception, le récepteur est capable de différencier entre la présence du signal et la présence du bruit avant de commencer son traitement et également d'identifier les paramètres de la modulation exploitée par chaque utilisateur. Cependant, au lieu d'avoir un récepteur pour chaque utilisateur, nous proposons un seul récepteur adaptatif à tous les utilisateurs. Ce dernier assure aussi une bonne qualité de transmission à travers la proposition d'une technique de démodulation qui se base sur les statistiques d'ordres supérieurs afin d'éliminer le bruit gaussien.

#### 4.2.11 Projet de Thèse de SALEM Fatma

Cette thèse, encadrée à 40% sous la direction du Professeur S. Niar et intitulée "Fiabilité et sécurité des systèmes embarqués de communication dans les réseaux de véhicules intelligents : modélisation et optimisation", a débuté le 25 janvier 2016 à l'Université de Valenciennes. Elle a été soutenue le 06 septembre 2018 [Sal18]. Le travail a fait l'objet d'une publication [Sal17b] et de 3 communications [Sal17a, 17c, 18a]. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et D.

Le terme Communication Véhicule avec l'extérieur (Vehicle-to-anything, V2X) fait référence à un système de transport intelligent (Intelligent Transportation System, ITS) dans lequel les véhicules et l'infrastructure sont totalement connectés entre eux. Cette connectivité fournit une connaissance précise des situations de trafic tout le long du réseau routier, ce qui a pour conséquences d'améliorer la sécurité, de réduire la durée des bouchons et d'éviter des pertes économiques, tout en ouvrant la voie à une variété de nouvelles applications ITS visant la sécurité des routes ainsi que l'information et le divertissement des passagers. Les communications V2X sont basées sur la technologie de communication à courte distance (Dedicated Short-Range Communications, DSRC) et celle des réseaux cellulaires. Bien que d'importants progrès aient été accomplis dans

la recherche sur les V2X, quelques challenges demandent encore à être relevés et certains points clés nécessitent des études approfondies.

Cette thèse s'intéresse à deux des principaux problèmes à résoudre : la fiabilité et la sécurité des communications V2X.

Pour traiter l'aspect fiabilité, une méthode basée sur un modèle utilisateur est proposée pour évaluer la capacité du standard IEEE 802.11p à satisfaire les exigences de Qualité de Service (Quality-of-Service, QoS) nécessaires pour la dissémination des messages. La nouveauté de la méthode pour ce type d'application provient de la réduction du problème de la définition d'un modèle markovien à celui des moments en régime stationnaire du processus de retard induit. Ceci fournit une perception approfondie des paramètres de conception pour le standard IEEE 802.11p et ses fonctionnalités, permettant de proposer des reconfigurations en vue d'améliorer les performances. De plus, un modèle régénératif, qui traite le problème de la caractérisation des processus dans un environnement de trafic interconnecté comme celui d'un réseau V2X hybride à grande échelle, est proposé pour la première fois. Ceci constitue un outil essentiel pour obtenir des réseaux véhiculaires à grande échelle d'efficacité fonctionnelle adéquate.

Du point de vue de la sécurité, une nouvelle méthode d'optimisation est introduite. Elle consiste à relier les exigences de QoS de classes d'applications différentes avec les paramètres de conception de base du mécanisme de résolution de contention du protocole MAC de l'IEEE 802.11p. De plus, un nouvel algorithme de détection d'attaques par brouillage dans l'environnement véhiculaire est également proposé. L'algorithme utilise la méthode d'optimisation développée pour définir un seuil de détection et, en intégrant la méthode de détection séquentielle des changements, trace et détecte les attaques par brouillage dès que la valeur du seuil est dépassée. Des expériences analytiques et par simulation sont réalisées afin de valider les méthodes et modèles proposés et de prouver leur efficacité.

#### **4.2.12 Thèse de PERTUISOT Geoffroy**

Cette thèse CIFRE, que j'ai encadré à 30% sous la direction du Professeur A. Rivenq, en collaboration avec la Société AIRBUS Hélicoptères, a été interrompue après une année et demie par le départ en industrie du candidat en juin 2016. Le travail a fait l'objet d'1 communication [Per16]. La collaboration avec la Société AIRBUS a été néanmoins

poursuivie.

## 4.3 Thèses en cours

Outre les thèses précédentes, j'encadre également quatre thèses non encore soutenues.

### 4.3.1 Projet de Thèse de SAHRAOUI Selima

Cette thèse, encadrée à 30% sous la direction du Professeur A. Rivenq et intitulée "Nouveaux systèmes de communication V2V basés sur la 5G", a débuté le 1er octobre 2015 à l'Université de Valenciennes. La soutenance est prévue pour en février 2019. Le travail a fait l'objet de 2 projets de publication en cours d'examen avec le professeur Ahmed ELTAWIL de l'UCI. Cette thèse concerne les communications V2V basées sur les techniques 5G Full Duplex, Le but est de permettre à des mobiles de communiquer directement et en même temps en utilisant une seule et même bande de fréquences, ce qui permettrait augmenter l'efficacité spectrale.. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et C.

### 4.3.2 Projet de Thèse de SADLI Rahmad

Cette thèse, encadrée à 40% sous la direction des Professeurs A. Rivenq et C. Tatkeu, intitulée "Étude et développement d'un radar UWB OFDM MIMO", a débuté le 1er octobre 2015 à l'Université de Valenciennes. La soutenance est prévue pour février 2019. Le sujet est fortement lié aux Domaines B et C. Dans ce travail de thèse, nous nous sommes concentrés sur l'identification des cibles radar Ultra-Wide Band (ULB), en particulier pour les piétons et les cyclistes. Ce travail comporte deux parties principales, la détection et la reconnaissance. Avant que les cibles radar puissent être identifiées, l'une des tâches importantes du système radar est la détection des cibles. Nous avons évalué deux approches différentes pour cette tâche de détection de cible. Dans la première approche du processus de détection, nous avons proposé et étudié un détecteur de radar ULB robuste qui fonctionne sur des données radar 1-D (A-scan). Il s'agit

de la combinaison de HOS (statistique de l'ordre supérieur) et du détecteur de seuil automatique CA-CFAR (Cell-Averaging Constant False Alarm Rate). L'idée d'utiliser HOS est d'avoir une bonne estimation du retard temporel pour l'écho radar. HOS offre de meilleures performances que les statistiques de second ordre grâce à sa capacité à supprimer le bruit.

Nous avons évalué les performances entre le détecteur CA-CFAR à seuil automatique et le HOS avec la valeur de seuil fixée. À partir de cette comparaison, nous avons obtenu que les performances du détecteur HOS avec la valeur de seuil fixée sont meilleures que celles du détecteur CA-CFAR. Nous avons constaté que les performances du détecteur CA-CFAR dépendent du choix du numéro de cellule d'entraînement. Si le numéro de cellule d'apprentissage n'est pas correctement défini, le détecteur CA-CFAR entraîne de nombreuses fausses alarmes et fausses détections. D'autre part, nous avons besoin d'un détecteur robuste qui fonctionne avec la valeur de seuil automatique. De ce fait, nous avons proposé un détecteur de radar UWB robuste en combinant les détecteurs HOS et CA-CFAR.

Cette combinaison est effectuée en appliquant d'abord le HOS sur le signal reçu. En effet, le bruit n'est pas totalement éliminé, mais une grande partie de ce bruit peut être supprimés. Étant donné que le bruit du signal radar reçu est éliminé, nous implémentons le détecteur CA-CFAR. En faisant cette combinaison, nous avons enfin un détecteur de radar UWB à seuil automatique robuste.

Après avoir utilisé des données radar à une dimension 1-D, nous nous sommes rendus compte que pour les cibles comme les piétons et les cyclistes, le radar recevait un très faible rapport signal sur bruit (SNR) et perdait fréquemment la position de la cible. Par conséquent, afin d'améliorer le taux de détection, nous avons évalué l'approche des données radar 2D (B-Scan). Dans ce travail, nous nous sommes d'abord concentrés sur l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR) du radar en proposant une nouvelle méthode de suppression du bruit de fond. Nous nous sommes ensuite concentrés sur l'amélioration du taux d'identification de la cible radar grâce au réseau de neurones à convolution (CNN). Ainsi, afin d'augmenter le SNR du signal reçu, nous avons proposé une nouvelle méthode de suppression du bruit qui fonctionne sur ces données B-Scan. Il s'agit d'une combinaison de WSD (Wavelet Shrinkage Denoising) et de statistiques d'ordre supérieur (HOS). Pour évaluer les performances de la méthode proposée, différents types de techniques de suppression du bruit tels que l'analyse en com-

posantes principales (PCA), la décomposition en valeurs singulières (SVD), la WSD et la HOS ont été appliqués et les résultats analysés. Les SNR des résultats finaux ont été calculés pour comparer l'efficacité des techniques individuelles de suppression du fouillis. Les résultats montrent que les performances de la combinaison WSD et HOS sont supérieures à celles des autres méthodes.

A la phase d'identification, il existe également deux méthodes associées à deux approches de détection différentes, la SVM (Support Vector Machines) et les réseaux de neurones à convolution (CNN). La SVM est utilisée pour identifier la cible radar sur la base de la signature radar à 1 D obtenue à partir de la première approche du procédé de détection, et le CNN est appliqué à la signature radar à 2 D obtenue à partir de la seconde approche du procédé de détection. Les résultats montrent que les performances de la SVM sont bonnes, les taux de reconnaissance atteignant respectivement 96,23%, 95,25% et 97,23% pour le cycliste, le piéton et la voiture. Les résultats de la mise en œuvre de CNN sur des données radar bidimensionnelles montrent que la cible a potentiellement été classée, le taux d'identification pouvant être atteint jusqu'à 99,8%, 99,4% et 97,8% pour les voitures, les cyclistes et les piétons, respectivement.

### **4.3.3 Projet de Thèse de RIBOUH Soheyb**

Cette thèse, encadrée à 50% sous la direction du Professeur A. Rivenq et intitulée "Étude et évaluation des technologies hybrides dédiées aux communications V2V et V2I" a débuté le 1er Novembre 2017 à l'Université de Valenciennes. La soutenance est prévue pour fin 2020. Le sujet est fortement lié aux Domaines A. Elle est menée dans le cadre des systèmes de transports qui ont connu une énorme évolution ces dernières années avec pour but de faciliter la vie des utilisateurs et d'accélérer la croissance économique à travers le monde. En Europe, des projets de recherche majeurs tels : InterCor, Scoop, Corridor et C-Roads, se sont orientés vers les systèmes de transports intelligents coopératifs (C-ITS) supportés notamment par le consortium C2C. Pour atteindre cet objectif, des normes (ETSI, ISO) et des standards de communications normalisés entre les véhicules (V2V) et entre les véhicules et l'infrastructure (V2I), ainsi que des expérimentations à large échelle ont été lancées. Ces communications sont assurées soit par le réseau wifi véhiculaire IEEE 802.11p (ITS-G5) ou par le biais des réseaux cellulaires (3G, 4G et 5G). Les systèmes de communication basés sur ITS-G5

supportent la transmission des données directe entre les véhicules, sans avoir besoin de l'infrastructure réseau (RSU), avec un débit de 27 Mbit/s à forte mobilité. Mais il ne prend en charge que les messages ETSI-ITS, tandis que les réseaux cellulaires sont plus flexibles et peuvent prendre en charge tout format de données. Ces réseaux actuels ne permettent pas des communications V2V directes (sans passer par la BTS). Les nouvelles architectures radio ITS convergent vers les communications hybrides (utilisant la norme ITS-G5 et les réseaux cellulaires en parallèle). L'objectif de cette thèse est de :

- Valider les spécifications fonctionnelles des normes et standards de communications V2X et participer ainsi à la rédaction des livrables de ces normes dans le cadre du projet européen InterCor.
- Étudier les nouvelles techniques de codages adaptés assurant l'intégrité et la sécurité des signaux transmis.
- Faire une étude comparative des différentes architectures radio proposées pour les communications hybrides en France et en Europe.
- Étudier l'effet de la mobilité sur les systèmes de communications véhiculaires.
- Effectuer des tests en environnement réel d'un récepteur universel.

#### 4.3.4 Projet de Thèse de DIDOUH Ahmed

Cette thèse, encadrée à 50% sous la direction du Professeur A. Rivenq et intitulée "Étude et évaluation des nouvelles techniques de sécurité dans la communication entre véhicules." a débuté en juillet 2018 à l'Université de Valenciennes. La soutenance est prévue pour fin 2021. Le sujet est fortement lié au Domaine A.

Cette thèse s'effectue dans le même cadre que la précédente, sauf quelle s'intéresse aux aspects de sécurité dans les communications intervéhicule. elle prend en compte les communications effectuées soit par réseau wifi véhiculaire IEEE 802.11p (ITS-G5) ou par le biais des réseaux cellulaires (3G, 4G et 5G).. La sécurité au sein de ces systèmes est actuellement gérée par le système PKI avec un serveur PKI centralisé. L'idée est de passer de ce genre d'architecture centralisée qui a besoin de la validation d'un seul côté à une architecture distribuée qui permet la validation d'un grand nombre de nœuds communicants. la technologie **Blockchain** peut être un atout pour l'utilisation

de ce type d'architecture. L'objectif de cette thèse est de :

- Valider les spécifications fonctionnelles des normes et standards de communications V2X et participer ainsi à la rédaction des livrables de ces normes dans le cadre du projet européen InterCor.
- Étudier les nouvelles techniques de codages adaptés assurant l'intégrité et la sécurité des signaux transmis.
- Faire une étude comparative des différentes architectures de sécurité proposées pour les communications véhiculaires en France et en Europe.
- Étudier l'effet de la mobilité sur les systèmes de communications véhiculaires.
- Effectuer des tests en environnement réel des communications véhiculaires sécurisés.

#### 4.3.5 Projet de Thèse de KIASSI Mouad

Cette thèse, encadrée à 30% sous la direction du Professeur M. Duquennoy et intitulée "Le développement de capteurs ultrasonores SAW intelligents et communiquant pour le contrôle des structures." a débuté le 8 janvier 2018 en cotutelle entre l'Université de Valenciennes et Université Chouaib Doukkali. La soutenance est prévue pour fin 2021. Le sujet est fortement lié aux Domaines A et D.

Cette thèse concrétise une collaboration intergroupe de notre laboratoire. En effet les activités du groupe TPIA (TRANSDUCTION, PROPAGATION ET IMAGERIE ACOUSTIQUE) concernent le domaine de l'acoustique physique et les activités de recherche visent globalement à comprendre les phénomènes d'interaction ondes ultrasonores avec la matière, à proposer différentes méthodes d'analyse adaptées au suivi de l'intégrité des structures et des propriétés des matériaux. Les enjeux de ce sujet de thèse sont d'étudier la possibilité de faire un contrôle non destructif de façon autonome et sans-fil par des capteurs SAW (à ondes acoustiques de surface) pour qu'ils soient les moins intrusifs possibles pour la structure à surveiller. Les capteurs seront à terme à demeure sur la structure et pourront communiquer par ondes électromagnétiques. Ainsi, il faudra étudier dans quelle mesure la technologie radio choisie est capable de communiquer et de fournir de l'énergie aux capteurs et sous quelles caractéristiques physiques

---

(puissance restituée, fréquence, etc..). Il est nécessaire de définir les limites de la technologie radio permettant de réceptionner les informations recueillies sur les capteurs SAW. La conception de ces capteurs et/ou d'un réseau de capteurs s'appuiera sur les technologies radio innovantes en plus d'une identification unique de chaque capteur au sein du réseau par des étiquettes radiofréquence comportant un identifiant propre, permettant le transfert de données de façon robuste, faible consommation et bas coût. Parmi les solutions étudiées, la technique RFID semi-passive pourrait répondre aux deux enjeux majeurs qui sont la réduction de la consommation en énergie et la miniaturisation des capteurs.





# Chapitre 5

## Conclusion générale et perspectives

### Sommaire

---

<b>5.1 Conclusion générale</b> . . . . .	<b>83</b>
<b>5.2 Perspectives</b> . . . . .	<b>84</b>
5.2.1 Continuation et développement des axes actuels . . . . .	84
5.2.2 Projets concernant les transports intelligents . . . . .	85
5.2.3 Initiative IEMN concernant le projet phare de "Télécoms UHD" . . . . .	86
5.2.4 Action "Miroir intelligent" - TIGA . . . . .	88

---

### 5.1 Conclusion générale

Dans ce manuscrit, de taille respectable malgré mes désirs initiaux de concision, j'ai tenté tout d'abord de donner, dans deux chapitres assez brefs, un aperçu synthétique de mes travaux d'enseignement et de recherche, ainsi que des responsabilités administratives que j'ai assumées dans ces deux cadres.

J'ai exposé ensuite, dans un chapitre plus étoffé, les thèses que j'ai encadrées, en me limitant à leurs objectifs et leurs résultats, retombées et perspectives. J'ai enfin développé quelques détails scientifiques et techniques dans le cadre de plusieurs annexes assez volumineuses.

Ces thèses sont en grande majorité reliées entre elles par une certaine "filiation", développant en cascade ou simultanément des thématiques (communication, localisation, implémentation des systèmes) et enrichissant ainsi par leurs retombées un fonds commun ré-utilisable accessible à notre équipe et aux deux autres équipes géographiquement proches (LEOST de l'IFSTTAR, Département d'Informatique du LAMIH) avec lesquelles nous collaborons (logiciels, méthodes, savoir-faire).

## 5.2 Perspectives

### 5.2.1 Continuation et développement des axes actuels

En ce qui concerne l'enseignement, je désire continuer à développer mes cours, TD et TP actuels à l'ISTV dans le domaine des communications et de leur sécurité pour les transports intelligents et les objets mobiles, en les enrichissant grâce à des modules issus de l'application de mes recherches. J'ai aussi le projet de développer, avec le support d'un collègue de l'atelier de l'IUT, un module de Réalité Virtuelle dans les Systèmes Industriels : la mise au point d'une maquette virtuelle pourrait ainsi, après élaboration et validation du modèle, permettre l'utilisation d'une unique maquette physique par plusieurs groupes de TP. Il faudra pour cela que je confie certains des modules de base actuellement enseignés à l'IUT à des collègues.

En ce qui concerne la recherche, outre la poursuite des sujets actuels et leur ouverture vers les techniques actuellement en développement de la 5G, je pense introduire une autre vision des systèmes radiofréquences implantés dans les véhicules "intelligents". Il est en effet possible de considérer ces derniers comme des noeuds mobiles d'un réseau de capteurs communicants. Les applications visées concernent le développement de protocoles et d'algorithmes en vue d'optimiser les communications des véhicules entre eux et avec l'infrastructure (V2V et V2I), d'améliorer leur fiabilité et de diminuer la consommation d'énergie des noeuds.

Enfin, tant en recherche qu'en enseignement, je pense mettre aussi l'accent sur les problèmes liés à la Cyber-Sécurité. La sécurité, la confidentialité et la protection des données face aux intrusions et au brouillage intentionnel dans un réseau V2V de véhicules

communicants est, par exemple, une demande primordiale à satisfaire avant tout éventuel déploiement de ce type de système.

Je serai également un acteur majeur dans les projets futurs du Groupe Communications Numériques (COMNUM) de l'IEMN, auquel j'appartiens.

Notre objectif est d'accroître la compétitivité de notre recherche (plus d'attractivité internationale, plus de collaborations académiques et industrielles, plus de co-publications, plus de projets européens). Dans ce qui suit, je décris les projets futurs les plus importants dans lesquels je compte m'investir.

## **5.2.2 Projets concernant les transports intelligents**

Nous souhaitons développer des actions de recherche et de nouveaux services (détection des piétons, assistance aux camions et gestion du trafic) associées à la nouvelle piste automobile en construction à l'UVHC et à compléter les plateformes UVHC existantes : transports intelligents Syfra et C-ITS (communications V2V et V2I basées sur des unités latérales route ITS-G5 et des unités embarquées). Ces travaux nous ont amené à intégrer un réseau de partenaires industriels, académiques et gestionnaires des routes (Comité de coordination française de 3 projets : Scoop, INTERCOR et C-Roads piloté par le ministère de l'écologie et de la Transition écologique et solidaire). Une nouvelle collaboration autour de la route intelligente et coopérative avec VINCI, visant une chaire industrielle, est en cours d'instruction. Nous prévoyons également l'installation d'un laboratoire complet de tests ITS avec une chambre anéchoïque proche de cette piste. Ce laboratoire sera capable d'analyser la compatibilité électromagnétique des véhicules connectés et de donner des spécifications techniques des systèmes embarqués.

Ces plateformes seront dédiées à la proposition de projets innovants aux étudiants et seront également utilisées pour améliorer notre enseignement et notre attractivité. Dans ce domaine, nous poursuivrons notre collaboration avec l'Université de Californie à Irvine sur le full duplex en communication V2V et également en Cyber sécurité du véhicule connecté (projets ERASMUS +). Ces actions nous permettront de publier des articles en commun et de préparer une thèse de doctorat co-encadrée entre nos laboratoires.

Depuis octobre 2018, je suis coresponsable de la Taskforce TF5 (Validation) de la plateforme C-Roads en dualité avec un collègue, Marwane Ayaida, de l'URCA (université de Reims)

Concernant le ferroviaire, il est nécessaire d'anticiper les limites des réseaux d'infrastructures, en les rendant capables de supporter, grâce à la 5G, un ensemble d'exigences beaucoup plus large avec une capacité d'adaptation aux différentes exigences des applications ferroviaires. En particulier, les développements suivants sont particulièrement attendus pour répondre aux besoins du rail : une très faible latence, la disponibilité du réseau partout avec un débit élevé lorsque nécessaire, la sûreté et la sécurité, et enfin l'utilisation massive des systèmes MIMO pour une efficacité à large bande spectrale et énergétique, avec de nouvelles formes d'ondes 5G. Récemment, nous avons commencé à étudier les ondes millimétriques 5G et la technologie Radio sur fibre, ce qui pourrait être une solution prometteuse. Ces travaux s'inscriront dans le cadre de projets H2020 Shift2Rail. Le groupe COMNUM participera d'ailleurs à 3 projets phares de l'IEMN : le Transport, l'IoT et les Télécoms UHD (dédiés aux communications dans la gamme de fréquence des THz). Enfin, nous participerons activement au nouveau projet de notre université (L'UPHF et l'INSA HF). Cela nécessite une nouvelle organisation académique de nos missions et responsabilités.

### **5.2.3 Initiative IEMN concernant le projet phare de "Télécoms UHD"**

Titre : Nouveaux défis des communications à ultra-haut débit : justification et motivation (incluant l'impact sociétal et l'inter-disciplinarité).

Les développements récents en électronique numérique et en télécommunications ont été accélérés par les besoins d'applications exigeant des débits excessivement élevés, principalement dans les domaines des télécommunications, de la vidéo surveillance, des systèmes de transport intelligents, de la santé, et des objets communicants (IoT).

Des débits excédant encore ceux fournis par la 5G sont nécessaires du fait d'un nombre rapidement croissant d'interconnexions entre réseaux envisagés. Plusieurs opérateurs télécoms (Orange, Bouygues, SFR, ...) ont commencé à tester leurs réseaux 5G dans des conditions de fonctionnement réel et constaté que le débit atteint est inférieur à 15 Gbits/s dans des conditions idéales (un utilisateur unique et une courte portée). Le fait

d'augmenter le débit dans les réseaux à courte portée de quelques Mbits/s à plusieurs Gbits/s ouvre la voie à une multitude d'applications futures, mais actuellement seules les liaisons optiques autorisent de tels débits.

L'obtention du débit d'environ 100 Gbits/s désiré à l'aide de transmetteurs à ultra-haut débit (THz) et des architectures temps réel accélérées basées sur des FPGA et des GPU constitue un défi technologique de première grandeur. Les groupes de recherche de l'IEMN ont développé un excellent savoir-faire dans le domaine des têtes hyperfréquences, HF, THZ, des nano-composants, des circuits, du traitement du signal et des unités haute vitesse basées sur des FPGA. Et l'ont utilisé dans un certain nombre d'applications, comme la radio cognitive dans les systèmes ferroviaires, les communications V2V full-duplex, les techniques de codage à haut débit pour les communications vidéo, le traitement des données temps réel à haute vitesse. Ils ont aussi établi des collaborations fortes avec de nombreux partenaires nationaux, internationaux et industriels dans les domaines des télécommunications et des transports.

Les objectifs principaux (incluant les défis majeurs et les jalons, les indicateurs de succès) de l'initiative lancée par l'IEMN sont :

- Créer une chaîne de transmission complète permettant des liaisons à ultra-haute vitesse,
- Réaliser un démonstrateur afin de valider les choix de l'architecture temps réel,
- Analyser les forces et les faiblesses de l'IEMN dans la réalisation des objectifs,
- Développer une collaboration étroite entre les groupes de l'IEMN concernés (COMNUM, ANODE, CESAM, ...) autour des mêmes défis,
- Concevoir de solutions innovantes de codage pour atteindre le débit de données visé.

Ces activités conduiront à des publications communes entre différents groupes de l'IEMN et déboucheront sur des transferts de technologie vers l'industrie. D'autre part, nous étendrons également nos collaborations nationales et internationales et augmenterons ainsi la compétitivité et l'attractivité de notre laboratoire (Chaire, LIA, ...).

### 5.2.4 Action "Miroir intelligent" - TIGA

Dans les Hauts de France, environ 11% des personnes âgées de plus de 60 ans sont dépendantes (contre 9.2% au niveau national). Dans le Nord, 72 % des personnes âgées dépendantes vivent à domicile (contre 61% au niveau national), ce taux atteignant 80% chez les moins de 80 ans. Il existe chez ces personnes un taux de pauvreté supérieur à la moyenne nationale, notamment dans le Valenciennois (15.3% des 60-74 ans, contre 10.1% au niveau national).

Des aides familiales existent, mais plus de 50% des aidants naturels ont aussi plus de 60 ans. Le souhait de nombreuses personnes âgées entrant dans la dépendance est de garder leur logement tout en l'adaptant à la perte d'autonomie, mais les démarches peuvent être complexes, tout comme la réalisation pratique et le coût représenté.

Notre souhait est de proposer à ces personnes âgées un système discret et innovant, consistant en un miroir équipé de caméras, qui permettrait de pouvoir chaque matin, ou plusieurs fois par jour, récolter des informations sur le patient et son état de santé à l'instant de l'examen. L'idée principale est de pouvoir analyser, diagnostiquer et ainsi alerter, grâce à la caméra intégrée au miroir, des caractéristiques extraites du visage en lien direct avec certaines pathologies. Il a en effet été démontré [The17] qu'il existe un lien direct entre certaines pathologies et des informations extraites sur le visage.

Cette nouvelle technologie permettra un accompagnement et une coordination entre les différents professionnels de santé si cela s'avère nécessaire en fonction des informations recueillies par la caméra, en évitant ainsi de déplacer inutilement le patient de chez lui, et aussi de libérer une place en établissement spécialisé. Ceci implique l'utilisation d'une liaison haut débit entre le domicile du patient et les cabinets médicaux, en utilisant la technologie 5G par exemple. Cette action constitue notre implication dans le projet PIA3 « TIGA » déposé en 2018. Nous sommes aussi concernés par plusieurs actions autour de l'IA dans le domaine médical.

# **Annexe A**

## **Notions sur la technologie ULB**

### **A.1 Contenu**

Cette annexe est organisée en quatre volets. Le premier présente d'abord le principe de la technologie ULB ainsi que ses principales caractéristiques et atouts, ensuite, les formes d'ondes classiques et celles, originales, dont nous avons proposé l'utilisation. Le second volet est dédié aux différentes techniques de codage et de modulation développées durant nos travaux de recherche. Le troisième volet couvre les techniques expérimentales classiques en ULB. La dernière partie couvre les nouvelles solutions d'émission et de réception aptes à fournir un système d'accès multiple performant et un récepteur aveugle à détection de type de modulation grâce à l'introduction d'un réseau cognitif.

### **A.2 La technique ULB**

#### **A.2.1 Introduction**

Ce n'est que récemment que le concept d'ultra large bande a retrouvé un intérêt principalement suscité par le développement des transmissions à courte distance. Mais le concept de cette technologie lui-même est par contre bien plus ancien. Dès la fin du



19ème siècle, Heinrich Hertz avait eu l'idée d'utiliser des décharges électriques pour produire des ondes électromagnétiques, ce qui constitue la base de la technique ultra large bande.

Puis, au fil des années 60, ROSS et BENETT ainsi que TAYLOR [Tay95] présentent des études intéressantes sur l'émission et la réception d'impulsions en bande de base d'une durée de l'ordre de la nanoseconde. Dans leur publication apparaissent pour la première fois des applications liées à cette nouvelle technologie des communications et des radars durant les années 70/80, appelée technologie sans porteuse ou technologie impulsionnelle.

Bien que les fondements de la technologie soient connus depuis le milieu des années 60, le terme ultra large bande a vu le jour en 1989 dans une publication du ministère de la défense américaine DoD (Department of Defence); tout en lui accordant une confidentialité militaire, qui sera levée en 1994 en remarquant que la recherche se développait d'une façon importante aussi bien au niveau industriel qu'au niveau universitaire.

A partir des années 1990, les industries civiles s'intéressaient de plus en plus à cette technique et poussaient le gouvernement américain à prendre des mesures pour réglementer la technologie ULB. Par la suite, en février 2002, la FCC (Federal Communications Commission) a publié un premier rapport sur cette technologie et en a autorisé le déploiement commercial, fournissant ainsi des normes techniques appropriées et des restrictions à leur utilisation [FCC02]. Actuellement, la technologie ULB a été orientée vers l'électronique grand public et les communications.

## A.2.2 Principe de la technologie ULB

La technologie Ultra Large bande (Ultra Wide Band) est fondée sur l'émission de trains d'impulsions très brèves occupant un spectre très large (de l'ordre de 1 à quelques GHz). La première définition de l'ULB a été donnée par Taylor [Tay95, Bar00]. Selon ce dernier, le terme ULB désigne les systèmes qui émettent et reçoivent des ondes dont la largeur de bande relative  $LB_r$  est supérieure ou égale à 20% de la fréquence centrale. La largeur de bande relative est donnée par l'équation A.1 :

$$B_{frac} = \frac{f_h - f_l}{f_c}, \quad (\text{A.1})$$

où  $f_h$  et  $f_l$  représentent respectivement la borne supérieure et la borne inférieure de la bande de fréquences du signal et  $f_c$  désigne la fréquence centrale du système.

Les Etats-Unis ont été les premiers à s'intéresser à la question de la réglementation de l'ULB. L'organisme de régulation américain : Federal Communication Commission (FCC) réserve 7,5 GHz de bande continue non soumise à une licence d'utilisation, comprise entre 3.1 GHz et 10.6 GHz, pour les systèmes de communication ULB sans fil. La commission fédérale de communication (FCC) apporte deux précisions à la définition de Taylor :

\* La largeur de bande relative doit être celle mesurée à  $-10$  dB en dessous de la puissance maximale.

\* Un signal qui occupe plus de 500 MHz de bande passante est aussi considéré comme un signal ULB.

Selon la FCC [FCC02], un signal peut aussi être considéré Ultra Large Bande si son spectre occupe plus de 1,5 GHz de bande en fréquence. La FCC a pris position en identifiant des spécifications en termes de la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE - en anglais EIRP - Equivalent Isotropic Radiated Power) [Sko81] maximale autorisée de  $-41,3$  dBm/MHz.

### A.2.3 Normalisation en ULB

L'ULB doit être réglementé par les organismes de gestion du spectre, car elle occupe des bandes de fréquences déjà allouées (voir figure A.1). L'une de ses principales particularités est donc l'absence de licence pour accéder à la bande ULB librement et à moindre coût. Mais les décisions prises quant à la puissance d'émission maximale des signaux ULB varient d'une réglementation à l'autre. Nous dénombrons deux régions géographiques de normalisation en ce qui concerne les normes globales : les Etats-Unis et l'Europe. Certains pays d'Asie (Japon, Corée, Singapour) ont proposé individuellement des normalisations [Cho06].

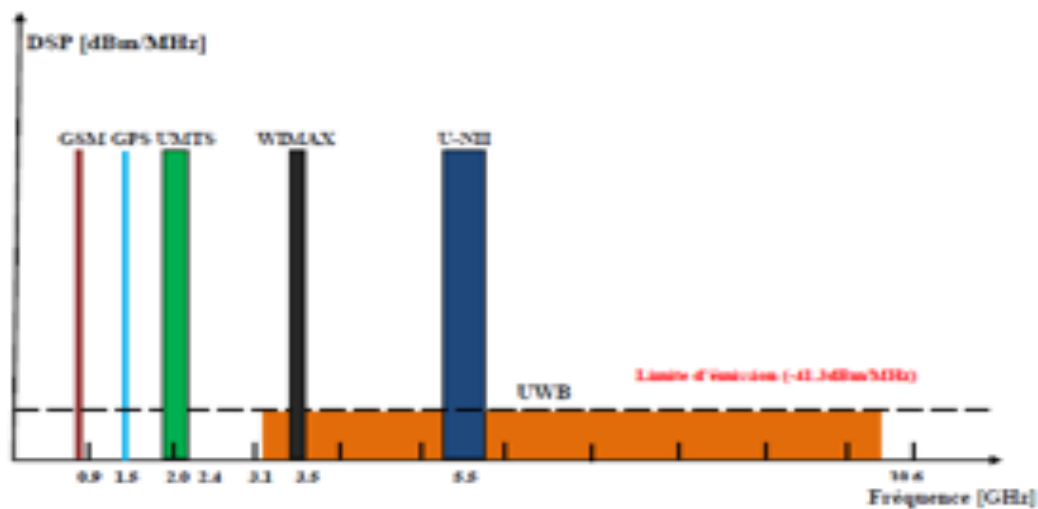


FIGURE A.1 – Régulation initiale de la FCC.

### A.2.3.1 Normalisation aux Etats-Unis

Les États-Unis sont les premiers à avoir traité le problème inédit de la réglementation de la technique ULB. En 1998, l'autorité de régulation FCC a lancé ses travaux sur l'ULB aux États-Unis. En mai 2000, une première proposition de régulation est publiée. En février 2002, la FCC publie son rapport nommé "First Report and Order" [FCC 02] qui réglemente les émissions ULB. A partir de cette date, l'émission de signaux ULB pour les communications est autorisée sans licence pour des applications indoor et pour des liaisons mobiles point à point en outdoor. La puissance de ces signaux est limitée dans la bande de 3,1 à 10,6 GHz (Voir figure A.2 ). La FCC limite la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) des émissions non intentionnelles à  $-41,3$  dBm/MHz pour la plage de fréquence allant de 3,1 à 10,6 GHz.

### A.2.3.2 Normalisation en Europe

L'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) propose, dès 2002, d'adapter le masque en escaliers de la FCC en un masque dont les transitions sont progressives (figure 1.5.a). De petites modifications sont effectuées jusqu'en 2005 [ETS05]. Ce type de masque permet de mieux protéger les systèmes "indoor" fonctionnant sur des

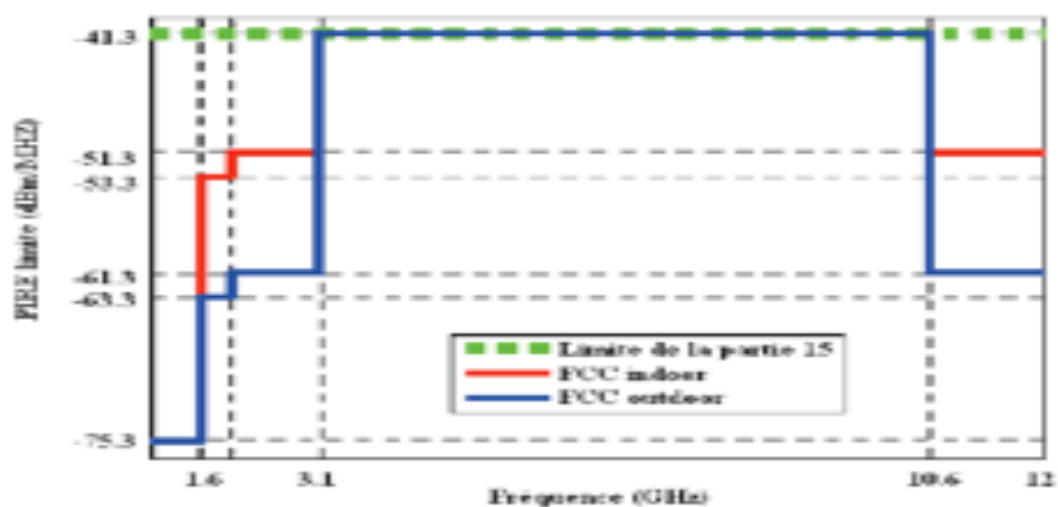


FIGURE A.2 – Régulation de la FCC en 2002.

fréquences inférieures à 3,1 GHz ou supérieures à 10,6 GHz, sans réduire les performances du système ULB entre 3,1 et 10,6 GHz. En revanche, pour les systèmes "outdoor", l'ETSI préconise une limite plus stricte avec une marge de 20 dB supplémentaire par rapport à la limite FCC, soit  $-61,3$  dBm/MHz.

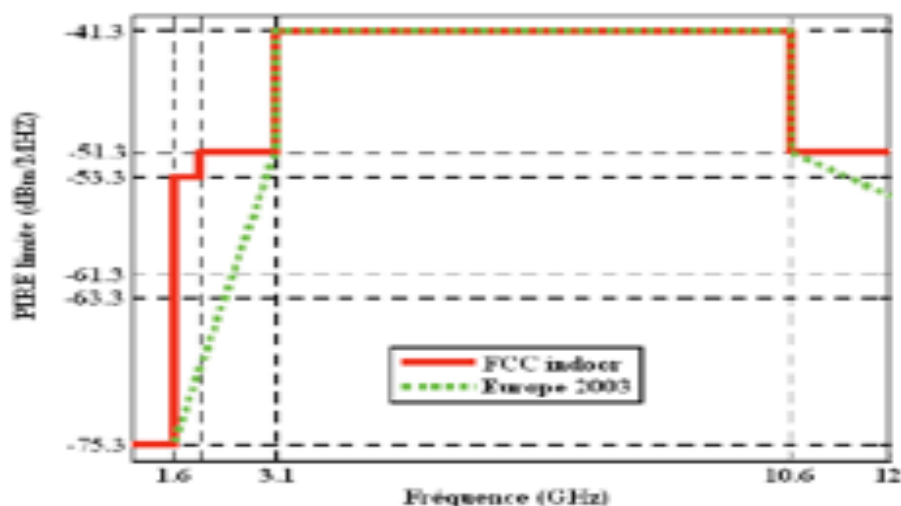


FIGURE A.3 – La première régulation de l'ETSI.

En février 2007, un nouveau gabarit (Figure A.4) a été proposé suite aux demandes

exprimées en réponse à la consultation publique [ETS07, ETS09]. La transmission des signaux ULB n'est autorisée que dans les plages fréquentielles comprises entre 3,4 et 4,8 GHz et entre 6 et 8,5 GHz avec l'utilisation impérative des mécanismes DAA (Detect And Avoid) jusqu'en 2010 : utilisation d'un faible rapport cyclique et détection des signaux émis dans des bandes de fréquence voisines (afin de les éviter).

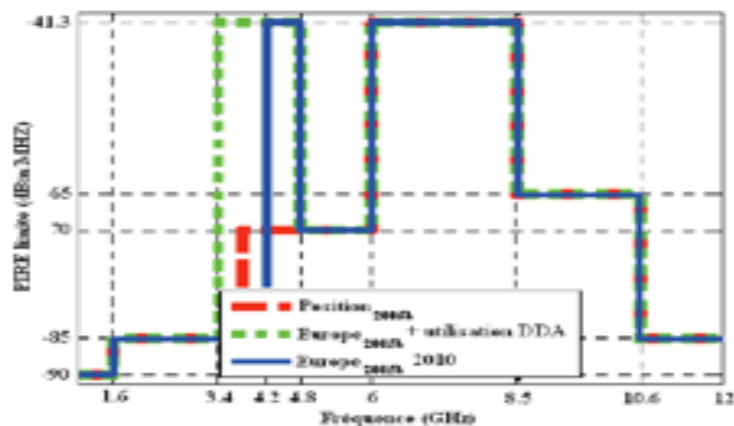


FIGURE A.4 – Progression des réglementations ULB en Europe établies par l'ETSI, seconde proposition de 2005.

En février 2007, la dernière normalisation des émissions des signaux ULB en Europe a été établie comme illustrée dans la figure A.5. Pour la bande de fréquences comprise entre 6 et 8,5 GHz, ce masque reste le même que celui de 2005, en revanche la bande comprise entre 3,4 et 4,8 GHz devient plus restreinte et sera totalement supprimée en 2010 [ETS09].

#### A.2.4 Les techniques de transmission pour l'UWB

Pour le haut débit, deux solutions principales ont fait l'objet d'une tentative de standardisation par le groupe IEEE 802.15.3a. L'une concerne l'utilisation de la technique DS-SS-SS-SS. L'autre correspond à la solution MB-OFDM [Bat03], basée sur la division du spectre fréquentiel en plusieurs sous-bandes de 500MHz chacune. La dissolution du groupe de travail en 2006 a abouti à la création de deux consortiums [Pag07], l'un, UWB Forum, s'occupant de la norme DS-UWB (étalement de spectre à séquence di-

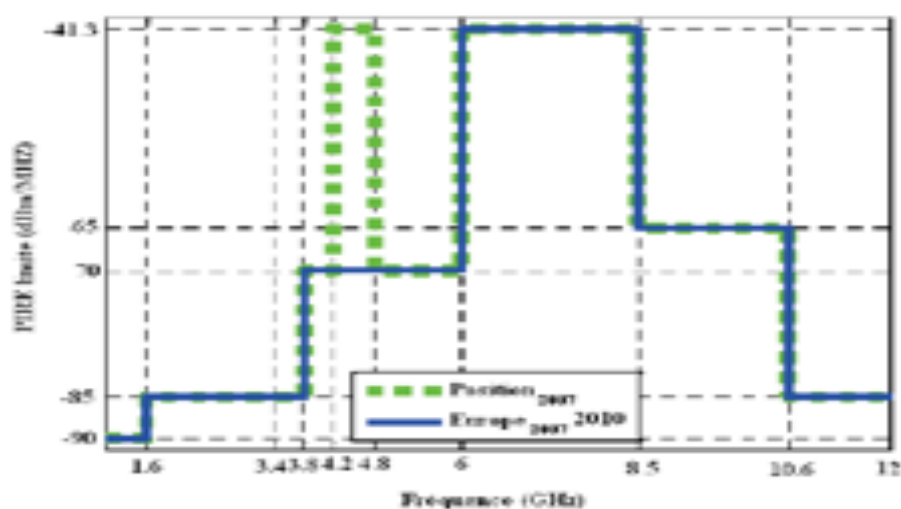


FIGURE A.5 – Progression des réglementations ULB en Europe établies par l'ETSI, proposition de 2007.

recte), et le second, WiMedia Alliance, de la norme MBOA (Multiband OFDM Alliance) [ECM08a, ECM08b]

En ce qui concerne les solutions bas débit, la transmission par radio impulsionnelle (à bande unique ou multi-bandes) constitue l'objet d'une standardisation par le groupe IEEE 802.15.4a et les réseaux corporels BAN (BodyArea Network) ont été confiés au groupe de travail IEEE 802.15.6 [Dan08].

Les systèmes ULB impulsionnels (IR-ULB) sont basés sur une transmission d'impulsions très brèves, larges de quelques centaines de picosecondes. La technologie IR-ULB semble potentiellement la plus intéressante pour nos travaux. Elle permet en effet une consommation d'énergie très basse et une mesure de distance (localisation) avec une précision de moins d'un mètre [IEE03, IEE06]. La bande est divisée en trois sous-bandes disjointes. La modulation préconisée est la BPM-BPSK (Burst Position Modulation-Binary Phase Shift Keying) qui permet de transmettre deux bits d'information par symbole [Eko12].

### A.2.5 Principaux avantages de l'IR-ULB

Les principales qualités de la radio impulsionnelle ultra large bande peuvent être résumées comme suit :

- Très haut débit : Des vitesses de plus de 100 Mbps ont été démontrées, ainsi que le potentiel de hauts débits (jusqu'à 480 Mbps) sur de courtes distances. La bande passante extrêmement large occupée par l'ULB fournit ce potentiel.
- Faible complexité : cet aspect amène des perspectives intéressantes pour la réalisation des équipements radio à faible complexité.
- Immunité multiple : Les impulsions étroites utilisées en ULB fournissent une résolution fine d'impulsions et permettent d'éviter les interférences inter-symboles. La haute résolution temporelle des signaux ULB implique la robustesse contre les trajets multiples.
- Faible consommation d'énergie due à la faible puissance rayonnée et au faible rapport cyclique d'activité de l'émetteur.
- Localisation avec une haute précision, puisque la résolution obtenue est proportionnelle à la durée de l'impulsion.
- Coût faible : Ceci est possible en éliminant la plupart des composants nécessaires dans les émetteurs et récepteurs sinusoïdaux conventionnels, à savoir le mélangeur et le modulateur.
- Caractéristiques de pénétration : l'un des avantages les plus importants du système de communication ULB est la capacité d'impulsions à pénétrer facilement les murs, les portes, les obstacles, et d'autres objets dans l'environnement indoor.
- Faible densité spectrale de puissance du signal ULB : ce qui permet la coexistence avec les technologies qui mettent en œuvre des puissances beaucoup plus importantes.
- Vu sa large bande, la technique ULB permet d'obtenir une forte capacité : le théorème de Shannon [Sha48a, Sha48b] montre que la capacité d'un système est di-

rectement proportionnelle à sa bande passante selon la formule :

$$C = B * \log_2(1 + SNR), \quad (\text{A.2})$$

$B$  désignant la bande passante du système et  $SNR$  le rapport signal à bruit [Pro00].

La technologie ULB offre une grande flexibilité en termes d'utilisation du spectre et présente un bon compromis grâce à sa simplicité et au coût faible des composants. Par conséquent, cette technologie est susceptible de fournir des débits élevés (de l'ordre de 1 Gbps) sur de très courtes portées (moins de 10 m). Un des objectifs de notre travail est de proposer des nouvelles techniques de modulation et de codage ULB, selon les besoins en performances et en débit.

### A.3 Les formes d'ondes ultra large bande

En ultra large bande, le choix de la forme d'onde constitue un paramètre primordial, qui contribue à l'optimisation des performances à la réception en termes de rapidité, de précision et d'efficacité. Concernant les formes d'onde ULB, il existe plusieurs familles d'impulsions, dont les plus répandues sont :

1. la gaussienne et ses dérivées (monocycle, doublet) [Win98]
2. les polynômes d'Hermite [Gha01,Gha04]
3. les polynômes de Gegenbauer que nous avons particulièrement étudiées [Lam07] et utilisées dans la plupart de nos travaux.

La dernière a été développée au sein de l'IEMN/DOAE en collaboration avec l'IFF-STAR/LEOST pour des applications de communication [Elb01a-Elb07, Elb11A, Elb11b, Elb12, Mfo13].

Les formes d'ondes ULB les plus utilisées sont basées sur l'impulsion gaussienne et ses dérivées.



### A.3.1 L'impulsion gaussienne et ses dérivées

L'impulsion gaussienne constitue un modèle mathématique facilement manipulable et compatible avec les possibilités de filtrage réel, son expression dans le domaine temporel est donnée par l'équation (A.3) :

$$G(t) = K_1 * \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right), \quad (\text{A.3})$$

où où  $-\infty < t < +\infty$ ,  $K_1$  est l'amplitude et  $\sigma$  l'écart-type, permettant de contrôler la largeur de l'impulsion.

L'inconvénient de l'impulsion gaussienne réside dans sa valeur moyenne non nulle, qui correspond dans le domaine fréquentiel à une composante continue importante. Par conséquent, on lui préfère généralement l'impulsion monocycle ou le doublet de Gauss.

L'impulsion monocycle est généralement modélisée comme l'opposé de la dérivée première de la fonction gaussienne. Son expression est donnée par l'équation (A.4) :

$$y_{g2}(t) = K_2 \frac{-2t}{\tau^2} e^{-(t/\tau)^2}, \quad (\text{A.4})$$

où  $-\infty < t < +\infty$ ,  $K_2$  est une constante de normalisation d'amplitude et  $\tau$  est la constante permettant d'ajuster la largeur de l'impulsion [Tay95].

La forme d'onde de la famille gaussienne la plus couramment utilisée dans les systèmes IR-ULB est la dérivée seconde de la Gaussienne [Win98]. Son expression est donnée par l'équation :

$$y_{g3}(t) = K_3 \frac{-2}{\tau^2} \left(1 - \frac{2t^2}{\tau^2}\right) e^{-(t/\tau)^2}, \quad (\text{A.5})$$

où  $-\infty < t < +\infty$ ,  $K_3$  est une constante réelle et  $\tau$  représente le paramètre permettant de contrôler la largeur de l'impulsion.

La figure A.6 illustre la représentation temporelle des impulsions gaussienne, monocycle et doublet de Gauss.

On peut remarquer que, pour respecter les masques des organismes de régulation, il conviendrait d'utiliser des impulsions de Gauss basées sur des dérivées d'ordre au moins égal à 5 pour les applications en milieu confiné et en milieu libre [She03].

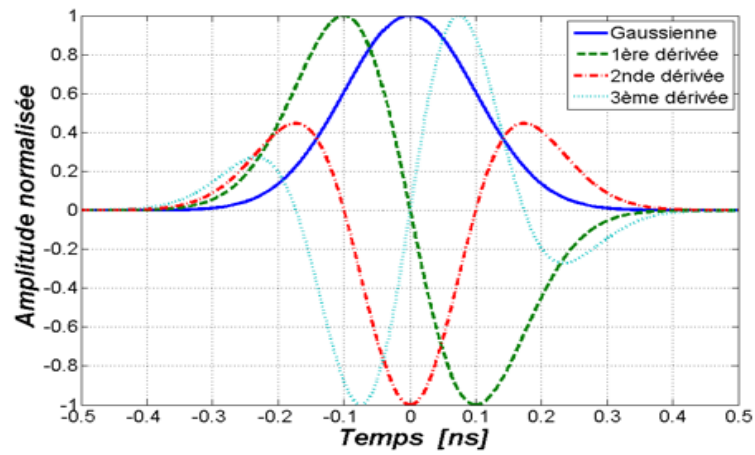


FIGURE A.6 – La représentation temporelle des impulsions gaussienne, monocycle, et doublet.

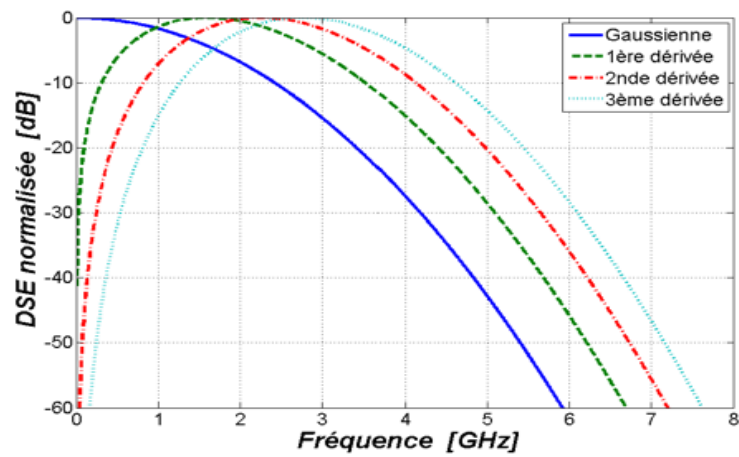


FIGURE A.7 – La représentation fréquentielle des impulsions gaussienne, monocycle, et doublet.

### A.3.2 Les polynômes orthogonaux - Fonctions de Gegenbauer Modifiées (MGF)

Par définition, une famille de polynômes  $f_n(x)$  (où  $n$  représente le degré du polynôme) est dite orthogonale sur l'intervalle de définition  $[a, b]$ , si elle satisfait la condition :

$$\int_a^b \omega(x) f_n(x) f_m(x) dx = 0, \quad (\text{A.6})$$

avec  $m$  et  $n$  des entiers non négatifs distincts, et  $w(x)$  le poids du produit scalaire généralisé. En supposant que  $w(x)$  est strictement positive sur l'intervalle de définition, l'équation (A.6) peut alors être ré-écrite sous la forme d'un produit scalaire :

$$\int_a^b f_n(x) f_m(x) dx = 0, \quad (\text{A.7})$$

L'équation (A.7) assure également que l'énergie est normalisée à l'unité, pour chaque ordre du polynôme  $m$ . Les fonctions  $f_n$  constituent alors une base orthonormée pour un espace de fonctions sur l'intervalle de définition  $[a, b]$ . Un grand nombre de familles de polynômes peut être considéré comme, par exemple, les polynômes d'Hermite classiques, ou ceux de Laguerre, Bessel et Gegenbauer.

#### Les fonctions de Gegenbauer Modifiées (MGF)

Ces formes d'onde ont été développées aux laboratoires IEMN-DOAE et IFFSTAR-LEOST pour des applications de communication [Elb01a–Elb07, Elb11a–Elb12, Mfo13]. Les polynômes de Gegenbauer sont définis sur l'intervalle  $[-1, 1]$  et satisfont l'équation différentielle du deuxième ordre suivante :

$$\begin{aligned} G_{(n,\beta)}(x) = & 2(1 + (n + \beta - 1)/n)xG_{(n-1,\beta)}(x) - \\ & (1 + (n + 2\beta - 2)/n)G_{(n-2,\beta)}(x). \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Pour être utilisable dans des systèmes de communication ULB, le signal généré à partir de ces polynômes doit être très court et demeurer borné aux extrémités de l'intervalle de définition. Pour cela, les ordres de ces polynômes  $G_n(\beta, x)$  sont multipliés par un facteur qui correspond à la racine carrée de la fonction de poids de cette famille de polynômes  $w(x, \beta)$ , définie par :

$$w(x, \beta) = (1 - x^2)^{\beta-1/2}. \quad (\text{A.9})$$

Par conséquent, l'expression modifiée devient :

$$G_u(n, \beta, x) = \sqrt{w(x, \beta)} * G(n, \beta, x). \quad (\text{A.10})$$

Les quatre premiers ordres de ces fonctions sont les suivants :

$$\begin{aligned} G_u(0, 1, x) &= 1 * (1 - x^2)^{(1/4)}, \\ G_u(1, 1, x) &= 2x * (1 - x^2)^{(1/4)}, \\ G_u(2, 1, x) &= (-1 + 4x^2) * (1 - x^2)^{(1/4)}, \\ G_u(3, 1, x) &= (-4x + 8x^3) * (1 - x^2)^{(1/4)}. \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

La représentation temporelle des quatre premières impulsions modifiées de Gegenbauer est donnée dans la figure A.8.

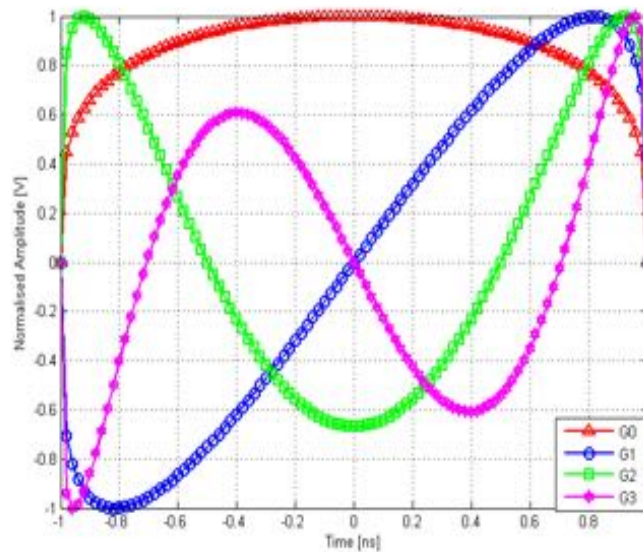


FIGURE A.8 – La représentation temporelle des quatre premières impulsions modifiées de Gegenbauer.

Dans nos études, nous avons opté pour les impulsions de Gegenbauer. En effet, les comparaisons réalisées à ce sujet dans [Elb05] montrent que les fonctions de Gegenbauer modifiées (proposées dans [Elb05]) donnent de meilleures performances en termes

de taux d'erreur par bit. IL a aussi été montré que les ordres au moins égaux à 3 des fonctions de Gegenbauer possèdent des propriétés de corrélation favorables pour la détection radar en ULB [Sak09a].

## A.4 Les techniques de modulation ULB-IR

Les techniques les plus simples de modulation, en amplitude (PAM : Pulse Amplitude Modulation) et en toutou rien (OOK : On Off shift Keying) sont rarement utilisées en ULB. On leur préfère les méthodes listées ci-dessous.

### A.4.1 Modulations associées à l'ULB-IR

Pour moduler le train d'impulsions et ainsi coder l'information à transmettre, trois principales solutions sont présentées dans la littérature.

#### A.4.1.1 La modulation de position (PPM)

La modulation PPM (Pulse Position Modulation) consiste à décaler dans le temps l'impulsion suivant le symbole à transmettre [Sch93]. L'expression d'un signal modulé en position est donnée par l'équation :

$$s(t) = \sum_{j=1}^{+\infty} m(t - jT - \delta d_j) \quad (\text{A.12})$$

$d_j$  : représente le bit émis 0 ou 1,  $\delta$  : le paramètre de décalage,  $T$  : la période de répétition,  $m(t)$  : la forme d'onde utilisée.

La figure A.9 montre un exemple de signal PPM constitué de cinq impulsions qui représentent les cinq symboles envoyés.

#### A.4.1.2 La modulation antipodale (BPSK)

La modulation BPSK (Binary Phase-Shift Keying) consiste à coder l'information par la polarité de l'impulsion [Pro00, Guv03a, Guv03b]. L'expression du signal modulé en

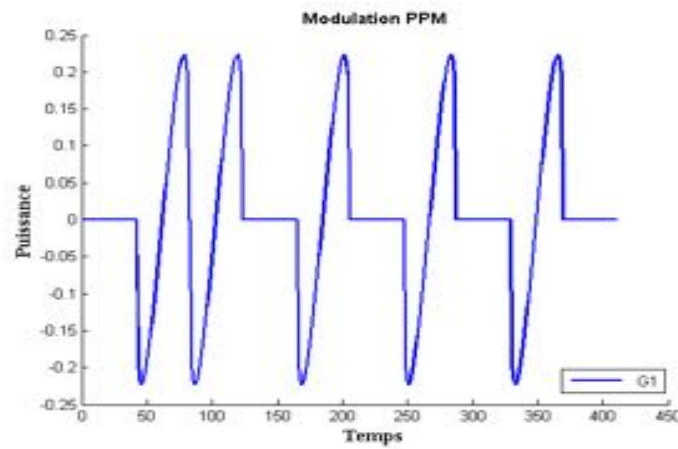


FIGURE A.9 – La modulation PPM.

BPSK est de la forme suivante :

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k m(t - kT_s), \quad (\text{A.13})$$

avec  $T_s$  : la période de répétition,  $m(t)$  : la forme d'onde utilisée,  $a_k \in \{-1, 1\}$

La figure A.10 illustre la modulation BPSK. Dans ce cas, la polarité de l'impulsion est positive si  $d_j = 1$ , et négative si  $d_j = 0$ . Cependant, cette modulation souffre

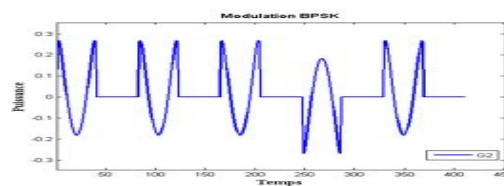


FIGURE A.10 – La modulation BPSK.

de quelques inconvénients comme l'inaptitude à fournir des modulations à nombre d'états supérieurs à deux (d'où une efficacité spectrale faible).

### A.4.1.3 La modulation d'amplitude (PAM)

La modulation PAM (Pulse Amplitude Modulation) consiste à faire varier l'amplitude des impulsions émises pour coder les différents symboles [Guv03a]. La forme du signal émis est donnée par l'expression suivante :

$$s(t) = \sum_{j=1}^{+\infty} d_j m(t - jT), \quad (\text{A.14})$$

avec  $d_j$  : un code binaire,  $T$  : la période de répétition et  $m(t)$  : la forme d'onde utilisée

Un cas particulier de la modulation PAM est la modulation en tout ou rien (OOK : On Off Keying). Cette modulation transmet pour un bit 1 une impulsion et pour un bit 0 aucun signal (0V).

## A.4.2 Les nouvelles modulations M-OAM

Cette section est dédiée à la présentation d'une nouvelle modulation nommée M-OAM (Orthogonal Amplitude Modulation), que j'ai initialement proposée et qui a été développée, entre autres, dans les travaux de thèse de Mmes Sakkila [Sak09a], Elabed [Ela12a] et Hamidoun [Ham16]. Dans le cas des nouvelles modulations M-OAM, les propriétés d'orthogonalité liées aux fonctions de Gegenbauer sont exploitées. Nous nous sommes inspirés des principes de la modulation M-QAM. Puisque la notion de porteuse n'existe pas dans le domaine impulsionnel, nous avons développé la modulation OAM en remplaçant les porteuses utilisées pour la modulation QAM par des formes d'ondes orthogonales. Comme nous le verrons par la suite, notre système offre une grande robustesse avec une faible complexité et une implémentation très simplifiée.

Le principe des modulations M-OAM consiste à moduler l'instant d'émission de l'impulsion parmi  $M$  états.  $M$  étant une puissance de 2;  $M = 2^n$  avec  $n$  entier [Ham12, Ham15, Ham16]. L'augmentation de  $n$  permet d'augmenter le nombre de bits transmis par symbole et par conséquent le débit offert. Selon la valeur de  $n$ , nous présenterons

les trois cas de modulations : 4-OAM, 16-OAM et 64-OAM ainsi que les cas particuliers de la modulation OAM : 8-OAM et 32-OAM.

#### A.4.2.1 La modulation 4-OAM

La modulation 4-OAM consiste à envoyer 2 bits/symboles. L'information du premier bit est représentée par la position., alors que celle du second bit est représentée par la phase. Il y a alors 4 possibilités pour cette modulation. Le tableau A.1 présente ces quatre possibilités de symboles 4-OAM. Dans le cas de cette modulation, une seule forme d'onde est utilisée. Nous avons choisi la fonction orthogonale  $G_1$ , bien que d'autres ordres des fonctions de Gegenbauer puissent être utilisés.

		LSB	
		0	1
MSB	0		
	1		

TABLE A.1 – Les symboles de la modulation 4-OAM.

L'équation du symbole 4-OAM est la suivante :

$$S_i(t) = (2d_{i_{MSB}} - 1)m(t + 2d_{i_{LSB}}\delta); \quad (\text{A.15})$$

avec  $d_i$  : Le symbole envoyé,  $m(t)$  : la forme d'onde utilisée,  $\delta$  : le décalage dans le temps,  $S_{i_{LSB}}$  : le bit de poids le plus faible (Least Significant Bit),  $S_{i_{MSB}}$  : le bit de poids le plus fort (Most Significant Bit).

Le signal émis s'exprime ainsi :

$$e(t) = \sum_{k=0}^N \sqrt{E_s} (2d_{2k} - 1) m(t + 2d_{2k+1}\delta + kT), \quad (\text{A.16})$$

avec  $N$  le nombre de symboles envoyés,  $T$  la période d'un symbole et  $E_s$  l'énergie d'un symbole.



Cette modulation permet de doubler le débit de communication par rapport aux procédés classiques, puisqu'on a besoin de deux fois moins de temps pour envoyer la même quantité d'information. Toutefois, il reste la question de traiter le signal au niveau de la réception afin de pouvoir le décoder.

Le signal à la sortie du canal est donné par l'équation :

$$R(t) = s(t) * h(t) + n(t), \quad (\text{A.17})$$

où  $n(t)$  est le bruit,  $s(t)$  est le signal envoyé et  $h(t)$  est la réponse impulsionnelle du canal.

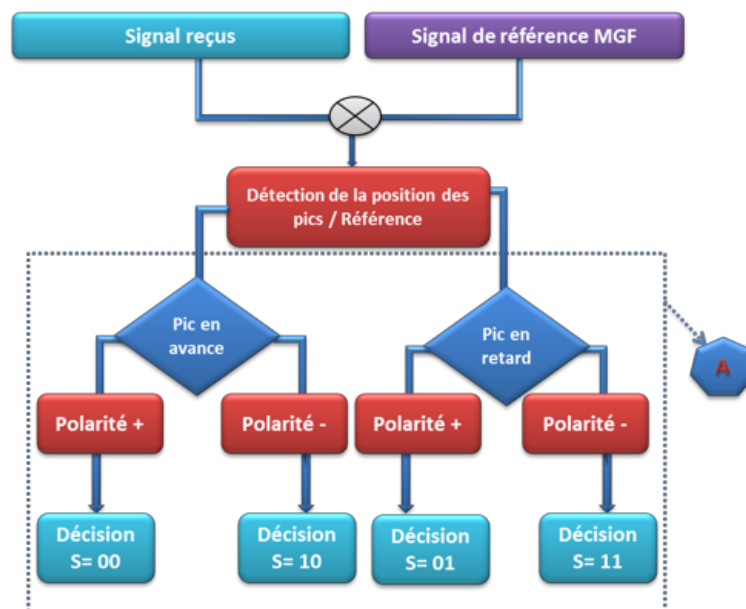


FIGURE A.11 – L'algorithme de décodage des signaux modulés en 4-OAM.

Afin de retrouver les bits envoyés, nous utilisons une méthode de prise de décision par rapport à la position du pic et sa polarité. L'algorithme décrit par la figure A.11, correspond aux étapes suivies lors du décodage des signaux modulés en 4-OAM [Ham15].

#### A.4.2.2 La modulation 16-OAM

Dans la majorité des applications de télécommunication, l'utilisation de la modulation 16-QAM est dominante. Doù notre intérêt d'établir une communication en ULB avec

la modulation nommée 16-OAM dans le souci d'avoir un débit plus important. Cette modulation consiste à envoyer 4 bits/symbole. Chaque sous-symbole est codé de la même manière que la 4-OAM. Le 3<sup>ème</sup> degré de liberté nécessaire est obtenu en utilisant deux formes d'ondes orthogonales  $G_1$  et  $G_2$ . Les trois degrés de liberté (polarité, phase et forme d'onde) permettent un ajustement du débit utile à transmettre.

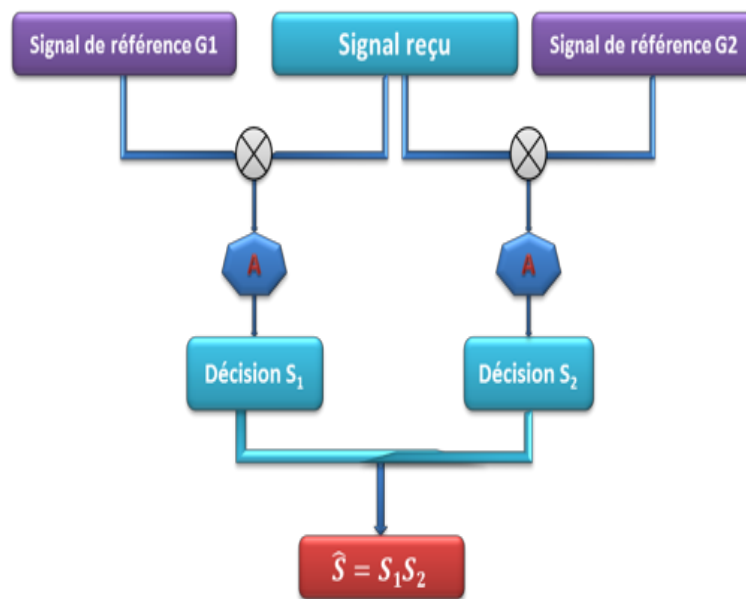


FIGURE A.12 – L'algorithme de décodage des signaux modulés en 16-OAM.

Au niveau de la réception, les données transmises sont donc restituées grâce à deux corrélations du signal reçu avec les deux impulsions de référence suivies d'une détection des pics et de leurs indices (voir figure A.12).

#### A.4.2.3 La modulation 64-OAM

Dans le cas de la modulation 64-OAM, 6 bits sont envoyés par symbole. Le signal envoyé est composé de 3 sous-symboles, chaque sous-symbole est composé d'une combinaison de position et de phase et représenté par un ordre de polynôme de Gegenbauer différent de celui du sous-symbole suivant. Trois ordres sont donc utilisés dans ce cas

( $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$ ). Le tableau A.2 présente les symboles obtenus par la modulation 64-OAM [Ham15].

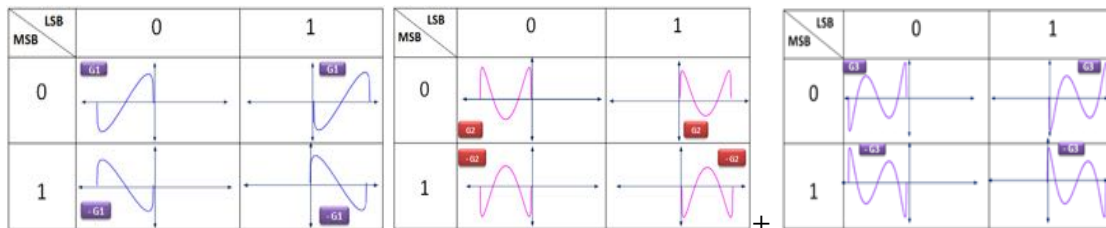


TABLE A.2 – Les symboles de la modulation 64-OAM.

Pour la conception des deux cas particuliers de la modulation M-OAM à savoir 8 – OAM et 32 – OAM, nous utilisons le troisième degré de liberté. Pour 8 – OAM par exemple, les deux premiers bits seront modulés avec la modulation 4 – OAM avec la forme d’onde  $G_1$  et le dernier bit sera modulé en PPM avec la forme d’onde  $G_2$ . Nous obtenons donc 8 combinaisons possibles.

Pour la modulation 32-OAM, 5 bits sont envoyés par symbole. Les quatre premiers bits seront modulés en 4-OAM avec les formes d’onde  $G_1$  et  $G_2$  et le cinquième bit sera modulé en PPM avec la forme d’onde  $G_3$ .

La figure A.13 illustre les performances de la modulation M-OAM en termes de taux d’erreur par bit (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) dans un canal à bruit blanc gaussien (AWGN) dans l’hypothèse d’une synchronisation parfaite, (pour  $M = \{4, 16, 64\}$ ).

On note que, pour une faible valeur du paramètre  $M$ , la modulation est plus robuste au bruit. Toutefois, le débit de données offert par cette modulation reste trop limité pour certaines applications. Le recours aux modulations 16 – OAM et 64 – OAM est alors nécessaire et efficace pour peu que le SNR soit suffisamment élevé. Par conséquent, nous devons effectuer, comme il est d’usage en télécommunications, un compromis entre la qualité de la communication exigée et le débit de données souhaité.

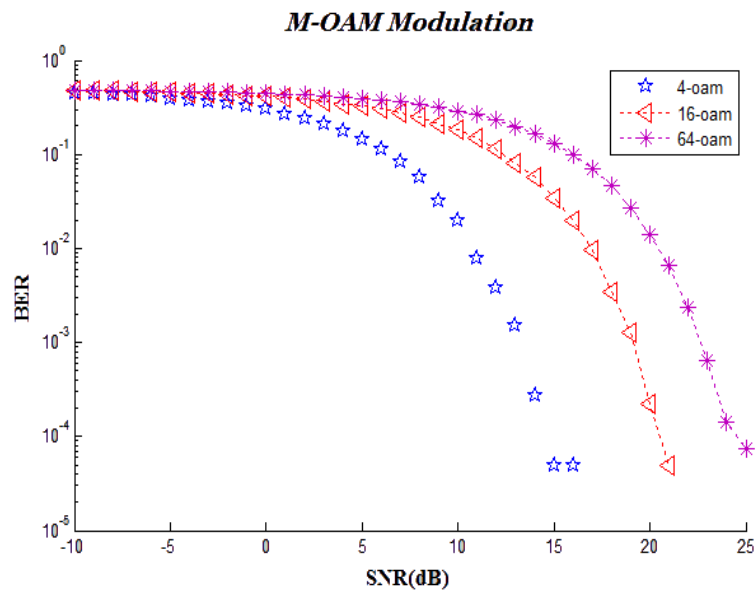


FIGURE A.13 – Performances des modulations M-OAM en terme de BER.

### A.4.3 Les techniques de multiplexage proposées

Ces techniques, proposées dans ma thèse de doctorat, ont été développées dans le cadre de la thèse de Mr. Tahri pour les applications radar ULB. L'objectif de ce travail est de proposer un radar coopératif basé sur la technologie ULB pour les trains d'un réseau ferroviaire. Ce système permet à la fois la localisation précise des trains par rapport à l'infrastructure environnante, la communication très haut débit train-infrastructure, la détection et l'identification des obstacles sur les voies.

Pour ce faire, des codes de différentes longueurs seront utilisés. Le premier, plus long, sera dédié à la localisation et le deuxième, plus court, à l'étalement des données de communication. Nous utilisons des codes pseudo-aléatoires de longueurs différentes issus de la même famille.

L'orthogonalité des codes de localisation permettra d'éviter toute interférence entre utilisateurs. La longueur de ces codes doit être choisie de façon à ce que l'on puisse atteindre les portées les plus grandes possibles avec un faible rapport signal à bruit. On remarque qu'un code plus long engendrera un alourdissement du traitement et nécessitera donc une puissance de calcul accrue. Pour cela nous avons déterminé par simulation que le choix d'un code de longueur  $L_{c1} = 1023$  représente un parfait com-

promis entre performances et puissance de calcul nécessaire. Le second code dédié à l'étalement aura une longueur  $L_{c2} = 31$ .

Le schéma de la figure A.14 montre l'architecture interne du système.

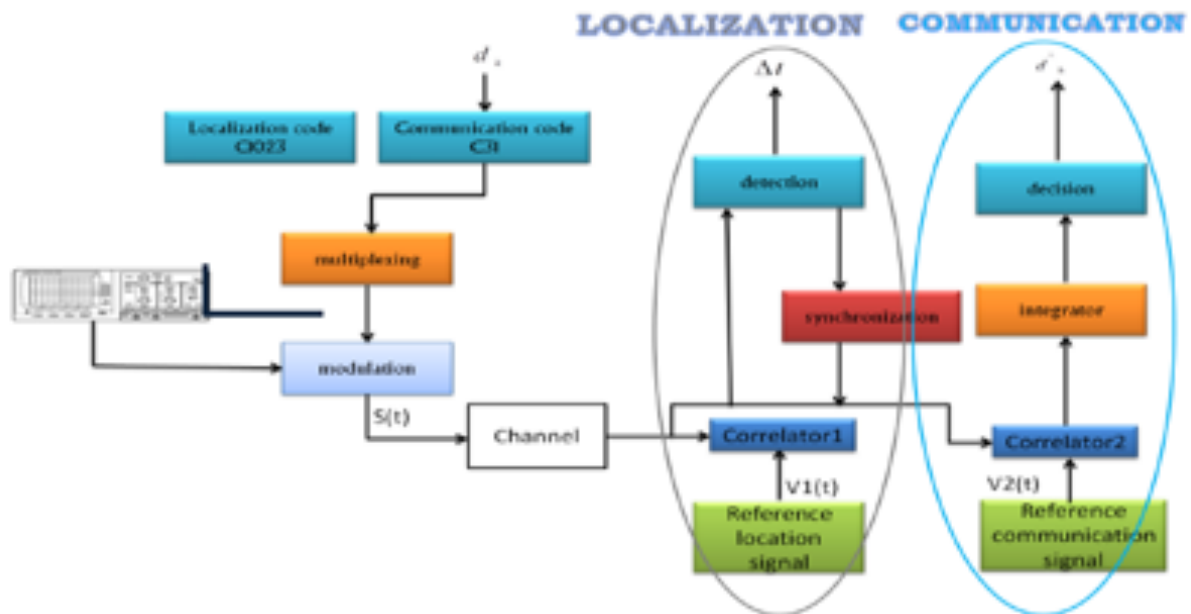


FIGURE A.14 – Architecture interne du système proposé.

#### A.4.3.1 La technique de simple étalement ULB

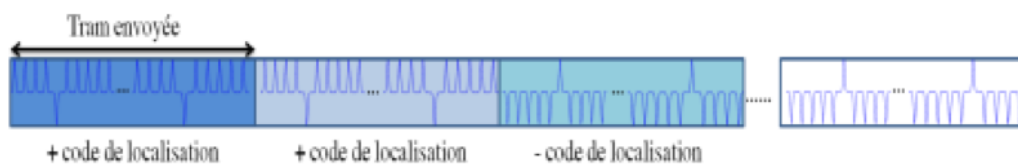


FIGURE A.15 – Signal envoyé avec la technique simple étalement.

Cette technique est inspirée du principe de la DS-CDMA. Elle consiste à étaler les données de communication par le code de localisation et de moduler par une forme d'onde ULB, de façon que le signal envoyé soit constitué d'une suite de codes modulés qui porte l'information de communication (Voir figure A.15).

Après la réception, une corrélation entre le signal reçu et le signal de référence (le code modulé) est calculée. La position du pic de corrélation permet de déterminer la position de la cible, et sa polarité permet d'extraire le bit de donnée envoyé comme le montre la figure A.16.

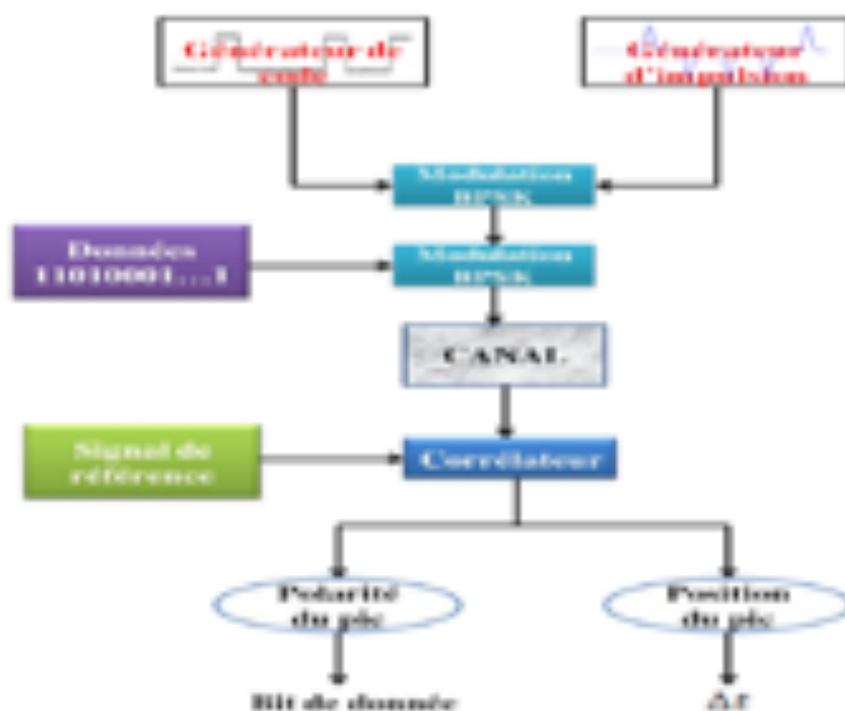


FIGURE A.16 – Algorithme de la chaîne de transmission avec la technique simple étalement.

Cette technique est très facile à mettre en œuvre, mais son grand inconvénient est un débit qui reste très faible par rapport au débit souhaité pour nos systèmes. D'où le développement d'autres techniques qui permettront d'améliorer ce débit en maintenant une bonne qualité de transmission

#### A.4.3.2 La technique d'étalement séquentiel de spectre à deux codes ULB (ESS2-ULB)

Cette technique consiste à séparer les deux signaux de localisation et communication par une répartition par code. La trame sera divisée en deux périodes, la première constituée du code de localisation C1023, et la deuxième des données de communication codés par le code C31 (Voir figure A.17).

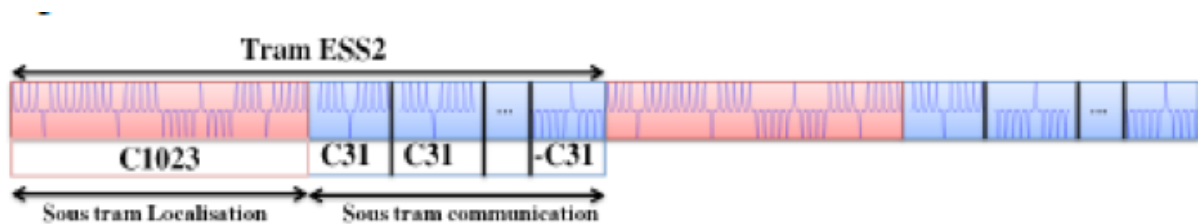


FIGURE A.17 – Signal envoyé avec la technique ESS2.

A la réception, deux corrélations du signal reçu doivent être calculées. La première, est la corrélation avec le code de localisation modulé appelé signal de référence 1. Le pic résultant nous permet de calculer la distance qui nous sépare du train, puis de synchroniser la procédure de communication en détectant la position de la trame. Après synchronisation, la deuxième corrélation est effectuée entre le signal reçu et le signal de référence 2 (obtenu en modulant le code de communication par la même forme d'onde), ce qui nous permettra d'extraire les bits de données envoyés. (cf. figure A.18)

Cette technique présente plusieurs avantages tels que la simplicité d'implémentation et la bonne qualité de transmission. Cependant, son débit reste toujours insuffisant pour les applications visées par notre système.

#### A.4.3.3 La technique CPM-ULB (Code Position Modulation)

Cette technique est basée sur le même principe de multiplexage temporel que l'ESS2, sauf que CPM-ULB consiste à diviser la trame de communication en plusieurs sous-trames, et à traiter les données par bloc de  $n$  bits. Dans ces blocs, la valeur des bits déterminera la polarité et la position du code C31 dans chaque sous trame. Si le premier bit est 1 cela signifie une polarité positive, s'il s'agit d'un 0 la polarité du code sera négative.

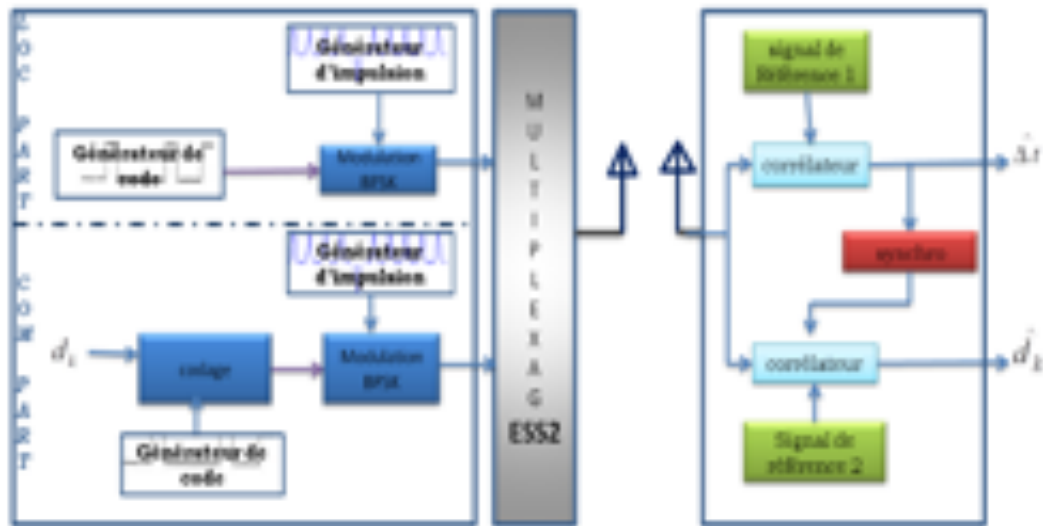


FIGURE A.18 – Algorithme d’émission et de réception de la technique ESS2.

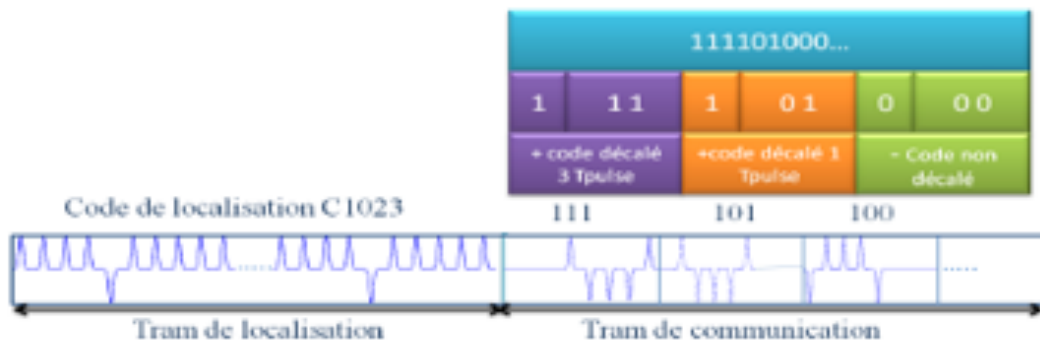


FIGURE A.19 – Trame générée avec la technique CPM.



Cette technique présente comme inconvénient une longueur de la sous-trame de communication dépendante du nombre de bits par bloc.

#### A.4.3.4 La technique $2\pi M$ -ULB

$2\pi M$ -ULB recourt au même principe de multiplexage mais, avec un codage de données différent. En effet, ce codage consiste à subdiviser les données en blocs de  $n$  bits. Le bit de poids fort détermine la polarité du code C31 et les  $n - 1$  bits de poids faible déterminent le nombre de rotations que le code subira (Voir figure A.20).

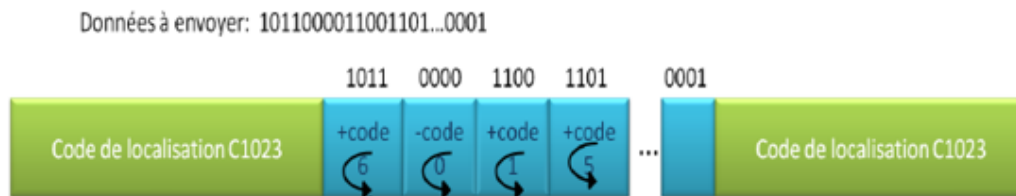


FIGURE A.20 – Signal envoyé codé par la technique  $2\pi M$ -ULB.

A la réception, une première intercorrélacion linéaire entre le signal reçu et le signal de référence 1 est réalisée pour détecter le pic qui permettra la localisation ainsi que la synchronisation du signal. Puis une deuxième intercorrélacion circulaire du signal reçu synchronisé et du signal de référence 2 est effectuée. On subdivise le signal résultant en blocs de longueur  $N$ . Donc le signe du pic représente le bit du poids le plus fort et sa position représente les bits restants.

#### A.4.3.5 La technique $2\pi$ CPM

Comme dans les deux dernières techniques, la  $2\pi$  CPM utilise deux sous-frames, l'une de localisation suivie de celle de communication, mais avec un codage différent. En effet, on associe les bits par groupes de  $n$  bits, le bit de poids fort détermine la polarité du code  $C31$  et les  $k$  bits qui suivent déterminent le nombre de rotations que le code va subir et les  $n - k - 1$  bits restant détermineront le décalage du code dans la sous-trame de communication.

Technique	Débit (Mbits/s)	SNR (dB) pour $BER = 10^{-4}$	Complexité
Simple étalement	1,95	NC	+
ESS2	32,25	-9,5	+
CPM	108,10	-8.5	++
$2\pi M$	161,29	-9.5	+++
$2\pi$ CPM	194,59	Non atteint	++++

TABLE A.3 – Comparaison des performances des techniques étudiées.

Le tableau récapitulatif A.3 présente un comparatif de toutes les techniques précédemment présentées.

#### A.4.3.6 Les techniques de multiplexage "haut débit"

Dans le but d'atteindre une transmission à très haut débit, d'autres techniques de multiplexage ont été développées. Leur principe se base sur un multiplexage temporel comme les précédentes techniques hybridées aux modulations ULB et les modulations haut débit M-OAM présentées précédemment.

\* La technique  $2\pi PSM$

Cette technique est basée sur la modulation PSM (Pulse Shape Modulation) et la technique  $2\pi M$ , comme suit :

Pour la  $2 - 2\pi PSM$  : On regroupe les données en blocs de  $n$  bits. Le bit de poids fort détermine la polarité du code C31 et le 2ème bit désigne la forme d'onde à utiliser (le bit '1' pour  $G_0$  et '0' pour  $G_1$ ) et les  $n - 2$  bits de poids faible restants déterminent le nombre de rotations que le code subira.

Pour la  $4 - 2\pi PSM$  : On regroupe les données en blocs de  $n$  bits. Le bit de poids le plus fort détermine la polarité du code C31 et les deux bit de poids fort qui suivent désignent chacun une forme d'onde à utiliser (le bit '1' pour  $G_0$  et '0' pour  $G_1$ ) pour synthétiser les deux bits successifs et les  $n - 3$  bits de poids faible restants déterminent le nombre de rotations que le code subira.

Pour extraire les informations, une première corrélation linéaire entre le signal reçu et le signal de référence 1 est calculée, comme pour les autres techniques. Puis, deux

corrélations sont calculées pour  $4 - 2\pi PSM$ , la première entre le signal reçu synchronisé et le code de communication C31 modulé par la première forme d'onde  $G_0$ , la deuxième du signal reçu synchronisé avec le code de communication C31 modulé par le deuxième forme d'onde  $G_1$ .

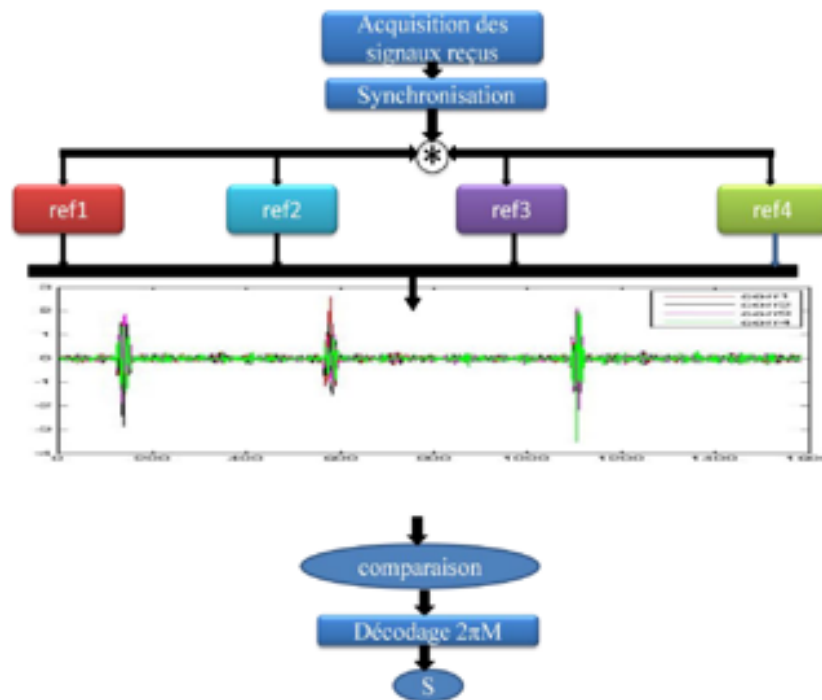


FIGURE A.21 – Algorithme de réception de la technique  $4 - 2\pi PSM$ .

Pour la  $4 - 2\pi PSM$ , on aura quatre corrélations à calculer entre le signal reçu synchronisé et la référence correspondant à chaque forme d'onde, comme illustré dans la figure A.21.

\* Technique  $M - 2\pi OAM$  à 2 séquences :

Son principe est toujours d'envoyer deux sous-trames. Le premier étalement sera effectué avec le code de localisation C1023 dans la première sous-trame, dans la seconde, les données seront codées et étalées de la façon suivante :

On regroupe les bits de communication à envoyer par blocs de  $M * n$  bits. Puis, on regroupe les bits de chaque bloc en sous-blocs de  $n$  bits, donc on obtiendra  $M$  sous-

blocs. On code chaque sous-bloc avec la technique  $2\pi M$ . Ensuite, on module chaque sous-bloc codé avec une forme d'onde de la famille choisie (modulation BPSK). Enfin, on somme les  $M$  sous-blocs. La figure A.22 illustre le principe de codage de la technique  $2\pi OAM2$ .

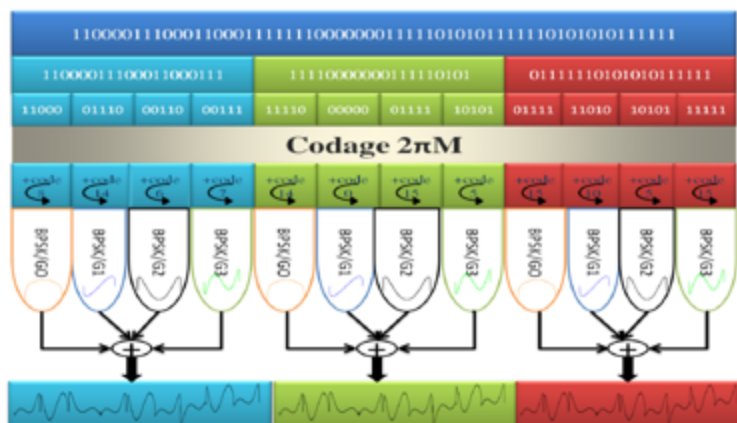


FIGURE A.22 – Principe de la technique  $2\pi OAM2$ .

A la réception, on calcule la première corrélation avec le signal de référence 1, comme pour les techniques précédentes afin de localiser la cible et pour synchroniser la trame de communication. Ensuite, on calcule  $M$  corrélations du signal reçu synchronisé avec les  $M$  signaux de référence (chaque signal de référence est le code de communication C31 modulé en BPSK par une forme d'onde utilisée à l'émission). Le décodage  $2\pi M$  des signaux résultants permet l'extraction des symboles envoyés. La figure A.23 montre l'algorithme de réception pour  $M = 4$  avec les quatre premiers ordres de la fonction de Gegenbauer.

\* Technique  $M - 2\pi OAM$  à une seule séquence :

La  $2\pi OAM1$  s'appuie sur le même principe que la technique précédente. Cependant, la particularité de cette technique est l'absence de multiplexage temporel des deux fonctionnalités, de manière à sommer le code de localisation avec les données de communication grâce à l'orthogonalité des codes et des formes d'onde MGF, comme l'illustre la figure A.24. A la réception, la première corrélation entre le signal reçu avec le code de localisation modulé par un des ordres de MGF permettra de localiser le train et de synchroniser la sous-trame de communication afin de récupérer les données envoyées.

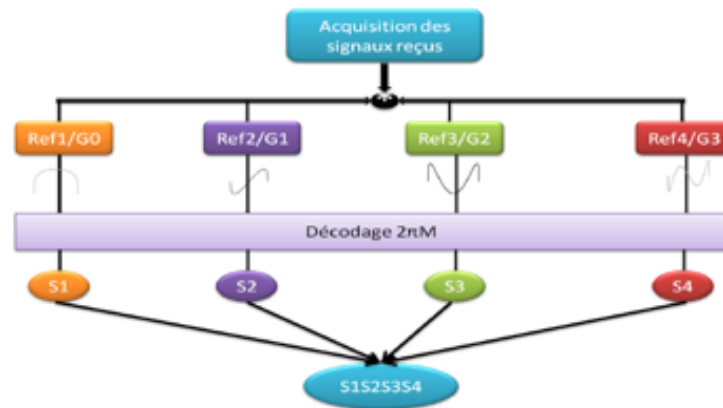


FIGURE A.23 – Algorithme de réception de la technique  $2\pi OAM2$ .

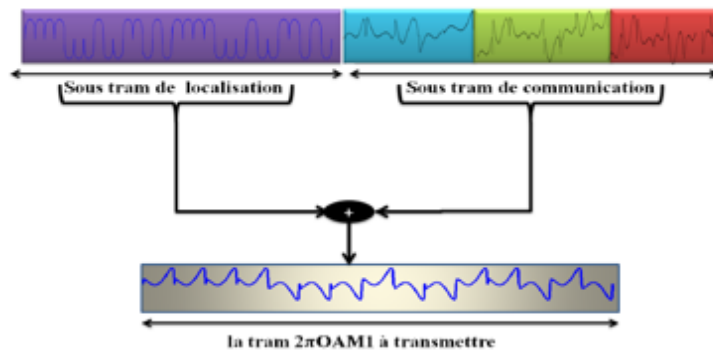


FIGURE A.24 – Signal envoyé codé par la technique  $2\pi OAM1$ .

Ensuite, on effectue les  $M$  corrélations pour décoder les données comme le montre la figure A.25. Ainsi, la technique  $2\pi OAM1$  a permis d'atteindre un débit de 1 Gbits/s.

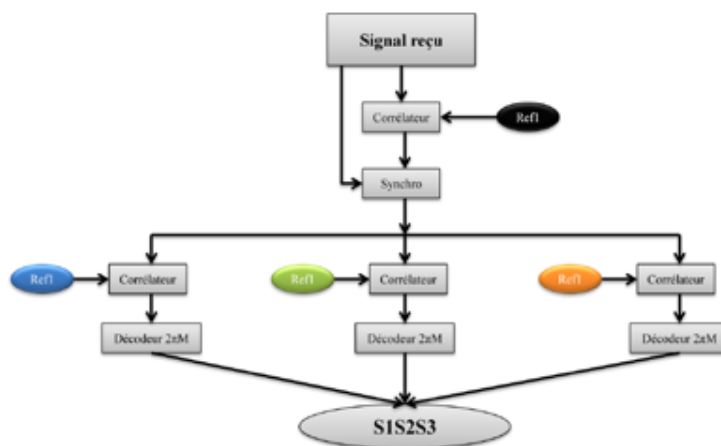


FIGURE A.25 – Algorithme de réception de la technique  $2\pi OAM1$ .

La figure A.26 montre une comparaison en terme de taux d'erreur binaire. Toutes les techniques dites "à haut débit" permettent une bonne transmission avec un BER supérieur à  $10^{-3}$ , mais avec une dégradation de performances pour les ordres supérieurs des techniques utilisant la modulation OAM, notamment la  $2\pi OAM$ , ce qui fait partie des inconvénients de cette modulation.

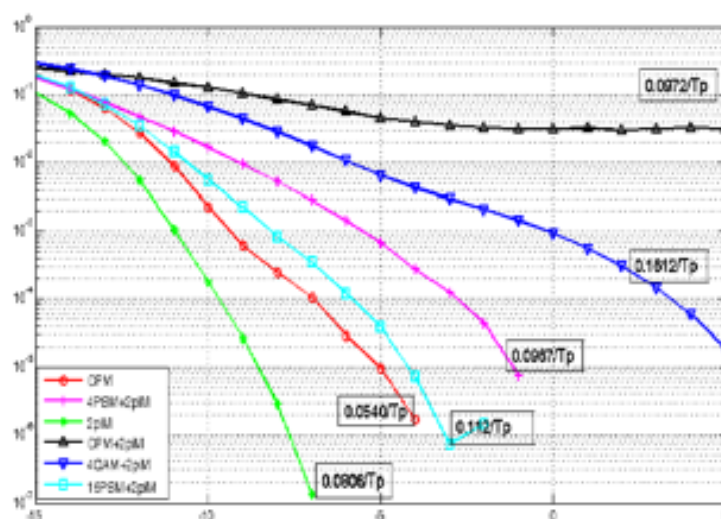


FIGURE A.26 – Résultats  $BER$  en fonction du  $SNR$  pour la technique  $2\pi OAM1$ .

En conclusion, les premières techniques, notamment l'ESS2, la CPM et la  $2\pi M$  permettent une très bonne communication mais leur débit reste faible.

Dans cette optique, nous avons proposé d'autres techniques dites "haut débit", qui sont des techniques hybrides entre des modulations ULB et les techniques de multiplexage faible débit, ce qui nous a permis d'atteindre un débit de 1 Gbits/s avec une bonne qualité de transmission pour la technique  $2\pi OAM1$ .

## A.5 Réalisations expérimentales

Cette section est consacrée aux réalisations expérimentales réalisées dans le but de valider les résultats obtenus en théorie et en simulation. Nous décrivons d'abord le dispositif expérimental, puis nous présentons les principes ainsi que les résultats de mesures.

### A.5.1 Le dispositif expérimental

La structure générale d'un système de communication ULB est présentée à la Figure A.27.

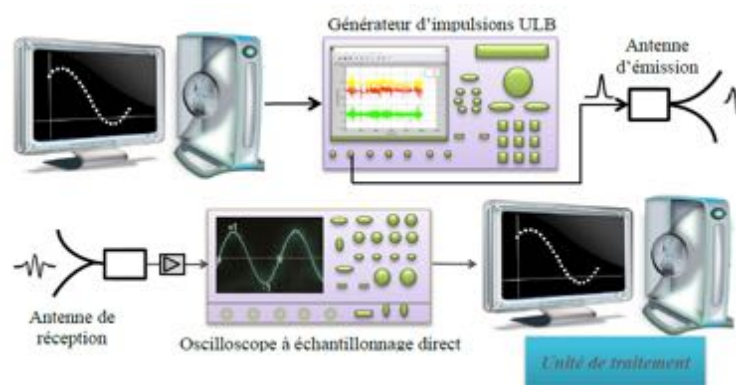


FIGURE A.27 – Schéma synoptique du système de communication ULB réalisé.

Ce système est composé d'un générateur arbitraire permettant de produire des impulsions ultra large bande et d'une antenne émettrice. Le récepteur comprend une

antenne, un préamplificateur à faible bruit thermique, un oscilloscope et un ordinateur pour effectuer le traitement. Le signal envoyé est conçu dans le logiciel Matlab et transféré vers le générateur.

#### A.5.1.1 Le générateur

L'originalité de ce générateur est la possibilité de lui transmettre les signaux à envoyer aux antennes émettrices par le biais du réseau informatique local, ce qui nous a permis de tester plusieurs signaux modifiables à volonté.

Les caractéristiques du générateur

- Le type AWG7102.
- La largeur de bande des impulsions générées dépasse les 3 GHz avec une résolution de 1 ps.
- La fréquence d'échantillonnage atteint 10 Géch/s sur 2 canaux ou 20 Géch/s sur un canal.
- La profondeur de 10 bits.

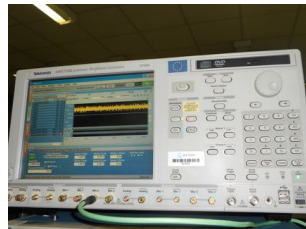


FIGURE A.28 – Le générateur d'impulsions.

#### A.5.1.2 Les antennes

- Les antennes Vivaldi :

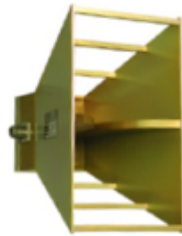
Les antennes cornet utilisés sont de type Vivaldi SAS-571 (voir figureA.29).

Caractéristiques des antennes Vivaldi

- Type : directionnel



- Champ de rayonnement maximal : 200 V/m
- La bande de fréquences : 700 MHz - 18 GHz
- Le facteur d'antenne : de 22 à 44 dB
- Le gain : de 1.4 à 15 dBi
- Puissance maximale continue : 300 Watts
- Impédance :  $50\Omega$



(a) Antenne Vivaldi (b) Antenne biconique

FIGURE A.29 – Les types d'antennes.

- Les antennes biconiques :

Les antennes biconiques utilisées sont de type omnidirectionnel RS0460 (voir figureA.29).

Caractéristiques des antennes biconiques :

- Type : omnidirectionnel
- La bande de fréquences : de 0,4 GHz à 6 GHz
- Le facteur d'antenne : de 25 à 44 dB/m
- Le gain : de  $-3$  à 3 dBi
- Puissance maximale continue : 100 Watts
- Impédance :  $50\Omega$

### A.5.1.3 L'amplificateur

Un amplificateur de type BBV 9742 est placé à la sortie de l'antenne réceptrice et avant la voie d'entrée de l'oscilloscope pour adapter le signal à la réception (voir figure A.30). Caractéristiques de l'amplificateur

- Type : BBV 9742
- Alimentation : 12 - 15 V / 100 mA
- Bande de fréquences : 9 kHz - 4 GHz
- Facteur de bruit : 4,5 dB
- Impédance entrée/sortie :  $50\Omega$



FIGURE A.30 – L'amplificateur.

### A.5.1.4 L'oscilloscope

L'oscilloscope utilisé est de type LeCroy WaveMaster 8620A. Il permet l'acquisition des signaux avant le traitement informatique (FigureA.31). L'oscilloscope est piloté par une unité de traitement qui extrait et traite les résultats des différents tests à partir des fichiers Matlab générés par l'oscilloscope [Elh06].

Caractéristiques de l'oscilloscope :

- Série TDS6124C de Tektronix
- Largeur de la bande passante 6 GHz
- Fréquence d'échantillonnage 20 Géch/s sur 4 canaux

- Mémoire standard de 64 Mpts/canal
- Résolution 8 bits
- Sensibilité entre 2 mV et 1 V/div

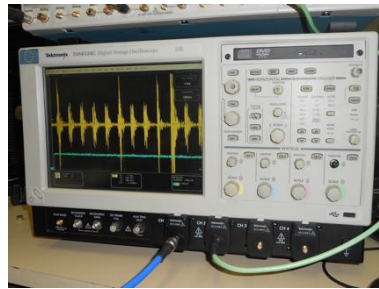


FIGURE A.31 – L'oscilloscope.

## A.5.2 Résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats obtenus lors des différents tests réalisés sur les modulations M-OAM et les techniques de multiplexage proposées. Les mesures ont été effectuées en indoor dans le laboratoire IEMN/DOAE afin de prendre en compte les effets des équipements et du canal réel.

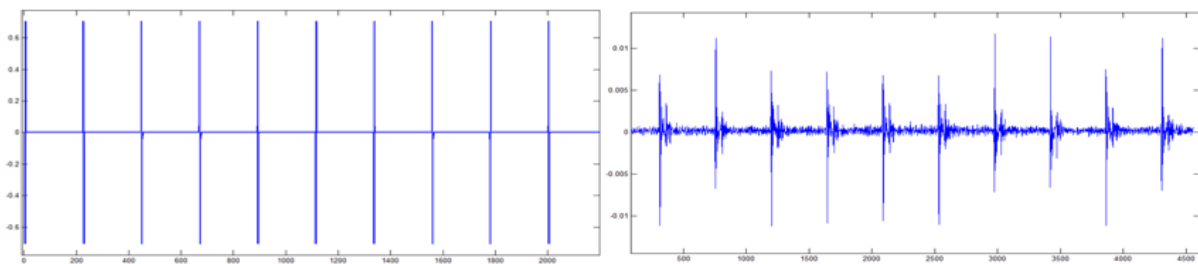
### A.5.2.1 Le système M-AOM

Les signaux M-OAM sont construits sous forme de paquets de 180 symboles de données. Les formes d'onde utilisées sont généralement des fonctions de Gegenbauer modifiées de largeur 2 ns. Le symbole est constitué de 111 échantillons et sa durée est de l'ordre de 5,5 ns. Afin de prévoir l'étalement et les déformations de l'impulsion dues aux antennes, nous avons en effet élargi la taille d'un symbole, d'où cette durée de 5,5 ns. Le système de réception comporte un oscilloscope à échantillonnage direct à 20 Géch/sec, 6 GHz de largeur de bande et 8 bits de précision. L'émetteur et le récepteur sont dans le même axe et à une distance de 4m l'un de l'autre.

Pour palier le problème de synchronisation émetteur/récepteur, nous avons ajouté une séquence d'apprentissage au début de chaque paquet. Cette séquence est une série

d'impulsions monocycles, modulée en BPSK et envoyées dans les antennes mises face à face et éloignées d'une distance raisonnablement faible afin de subir principalement les déformations dues à ces dernières. Cette séquence d'apprentissage reçue nommée désormais référence 1 sera utilisée dans la corrélation avec le signal reçu. La séquence d'apprentissage est de longueur raisonnable (31 chips).

La figure A.32 montre un exemple d'une séquence d'apprentissage émise figure A.32(a) et acquise figure A.32(b).



(a) La séquence d'apprentissage transmise

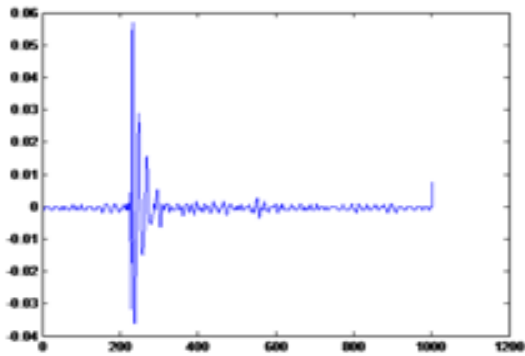
(b) La séquence d'apprentissage reçue

FIGURE A.32 – La séquence d'apprentissage.

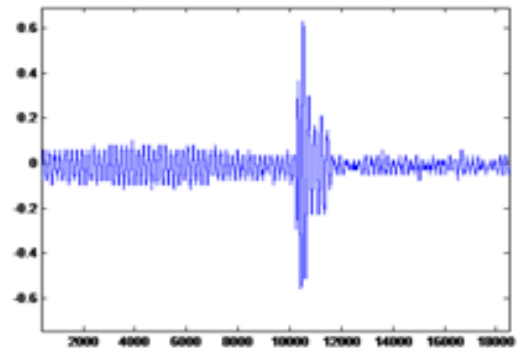
Afin de récupérer les données de notre système M-OAM, le signal reçu est corrélé en premier lieu avec le signal de référence 1 (la séquence d'apprentissage). Cette première corrélation a pour but de déterminer le début de chaque trame. Ensuite, nous calculons une deuxième corrélation du signal après synchronisation avec le signal de référence 2 qui est une forme d'onde MGF. Nous détectons ainsi les pics qui nous permettent de retrouver les données et par la suite d'évaluer les performances du système.

Les figures A.33 a et A.33 b représentent la forme du signal de référence G1 et G2, respectivement reçus après passage par les deux antennes mises face à face et séparées d'une distance raisonnablement faible.

Nous avons commencé les tests expérimentaux avec le système le plus simple, celui basé sur la modulation 4-OAM. Une série de symboles est envoyée avec des données binaires aléatoires. Les signaux à l'émission et à la réception sont illustrés sur la figure A.34(a) et la figure A.34(b) successivement. Les tests sont effectués en utilisant des antennes biconiques à l'émission et à la réception.

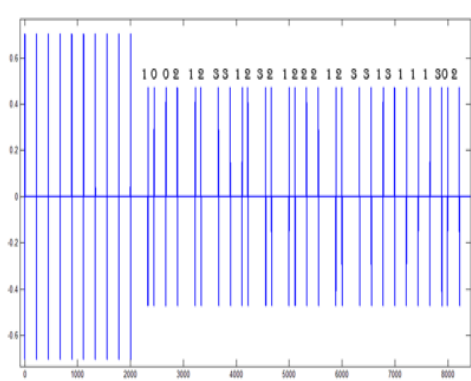


(a) Le signal de référence G1

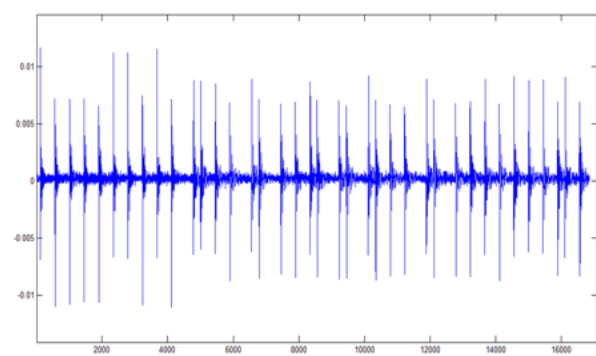


(b) Le signal de référence G2

FIGURE A.33 – La référence 2.



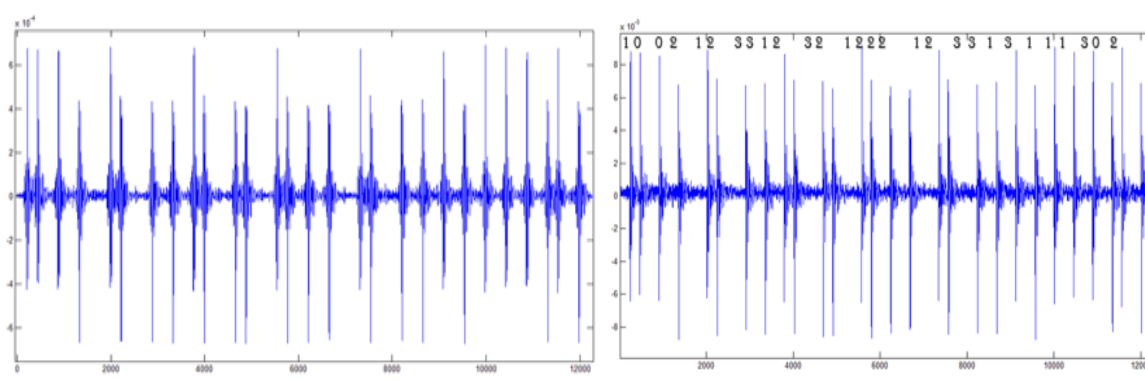
(a) Le signal 4-OAM émis



(b) Le signal 4-OAM reçu

FIGURE A.34 – La modulation 4-OAM.

Une fois l'étape de la synchronisation franchie, nous avons conservé uniquement la partie données de notre trame. Pour la récupération des données, nous procédons par une corrélation, suivie d'une détection. Le résultat de corrélation entre le signal après synchronisation et la référence 2 (ici  $G_1$ ) est donné par la figure A.35.



(a) Le signal 4-OAM après corrélation

(b) Le signal 4-OAM après détection

FIGURE A.35 – Le signal 4-OAM final.

Ainsi, nous avons effectué plusieurs tests pour les différentes modulations M-OAM et validé notre système en environnement réel.

### A.5.2.2 Mesures et expérimentations des nouvelles techniques de multiplexage

Ces tests rentrent dans le cadre de la thèse de Mr. Tahri. Le but de notre système est de localiser une cible (un train dans le cas réel) et de communiquer selon le principe d'un interrogateur/répondeur (voir figure A.36). Ainsi, nous aurons besoin dans nos mesures de deux générateurs de forme d'onde, d'un oscilloscope, de 4 antennes ainsi que d'une unité de traitement en temps réel qui permettra, au niveau du répondeur, de récupérer la première trame, d'en extraire les données et finalement d'intégrer les nouvelles données à transmettre dans la trame avant de la renvoyer vers l'interrogateur.

Le matériel expérimental disponible ne nous a permis pas d'adopter ce principe. Par suite, nous avons décidé de remplacer la deuxième antenne émettrice par un obstacle réfléchissant le signal envoyé directement vers l'antenne réceptrice de l'interrogateur,

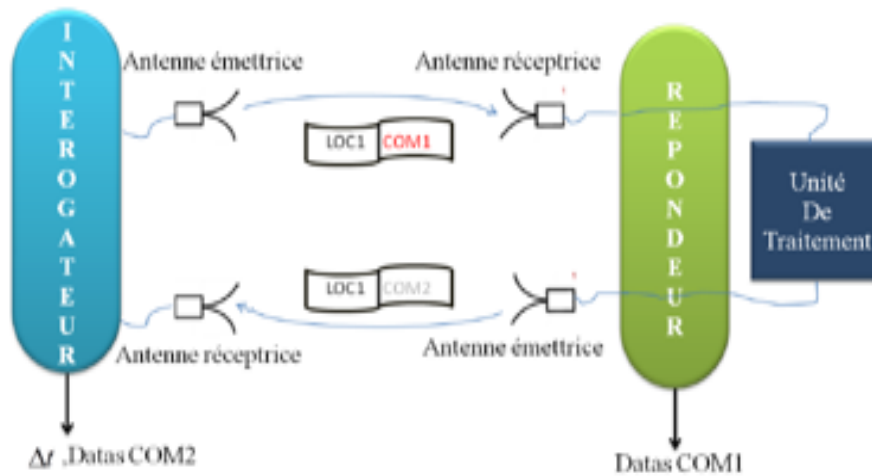


FIGURE A.36 – Schéma descriptif du système interrogateur/répondeur.

ainsi que de faire un traitement en temps différé pour récupérer les données au niveau du répondeur. La figure A.37 illustre le nouveau principe adopté pour effectuer les mesures.

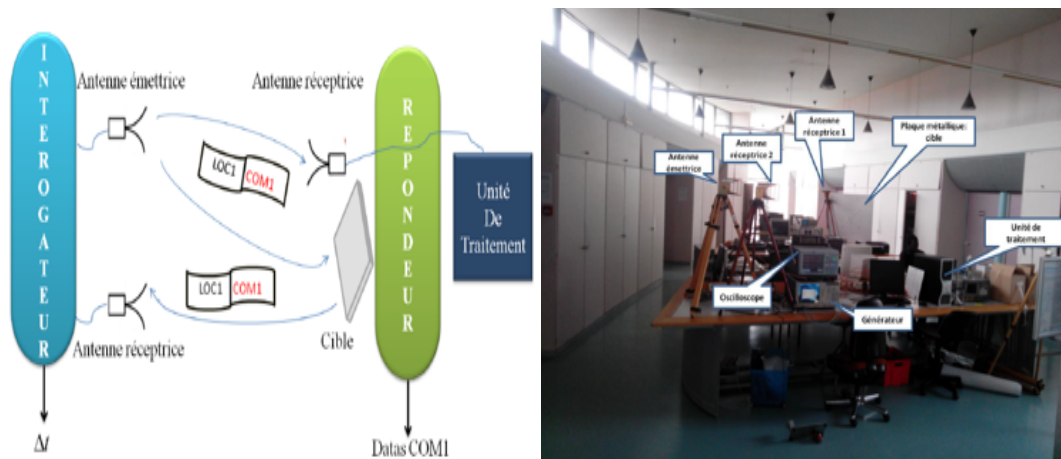
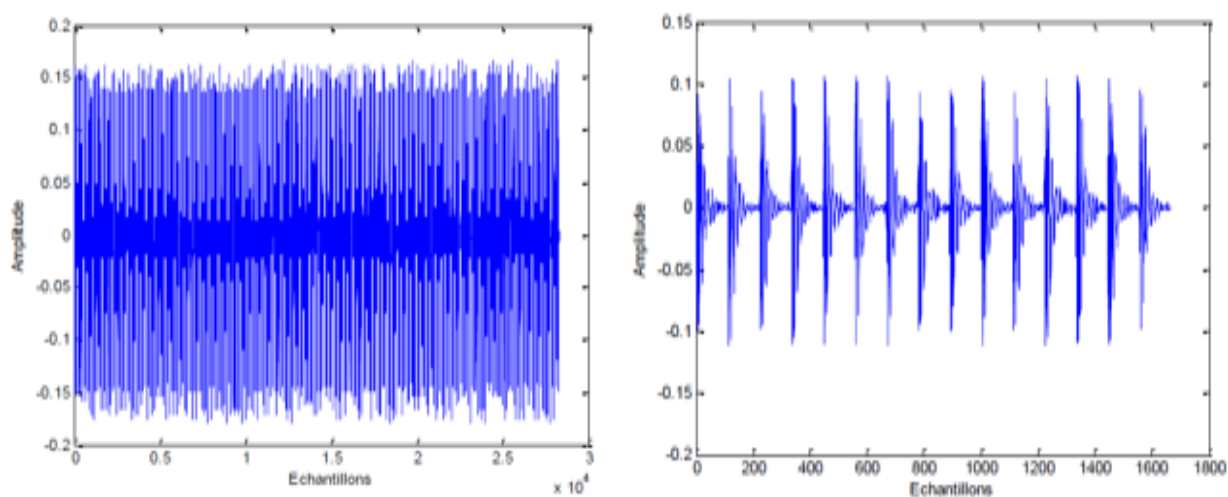


FIGURE A.37 – Schéma descriptif du système interrogateur/répondeur modifié.

Pour chacune des techniques de multiplexage proposées précédemment, nous avons envoyé une trame composée d'un code de localisation de type pseudo-aléatoire de longueur 255 bits et des données codées selon la technique étudiée avec un code de même type et de longueur 15 bits. Ces données représentent la conversion en binaire

d'un mot ou d'une phrase que nous définissons à l'entrée de notre interrogateur. Le changement de la longueur de la phrase à transmettre illustre la différence de flux offert d'une technique à une autre.

L'algorithme général de réception est illustré dans la figure A.39 ci-dessous. Donc, après réception, une première corrélation avec le signal de référence 1\* (Fig.A.38a) est calculée afin de se synchroniser avec le début de la trame, ensuite la deuxième corrélation du signal reçu synchronisé avec le signal de référence 2† (Fig.A.38b) permettra au bloc de détection de données, qui varie d'une technique à une autre, d'extraire les données transmises.



(a) Référence pour la localisation (référence 1) (b) Référence pour la communication (référence 2)

FIGURE A.38 – Les références.

\*. le code de localisation reçu est modulé en BPSK avec une impulsion monocycle

†. le code de communication reçu est modulé en BPSK avec la forme d'onde convenable



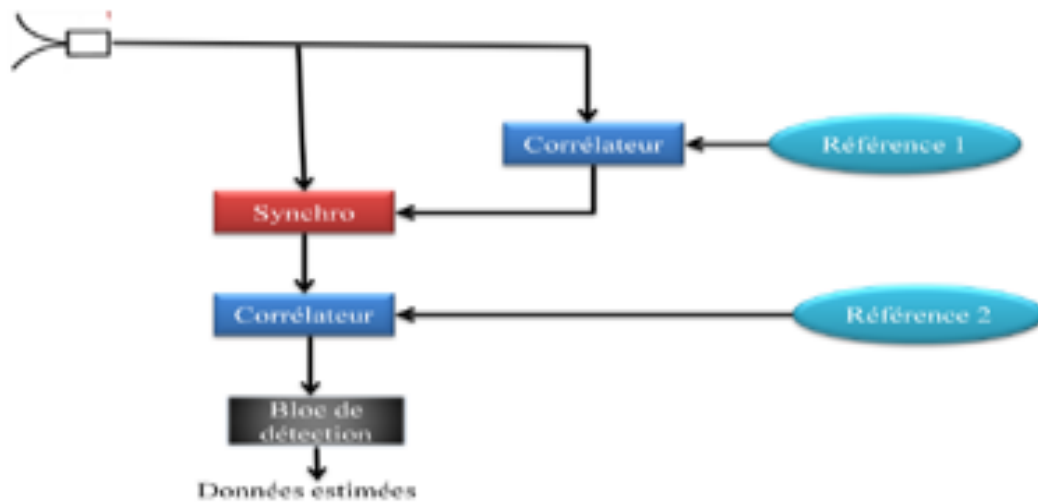


FIGURE A.39 – Algorithme général de réception.

\* La ESS2 :

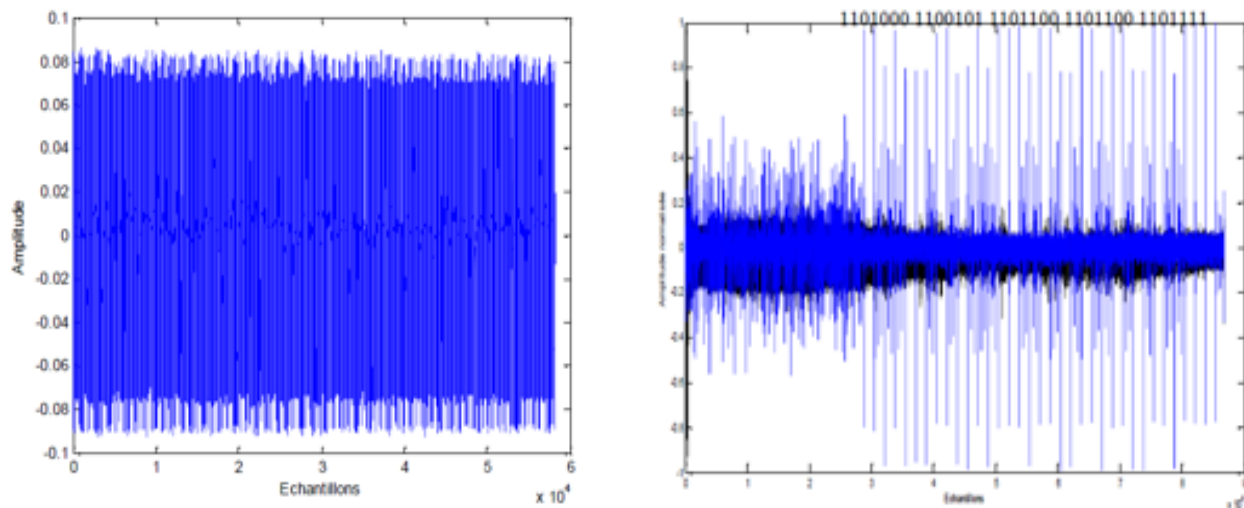
Le mot envoyé : "Hello", codé en binaire sur 7 bits comme 1101000 1100101 1101100 1101100 110111, pour une distance interrogateur/répondeur de 4, 14 m.

Le signal reçu par l'antenne réceptrice du répondeur et le résultat de corrélation du signal reçu synchronisé sont illustrés dans les figures A.40 (a) et (b) respectivement.

Après décodage nous obtenons le mot "Hello" que nous avons intégré à l'entrée de l'interrogateur. L'acquisition a été effectuée plusieurs centaines de fois pour pouvoir calculer le BER. Le nombre de données transmises est assez faible, donc le BER mesuré n'est qu'indicatif. Nous obtenons un  $BER = 2.85 * 10^{-4}$ , qui permet d'affirmer que, même pour un très grand nombre de données, le BER sera très faible. Ceci confirme bien les résultats de simulation.

\* La  $2\pi M$  :

Nous avons codé en binaire sur 8 bits la phrase "Accidents a 2 kms", qui correspond au train binaire suivant : 01100001 01100011 01100011 01101001 01100100 01100101 01101110 01110100 01110011 00100000 11100000 00100000 00110010 00100000 01101011 01101101 01110011. La figure (4.26) montre le résultat de la corrélation circulaire du signal reçu synchronisé avec la référence 2.



(a) Signal ESS2 reçu

(b) Corrélation du signal ESS2 reçu avec la référence 2

FIGURE A.40 – La technique ESS2.

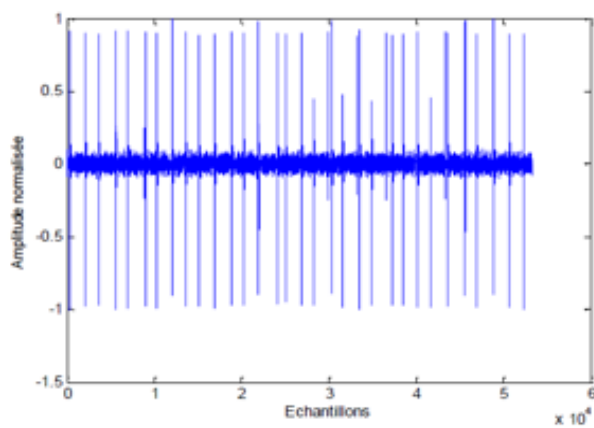


FIGURE A.41 – Corrélation circulaire du signal  $2\pi M$  reçu synchronisé avec la référence 2.

De la même façon que pour la première technique, après 100 acquisitions, nous obtenons un  $BER = 3.90 * 10^{-4}$ .

\* La  $2\pi PSM$  :

Les nouvelles références sont le code communication modulé en BPSK avec un des quatre premiers ordres de la fonction de Gegenbauer et envoyé dans les antennes mises face à face et éloignées d'une distance raisonnablement faible (un peu plus d'1 m). La figure A.42 représente ces quatre références.

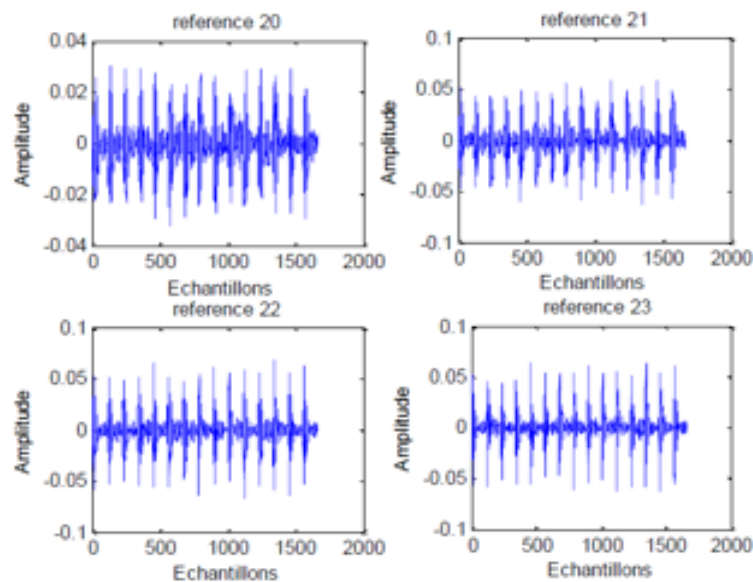


FIGURE A.42 – Les quatre références utilisées dans la technique  $2\pi PSM$ .

La phrase envoyée est "attention accident a 2 km", qui correspond au train binaire suivant : "01000001 01110100 01110100 01100101 01101110 01110100 01101001 01101111 01101110 00100001 00100000 01100001 01100011 01100011 01101001 0110010 001100101 01101110 01110100 01110011 00100000 11100000 00100000 00110010 00100000 01101011 01101101".

Au niveau du récepteur, nous avons cinq corrélations à effectuer (figure A.44) : La première sert à synchroniser notre trame, et les quatre autres servent à récupérer les données envoyées.

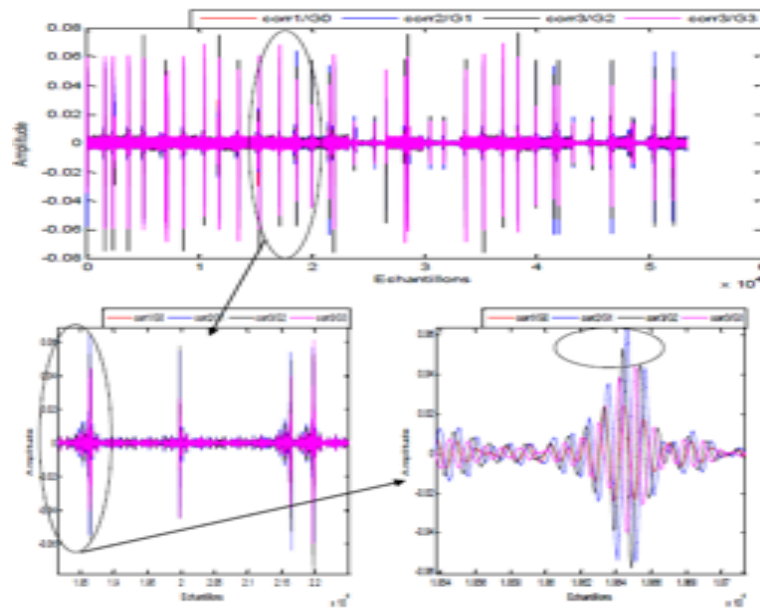


FIGURE A.43 – Les quatre corrélations circulaires du signal  $2\pi PSM$  reçu synchronisé avec les quatre références.

Cette technique paraît plus sensible au bruit que les techniques précédentes, ce qui est confirmé par le BER qui est égal à  $3.12 * 10^{-3}$ .

\* La  $2\pi OAM$  à 2 séquences :

Pour cette technique, l'information à véhiculer est portée par trois paramètres : la polarité, la position et la forme d'onde. Ainsi, cet algorithme permet d'envoyer jusqu'à 8 bits par symbole. Pour cela, nous augmentons la longueur de notre phrase pour qu'elle devienne " Attention accident à 2 km, Prudence SVP!".

Ceci correspond au train binaire suivant :

```
"01000001 01110100 01110100 01100101 01101110 01110100 01101001 01101111 01101110
00100001 01100001 01100011 01100011 01101001 01100100 01100101 01101110 01110100
00100000 11100000 00100000 00110010 01101011 01101101 00101100 00100000 01010000
01110010 01110101 01100100 01100101 01101110 01100011 01100101 00100000 01010011
01010110 01010000 00100001".
```

Pour une distance interrogateur/répondeur de 3,50 m, le signal reçu est illustré dans la figure A.44.

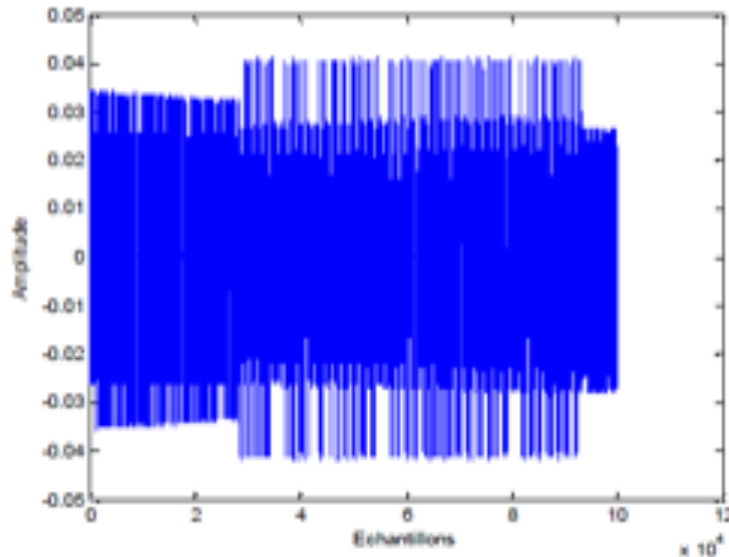


FIGURE A.44 – Signal  $2\pi OAM$  à 2 séquences à 2 états reçu par l’antenne réceptrice du répondeur.

Après synchronisation de ce signal, deux corrélations sont calculées, la première avec la référence 21 et la deuxième avec la référence 22 (voir figure A.43). Les résultats sont montrés dans la figure A.45.

Le BER correspondant à cette technique, calculé sur une centaine d’acquisitions, est de l’ordre de  $1,28 \times 10^{-3}$ . Le rapport qualité de transmission/débit reste très intéressant pour cette technique.

Cette section a été consacrée à la validation expérimentale des résultats de simulation obtenus dans les différents travaux de thèses obtenus au laboratoire. On peut en conclure que les systèmes proposés procurent de bonnes performances en termes de communication, avec une bonne qualité de transmission pour les différentes techniques de codage proposées.

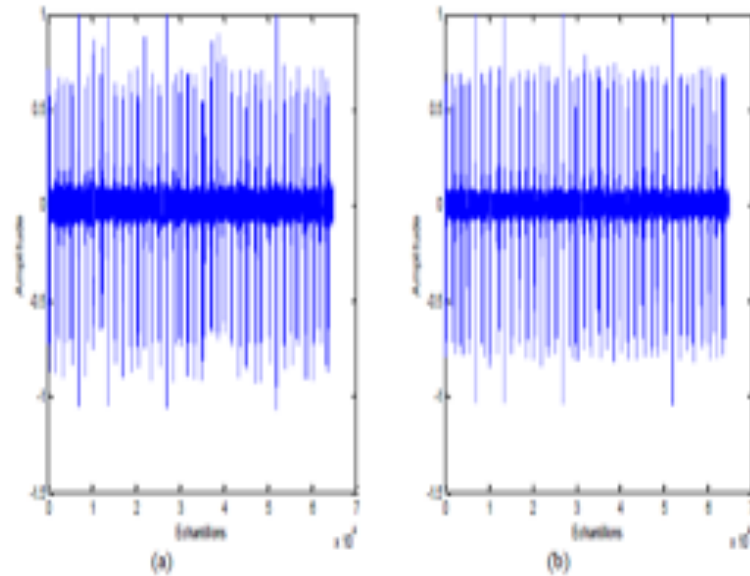


FIGURE A.45 – Les deux corrélations circulaires du signal  $2\pi OAM$  à 2 séquences à 2 états reçu synchronisé avec : (a) la référence 21 (b) la référence 22.

## A.6 Nouveau système multi-utilisateur ULB basé sur les modulations M-OAM

Plusieurs techniques d'accès multiple sont présentées dans la littérature telles que les techniques DS-UWB (Direct Sequence Ultra Wide Band) [Sak08b, Elb01a, Elb01d, Elb05b], TH-UWB (Time-Hopping Ultra Wide Band) [WUS, Ela16a, Mag01, Nak06, Ram98, Sch93] et MGF-ULB qui exploitent l'orthogonalité des formes d'onde MGF pour remplacer les codes pseudo-aléatoires. Dans notre cas, nous avons utilisé les nouveaux schémas de modulation M-OAM, avec une nouvelle technique d'accès multiple pour construire un système ULB original offrant un débit élevé et un nombre maximum d'utilisateurs [Ham15, Maa15a, Ela17].

### A.6.1 Principe du nouveau système ultra large bande multi-utilisateurs DS-MGF-ULB

L'architecture de notre système repose sur la combinaison de deux techniques existantes à savoir DS-ULB et MGF-ULB. Ce choix nous permettra d'exploiter la double orthogonalité des codes de Gold et des formes d'onde MGF. Le schéma-bloc de notre système, noté DS-MGF-ULB, est illustré dans la figure A.46.

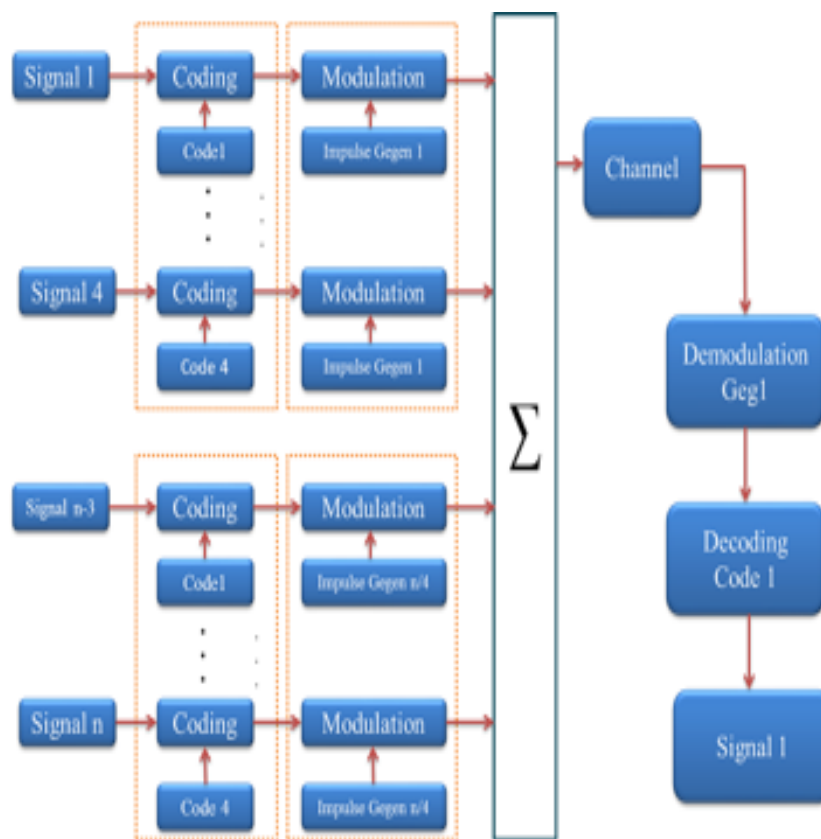


FIGURE A.46 – Schéma du nouveau système DS-MGF-ULB.

Ce nouveau système consiste à créer des sous-groupes de  $n$  utilisateurs, comme le montre le schéma. Dans chaque sous-groupe, les signaux d'utilisateurs sont étalés avec la technique DS-ULB et modulés avec le même ordre de forme d'onde de Gegenbauer. Entre les sous-groupes, nous changeons l'ordre des formes d'ondes MGF. Ainsi, nous avons, d'une part, augmenté le nombre d'utilisateurs par rapport à tous les systèmes ULB existants et, de l'autre, le taux de données grâce à la modulation M-OAM consi-

dérée. Par la même occasion, nous allons garantir de bonnes performances en termes de BER.

La figure A.47 montre les résultats de simulation de la technique DS-MGF-ULB avec un sous-groupe de  $N = 3$  utilisateurs. Les données sont modulées avec la modulation 4-OAM et chaque utilisateur  $k$  se voit affecter une combinaison unique (code de Gold CK, ordre de Gegenbauer GK). Nous remarquons que le système conserve les mêmes performances jusqu'à  $7 * N$  utilisateurs.

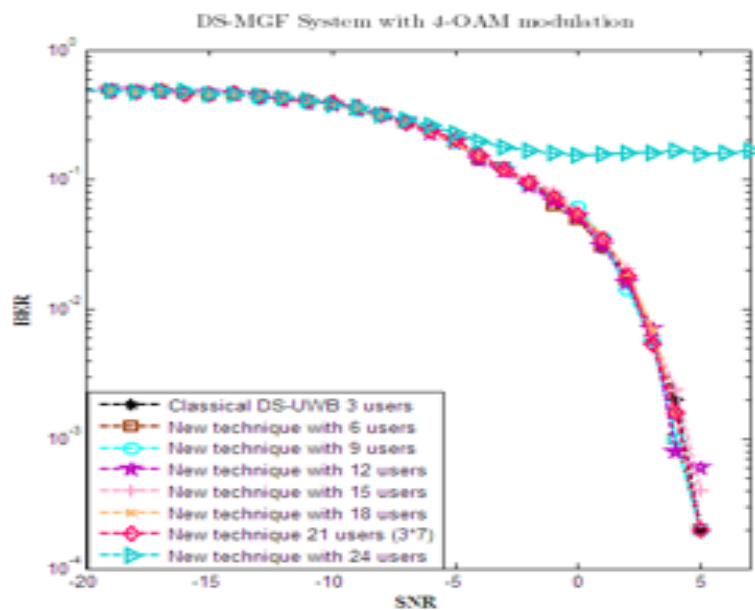


FIGURE A.47 – Système DS-MGF avec la modulation 4-OAM.

Pour conclure, notre nouveau système permet la multiplication du nombre d'utilisateurs des systèmes conventionnels par un facteur 7 et le doublement du débit des données grâce à la modulation M-OAM, tout en gardant la même qualité de transmission.

## A.6.2 Évaluation des performances du système M-OAM sous l'effet des canaux IEEE et les nouvelles solutions de récepteurs

Cette section fait partie de travail de thèse de Mme HAMIDOUN et s'articule autour de deux grandes parties. Dans un premier temps, elle présente le système M-OAM sous l'effet des canaux IEEE802.15 4a et 3a. Puis, le rôle des récepteurs pour affaiblir



les effets du bruit et des interférences est étudié, particulièrement le récepteur Rake et l'égalisation à minimisation de l'erreur quadratique moyenne MMSE.

### A.6.3 Canaux de propagation ULB

Dans un environnement multi-trajets, il existe des modèles élaborés pour des systèmes à bande étroite puis adaptés à l'ULB tels que le canal à évanouissements (Rayleigh Fading) et Delta-K [Pag07]. Mais le modèle le mieux adapté est celui de Saleh-Valenzuela [Sal87], qui a été adopté pour définir ou standardiser des canaux IEEE 802.15.3a et 4a, dits canaux ULB [Mol04, Win02]. Dans les canaux multi-trajets indoor, les nombreux trajets souvent observés sont dus à un grand nombre de réflexions et diffractions sur des obstacles. Les différents trajets arrivent au récepteur par groupes (ou clusters en anglais). La réponse impulsionnelle discrète se met alors sous la forme :

$$h(t) = \sum_{l=1}^{L_c} \sum_{m=1}^{K_l} \alpha_{m,l}(t) \exp(j\theta_{m,l}) \delta(t - T_l - \tau_{m,l}), \quad (\text{A.18})$$

où  $L_c$  est le nombre de clusters,  $K_l$  est le nombre de trajets dans le cluster  $l$ ,  $T_l$  est l'instant d'arrivée du cluster  $l$  sur le récepteur. Les paramètres  $\alpha_{m,l}$ ,  $\theta_{m,l}$  et  $\tau_{m,l}$  représentent, respectivement, l'amplitude, la phase et l'instant d'arrivée du trajet  $m$  du cluster  $l$ .  $L_c$ ,  $T_l$  et  $\tau_{m,l}$  sont modélisés comme des variables aléatoires suivant une loi de distribution de Poisson caractérisée par la valeur moyenne de  $L_c$ . On introduit un taux d'arrivée  $\Lambda$  des clusters. (indépendant du cluster considéré) et un taux d'arrivée  $\lambda$  pour les trajets dans un cluster. Des constantes de décroissance  $\Gamma$  et  $\gamma$  sont également affectées aux clusters et aux trajets. L'amplitude  $\alpha_{m,l}$ , positive, décroît en fonction de  $T_l$  et  $\tau_{m,l}$ . Enfin, la phase  $\theta_{m,l}$  ne prend que l'une des valeurs 0 ou  $\pi$ .

Nous allons illustrer les résultats obtenus par rapport à la chaîne de transmission basée sur les nouveaux schémas de codage M-OAM ainsi que celle basée sur la nouvelle technique d'accès multiple DS-MGF-ULB.

### A.6.4 Évaluation des performances du système M-OAM sous l'effet des canaux IEEE

La figure suivante montre les éléments de la chaîne de transmission, à savoir l'émetteur utilisant la modulation 4-OAM avec les formes d'ondes de Gegenbauer, le canal IEEE représenté par les deux modèles 802.15.3a et 802.15.4a, et finalement la démodulation à la réception.

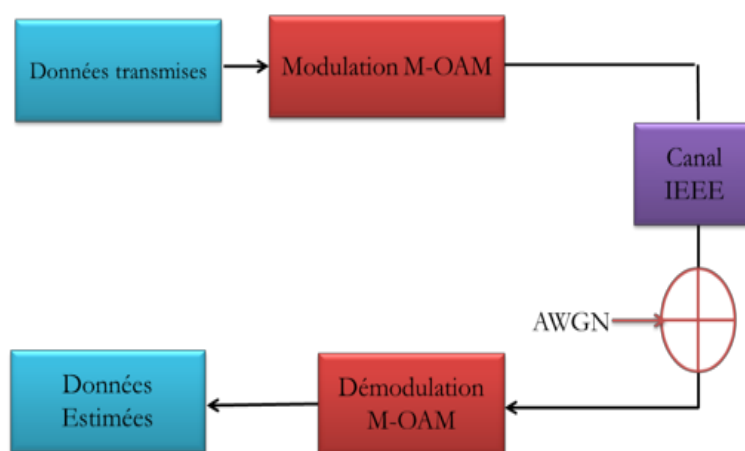


FIGURE A.48 – La chaîne de transmission M-OAM avec les canaux IEEE.

#### A.6.4.1 L'effet des canaux IEEE 803.15.3a

Dans nos simulations, nous avons choisi la forme d'onde G1 de largeur  $2ns$ , la modulation 4-OAM, 200 réalisations du canal de propagation et un nombre de données de 2000 bits. La figure A.49 présente les résultats de cette simulation.

En analysant le graphe de la figure A.49, on constate que la pente diffère d'un CM à un autre vu les paramètres entrant en jeu, à savoir LOS/NLOS, la distance émetteur/récepteur qui est proportionnelle au BER, ainsi que le SNR. Avant l'introduction du canal, le BER prenait des valeurs inférieures ou égales à  $10^{-3}$  pour un SNR supérieur à 10dB. Une fois les canaux introduits, on remarque une dégradation du signal qui peut augmenter la valeur du BER jusqu'à 0,2 si on se positionne dans un environnement défavorable.

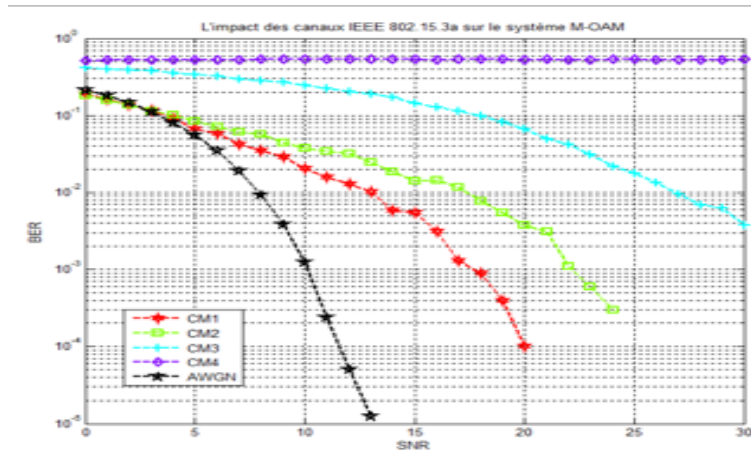


FIGURE A.49 – Les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15.3a.

#### A.6.4.2 L'effet des canaux IEEE 803.15.4a

Quatre types de canaux IEEE 803.15.4a sont implémentés pour modéliser l'impact du canal. à la réception, un récepteur classique par corrélation est considéré. Le taux d'erreur binaire est calculé pour 300 réalisations avec 2000 bits/canal. Les performances pour les canaux  $CM1$  à  $CM4$  sont représentées dans la figure A.50.

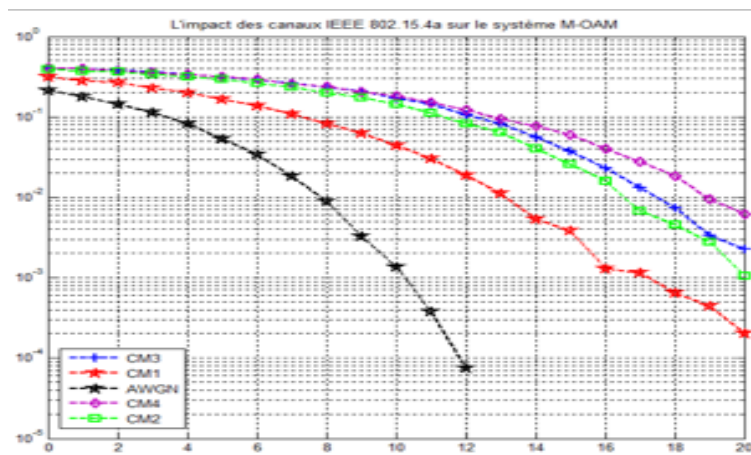


FIGURE A.50 – Les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15.4a.

Dans le cas du canal AWGN, le BER prend des valeurs inférieures à  $10^{-3}$  pour un SNR supérieur à 10 dB, comme le montrent les figures A.49 et A.50. Néanmoins, en présence des canaux IEEE 802.15.4a, nous remarquons une dégradation des performances, comme illustré dans la figure A.51. En effet pour atteindre la même valeur du BER ( $10^{-3}$ ), la valeur de SNR requise est de 16 dB pour CM1 et 20 dB pour CM2. Cette dégradation est justifiée par la présence des trajets multiples, donnant lieu au phénomène d'interférences inter-symboles (ISI : Inter-Symbol Interferences).

### A.6.5 Amélioration des performances du système M-OAM

Dans cette partie, nous présentons l'amélioration des résultats obtenus précédemment, en implémentant quelques unes des solutions d'égalisation introduites au niveau de la réception pour combattre l'ISI, comme le récepteur Rake.

#### A.6.5.1 Les performances du système M-OAM dans le cas du récepteur RAKE

Dans notre système M-OAM ULB, nous avons choisi d'implémenter le récepteur Rake avec quatre doigts afin de diminuer la complexité de notre architecture. Pour ce faire, le récepteur effectue quatre corrélations en parallèle de la forme d'onde G1 avec le signal reçu, puis il calcule la somme pondérée des quatre signaux (figure A.51).

Pour vérifier les résultats obtenus après l'introduction du récepteur Rake, nous avons tracé, pour chaque CM des canaux IEEE802.15.3a, le graphe du système avec et sans l'ajout du Rake. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure A.52.

Selon la figure A.52, l'implémentation du Rake avec le canal CM1 a donné des bons résultats tout au long de l'axe du SNR, et nous constatons une amélioration de presque 5 dB pour un BER de  $10^{-2}$  grâce au récepteur Rake.

L'apport de ce récepteur dans le cas du canal CM2 est plus important que pour CM1. En effet, nous avons pu gagner 7 dB pour un BER de  $10^{-2}$ .

L'introduction du récepteur Rake avec les canaux CM3 et CM4 n'aboutit à aucune amélioration perceptible des performances du système.

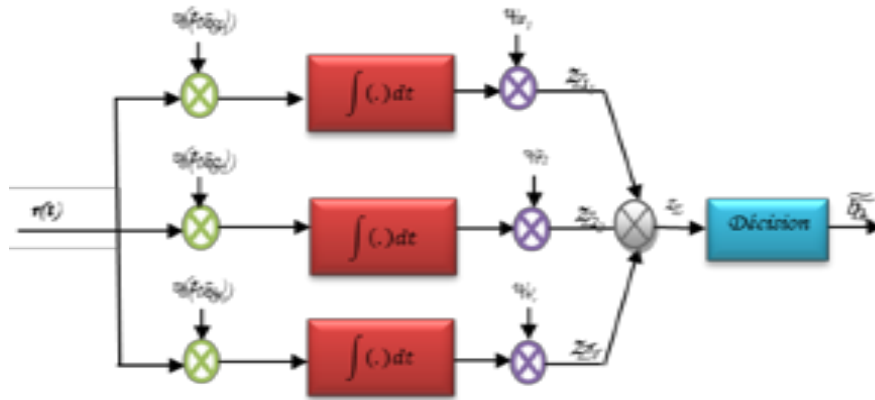


FIGURE A.51 – Le schéma bloc du récepteur RAKE.

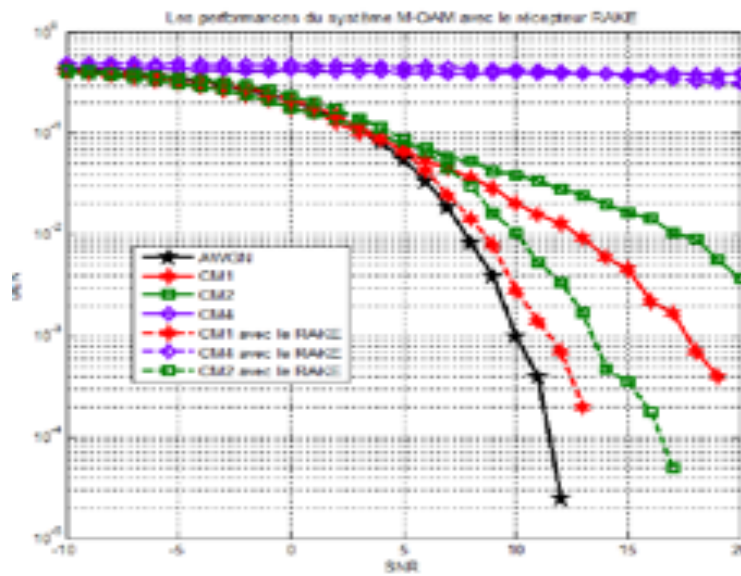


FIGURE A.52 – Les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15.3a après introduction du récepteur Rake.

Concernant les canaux IEEE802.14.4a, les résultats de simulation sont obtenus en utilisant 1000 symboles de données sur chacune des 100 réalisations de canal, un récepteur RAKE de 4 doigts, un filtre adapté et une combinaison MRC. (figure A.53 ).

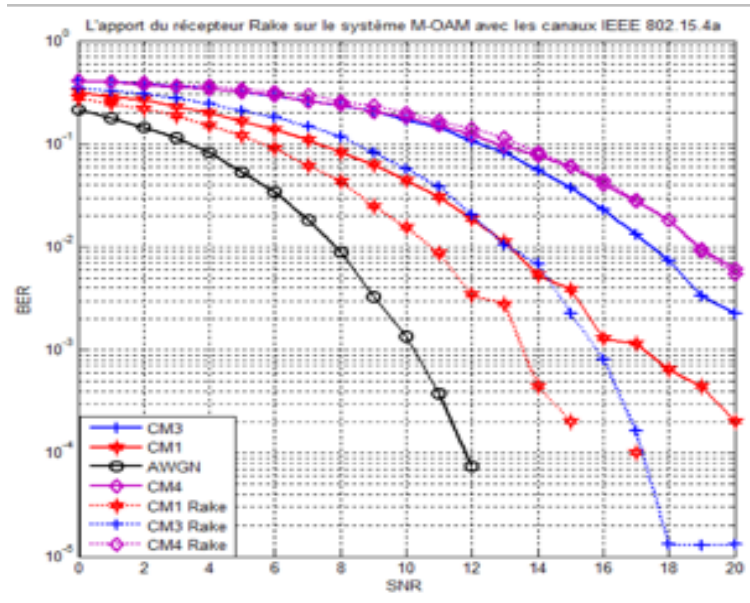


FIGURE A.53 – L'apport du récepteur Rake sur les performances du système M-OAM dans le cas des canaux IEEE 802.15. 4a.

La figure A.53 montre que le récepteur RAKE donne de bons résultats pour CM1 et CM3. Nous notons également que l'introduction du récepteur Rake avec le modèle CM4 n'offre aucune amélioration significative par rapport à son absence. Par conséquent, l'égalisation MMSE va être étudiée et adoptée dans notre chaîne de communication, comme nous le décrivons dans la section suivante.

#### A.6.5.2 Les performances du système M-OAM dans le cas de l'égalisation MMSE

Le principe de l'égaliseur MMSE (Minimum Mean Square Error) est de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre le signal émis et celui reçu. Une séquence d'apprentissage est ajoutée au début de la transmission afin d'assurer la synchronisation émetteur/récepteur et de calculer les coefficients de l'égaliseur. L'architecture du système M-OAM avec le récepteur MMSE est présentée dans la figure A.55.

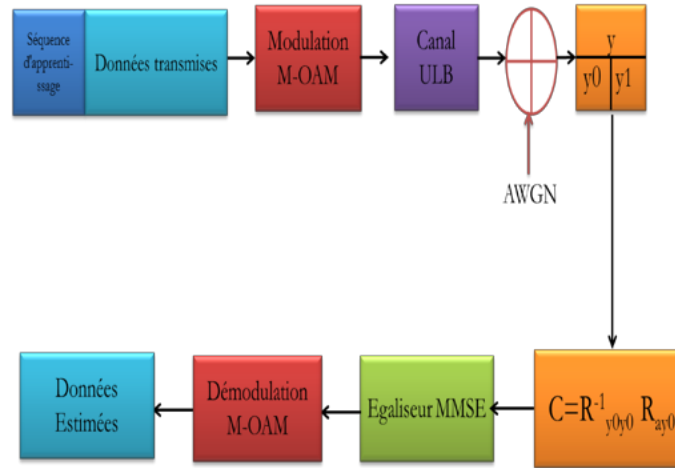


FIGURE A.54 – L'égaliseur MMSE.

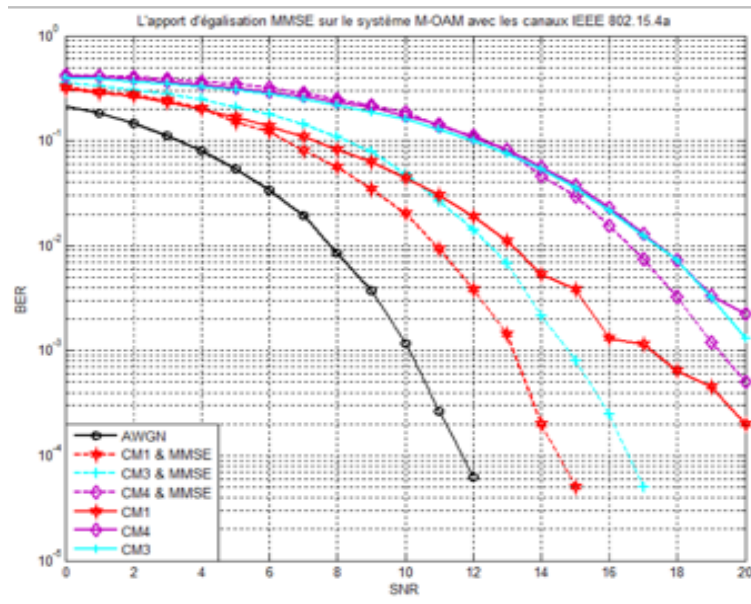


FIGURE A.55 – La contribution de l'égalisation MMSE dans le cas des canaux IEEE 802.15.4a.

Afin de vérifier la contribution de l'égaliseur MMSE dans l'amélioration des performances de notre système après introduction des canaux IEEE.802.15.4a, nous avons comparé dans la figure A.55 les nouveaux résultats avec ceux obtenus précédemment.

D'après les résultats obtenus dans les différents scénarios considérés, nous pouvons conclure que l'égaliseur MMSE représente un meilleur choix pour minimiser l'impact des canaux IEEE sur les performances de notre système M-OAM. Par conséquent, nous avons adopté cette solution dans la section suivante consacrée à l'étude des performances du système d'accès multiple DS-MGF-OAM.

### A.6.5.3 Évaluation des performances du système DS-MGF-OAM sous l'effet des canaux IEEE et de l'égalisation MMSE

Nous nous intéressons tout d'abord à l'impact du canal de propagation IEEE.802.15.4a sur le système DS-MGF-OAM. Les simulations sont réalisées avec une modulation 4-OAM, des formes d'onde Gegenbauer (G0 à G9) et des codes d'étalement de Gold de longueur 31. Le nombre d'utilisateurs varie de 1 à 28 utilisateurs selon la configuration considérée (voir figure A.56).

Le système d'accès multiple DS-MGF-ULB proposé garantit des résultats satisfaisants dans les conditions du canal AWGN pour un nombre d'utilisateurs simultanés allant jusque 28. Cependant pour les canaux IEEE CM1 et CM4, les performances du système DS-MGF-ULB se dégradent au point qu'il devient pratiquement très difficile de récupérer les données envoyées. Pour palier ce problème, l'égalisation MMSE est implémentée au niveau de la réception dans notre chaîne de transmission (Figure A.57)

Nous constatons d'après la figure A.57 que l'utilisation du MMSE à la réception apporte un gain significatif par rapport aux résultats du BER obtenus dans le cas des canaux sans égalisation.



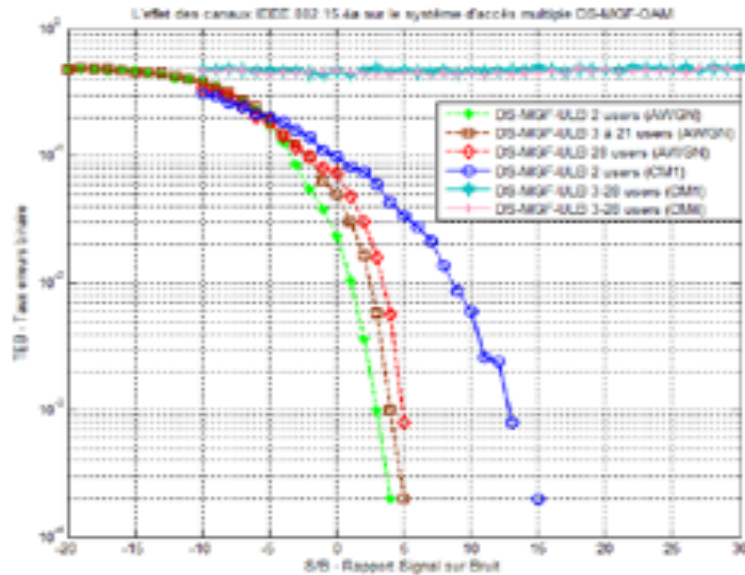


FIGURE A.56 – L'effet des canaux IEEE.802.15.4a sur le système d'accès multiple DS-MGF-OAM.

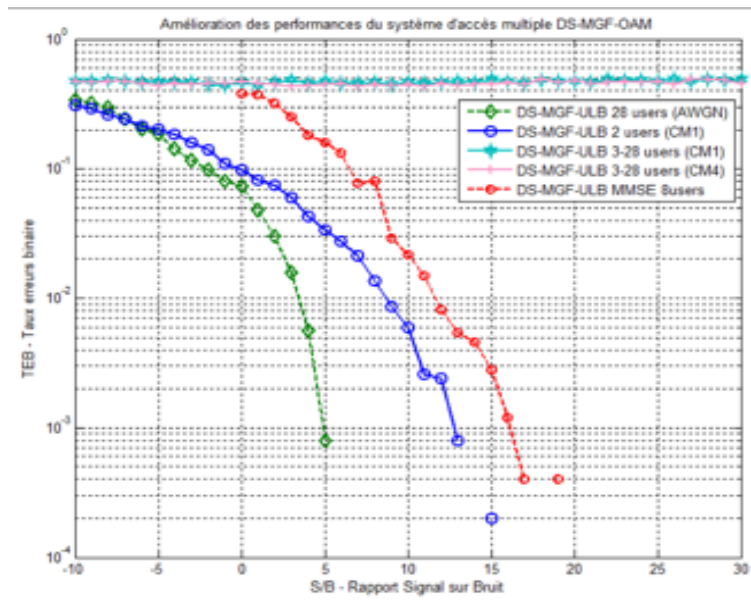


FIGURE A.57 – La contribution de l'égalisation MMSE dans l'amélioration des performances du système DS-MGF-OAM.

## A.7 Conclusion

L'objectif de cette section était d'améliorer les performances du système de communication IR-ULB et d'apporter plusieurs solutions de codage, d'émission et de réception pour augmenter le débit offert. Ainsi, des nouvelles techniques de modulation M-OAM et de multiplexage ont été présentées.

Nous avons exploité les fonctions de Gegenbauer MGF originales en remplacement de la notion de porteuse utilisée dans les technologies à bande étroite et aussi pour développer un nouveau système d'accès multiple pour l'ULB à savoir DS-MGF-ULB.

Les performances ont été analysées et évaluées en termes de BER pour les canaux AWGN, IEEE.802.15.3a et IEEE.802.15.4a. Nous avons par la suite évalué la contribution du récepteur Rake et de l'égalisation à minimisation de l'erreur quadratique moyenne MMSE dans l'amélioration des performances des systèmes proposés après l'introduction des canaux réalistes.



# Annexe B

## Généralités sur les systèmes de localisation et de détection d'obstacles

### Sommaire

---

<b>A.1 Contenu</b> . . . . .	<b>89</b>
<b>A.2 La technique ULB</b> . . . . .	<b>89</b>
A.2.1 Introduction . . . . .	89
A.2.2 Principe de la technologie ULB . . . . .	90
A.2.3 Normalisation en ULB . . . . .	91
A.2.3.1 Normalisation aux Etats-Unis . . . . .	92
A.2.3.2 Normalisation en Europe . . . . .	92
A.2.4 Les techniques de transmission pour l'UWB . . . . .	94
A.2.5 Principaux avantages de l'IR-ULB . . . . .	96
<b>A.3 Les formes d'ondes ultra large bande</b> . . . . .	<b>97</b>
A.3.1 L'impulsion gaussienne et ses dérivées . . . . .	98
A.3.2 Les polynômes orthogonaux - Fonctions de Gegenbauer Modifiées (MGF) . . . . .	100
<b>A.4 Les techniques de modulation ULB-IR</b> . . . . .	<b>102</b>
A.4.1 Modulations associées à l'ULB-IR . . . . .	102
A.4.1.1 La modulation de position (PPM) . . . . .	102

A.4.1.2	La modulation antipodale (BPSK) . . . . .	102
A.4.1.3	La modulation d'amplitude (PAM) . . . . .	104
A.4.2	Les nouvelles modulations M-OAM . . . . .	104
A.4.2.1	La modulation 4-OAM . . . . .	105
A.4.2.2	La modulation 16-OAM . . . . .	106
A.4.2.3	La modulation 64-OAM . . . . .	107
A.4.3	Les techniques de multiplexage proposées . . . . .	109
A.4.3.1	La technique de simple étalement ULB . . . . .	110
A.4.3.2	La technique d'étalement séquentiel de spectre à deux codes ULB (ESS2-ULB) . . . . .	112
A.4.3.3	La technique CPM-ULB (Code Position Modulation) . . . . .	112
A.4.3.4	La technique $2\pi M$ -ULB . . . . .	114
A.4.3.5	La technique $2\pi$ CPM . . . . .	114
A.4.3.6	Les techniques de multiplexage "haut débit" . . . . .	115
<b>A.5</b>	<b>Réalisations expérimentales . . . . .</b>	<b>120</b>
A.5.1	Le dispositif expérimental . . . . .	120
A.5.1.1	Le générateur . . . . .	121
A.5.1.2	Les antennes . . . . .	121
A.5.1.3	L'amplificateur . . . . .	123
A.5.1.4	L'oscilloscope . . . . .	123
A.5.2	Résultats expérimentaux . . . . .	124
A.5.2.1	Le système M-AOM . . . . .	124
A.5.2.2	Mesures et expérimentations des nouvelles techniques de multiplexage . . . . .	127
<b>A.6</b>	<b>Nouveau système multi-utilisateur ULB basé sur les modulations M-OAM . . . . .</b>	<b>135</b>
A.6.1	Principe du nouveau système ultra large bande multi-utilisateurs DS-MGF-ULB . . . . .	136
A.6.2	Évaluation des performances du système M-OAM sous l'effet des canaux IEEE et les nouvelles solutions de récepteurs . . . . .	137

---

A.6.3	Canaux de propagation ULB . . . . .	138
A.6.4	Évaluation des performances du système M-OAM sous l'effet des canaux IEEE . . . . .	139
A.6.4.1	L'effet des canaux IEEE 803.15.3a . . . . .	139
A.6.4.2	L'effet des canaux IEEE 803.15.4a . . . . .	140
A.6.5	Amélioration des performances du système M-OAM . . . . .	141
A.6.5.1	Les performances du système M-OAM dans le cas du récepteur RAKE . . . . .	141
A.6.5.2	Les performances du système M-OAM dans le cas de l'égalisation MMSE . . . . .	143
A.6.5.3	Évaluation des performances du système DS-MGF-OAM sous l'effet des canaux IEEE et de l'égalisation MMSE . . . . .	145
A.7	Conclusion . . . . .	147

---

## B.1 Notions fondamentales sur les systèmes de localisation

Quelques notions fondamentales relatives à la localisation sont d'abord exposées ici. Il est difficile d'identifier de manière exhaustive tous les paramètres qui permettent de caractériser les systèmes de localisation. Dans la littérature, on trouve différentes classifications des technologies de localisation [Dix00, Kup05, Rot05]. Nous allons donc nous borner à indiquer quelques notions clé.

Le contexte [Abo99] de la localisation dépend de plusieurs paramètres variables comme l'infrastructure, le système de positionnement, le domaine de mesure et l'environnement physique. Un service de localisation est une application logicielle fonctionnant sur une unité informatique souvent mobile et connectée en réseau, qui délivre des informations à l'utilisateur dès que sa position est connue (par exemple, un guidage routier dans le cas du GPS).

Nous considérons ici uniquement la localisation spatiale (encore dite position), qui

cible un point unique dans l'espace euclidien. La position est déterminée par des coordonnées en 2 ou 3 dimensions, qui sont les composantes d'un vecteur reliant l'origine (référence) du système à l'objet (au sens large) localisé. En général, les systèmes de référence spatiale subdivisent une zone géographique en unités de même dimension (forme et taille identiques) dont ils peuvent obtenir les distances à l'origine et l'angle avec les axes du repère utilisé, donc les coordonnées. La définition précise du repère (cartésien ou ellipsoïdal) est donc essentielle pour interpréter les informations de localisation.

### **B.1.1 Le repère**

En un mot, la référence est le point par rapport auquel la position d'un objet ou de l'utilisateur d'un objet peut être déterminée. Elle peut être un récepteur ou un émetteur, selon le type d'application. Ainsi, en fonction de l'utilisateur, on distingue deux types de positionnement : le positionnement absolu et le positionnement relatif.

La localisation spatiale est définie comme absolue lorsque la position de l'utilisateur est déterminée "directement" à partir des seules mesures faites sur les signaux en provenance de stations de base, dans un système de coordonnées conventionnel, lui-même positionné et orienté par rapport à la Terre.

Si la position de l'utilisateur est définie "relativement" à un autre point de référence en s'aidant des mesures effectuées sur les signaux des stations de base observés par lui-même et par le point servant de référence, le positionnement est relatif ou différentiel. Ces deux types de positionnement peuvent s'effectuer aujourd'hui indifféremment en temps réel ou en temps différé. Les systèmes étudiés mettent en jeu des véhicules mobiles responsables de la détermination de leur position à un moment quelconque, ce qui implique un positionnement relatif.

### **B.1.2 Le support de transmission**

L'élément fondamental dans tout système de localisation est le type de signal utilisé pour se localiser. Plusieurs technologies sont utilisées par les systèmes de localisation. Les systèmes de localisation font appel à des technologies diverses, basées sur

l'infra-rouge [Wan92, Ait03, Rot05], le signal optique ou vidéo [Sha98], le signal ultrasonore [War, Pri00, Pri05] ou sonore [Lop06, Man05], les signaux d'un réseau informatique [Bah00, Roo02, Gu09] et le signal radiofréquence [Cho04, Ni04, Bru03, Pra00]. Cette dernière technologie est la plus répandue, car elle permet de traverser les obstacles et de couvrir une grande zone contrairement aux trois autres. Nous en utilisons une forme dans nos systèmes.

### B.1.3 Les éléments du processus de localisation

Deux types de localisation existent en fonction de l'application souhaitée : la localisation exogène et la localisation endogène [Boc07]. Dans la première catégorie, la position recherchée par l'utilisateur est déterminée par l'infrastructure (réseau, radar), l'utilisateur se bornant à émettre la requête de positionnement et à récupérer le résultat (mode passif) (voir figure B.1).



FIGURE B.1 – Principe du positionnement endogène.

Dans la seconde catégorie, l'objet se localise lui-même à partir d'informations émanant de plusieurs sources (mode actif) (voir figure B.2). C'est le type de localisation le plus utilisé dans les applications militaires, de sécurité publique ou satellitaires (GPS).

Quelque soit le type, passif ou actif, la position est déterminée à partir des éléments suivants :





FIGURE B.2 – Principe du positionnement exogène.

- un ou plusieurs observables,
- un système de référence (descriptive, en réseau ou spatiale),
- une méthode de positionnement,
- une infrastructure,
- des protocoles pour la coordination du processus de positionnement.

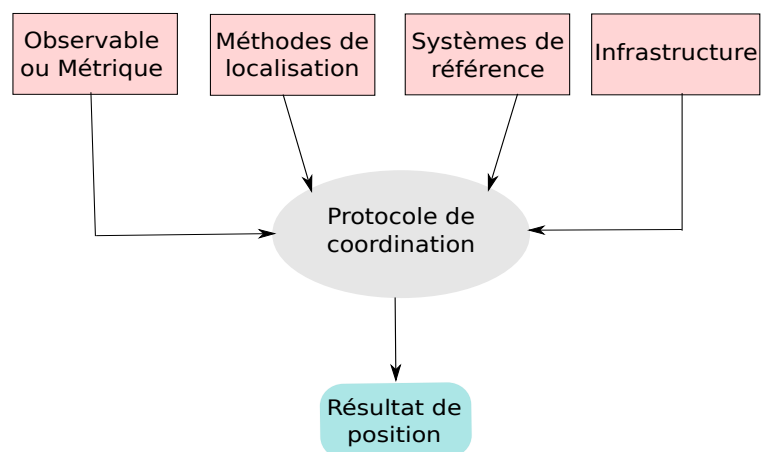


FIGURE B.3 – Schéma bloc du processus de localisation ou de positionnement.

La figure B.3 est un schéma bloc du processus de localisation dont les différentes parties vont être décrites dans la suite.

### **B.1.4 Les observables ou paramètres de position**

La fonction de base de tout système de positionnement est la mesure d'un ou de plusieurs observables, par exemple, les angles, les distances, les différences de distance, ou la vitesse. Ces observables sont obtenues à l'aide des techniques de mesure (ou métriques) desquelles elles tirent leur appellation. Par exemple, les systèmes de localisation basés sur la RF utilisent les informations contenues dans le signal. Ces observables sont alors le temps d'arrivée (Time Of Arrival - TOA), la différence de temps d'arrivée (Time Difference Of Arrival - TDOA), l'angle d'arrivée (Angle Of Arrival - AOA) ou la puissance du signal reçu (Received Signal Strength - RSS). En combinant ces paramètres de position deux à deux, on peut aussi remonter aux informations de position.

### **B.1.5 Méthodes de base de positionnement**

Une fois ces paramètres de position (observables) déterminés, la position du mobile (ou de la cible) est déduite en tenant compte des résultats de mesure et des positions des points fixes (stations de base). Cette détermination est généralement basée sur une certaine méthode qui dépend fortement des types d'observables utilisées. Les exemples les plus connus sont la latération circulaire et hyperbolique, la triangulation ou le Pattern matching (connu aussi sous le nom de Fingerprinting). Un aperçu de ces méthodes de base est donné dans le tableau B.1 avec les différentes observables ainsi que les techniques de mesure associées [Kup05]. Nous reviendrons plus en détail sur quelques-unes de ces méthodes de positionnement et de ces techniques de mesure dans ce qui suit.

### **B.1.6 Infrastructure et protocoles de positionnement**

Dans la majorité des systèmes de localisation, le mobile ne peut pas déterminer lui-même sa position. De ce fait, une infrastructure est souvent requise pour effectuer cette opération. On équipe alors la cible d'un terminal à partir duquel on détermine la position. Par exemple, dans ces types de systèmes, on utilise des stations de base pour effectuer les mesures ou pour aider la cible à se positionner. Il existe deux types

d'infrastructures : les infrastructures intégrées et les infrastructures autonomes. Selon le type d'infrastructure utilisée, les satellites (GPS), les stations de base (GSM/UMTS), les points d'accès (WLAN) ou les lecteurs d'étiquettes servent de stations de base, tandis que les téléphones portables et les capteurs peuvent servir de bornes lors du positionnement.

TABLE B.1 – Vue générale sur les méthodes de base de positionnement.

Méthode	Observable	Mesurée par
Détection de proximité	Identité de cellule, coordonnées	Détection de signaux
	Distance ou	TOA
Latération		Atténuation (path-loss)
	Différence de distance	TDOA
		Différence d'atténuation
Triangulation	Angle	Réseaux d'antennes
	Position	Autre méthode
	Direction du mouvement	Gyroscope
Dead reconing	Vitesse	Accéléromètre
	Distance	Odomètre
Pattern matching	Images visuelles ou	Caméra
	Fingerprint	RDD

La méthode de positionnement est utilisée pour déterminer la position du mobile par rapport à un système de référence spatiale

Le dernier élément du processus de localisation est le protocole, utilisé pour coordonner et contrôler les différentes composantes du système. En général, le protocole est appliqué soit entre une unité centrale de commande et les stations de base ou soit entre les stations de base et le terminal. Par exemple, ils est utilisé pour transférer les coordonnées de la station de base et des instructions de mesure (appelées données d'assistance) à la borne, pour transférer des données de mesure au réseau, ou pour échanger des données de position calculée appelée point localisé (en anglais position-fix).

Après avoir présenté quelques notions relatives aux systèmes de localisation, nous abordons maintenant quelques critères qui permettent d'évaluer les performances de ces systèmes.

## **B.2 Les différents critères d'évaluation des performances de localisation**

Nous allons maintenant traiter des erreurs dans les mesures que nous fournissent les systèmes de localisation. Les sources probables de ces erreurs seront évoquées par la suite dans la sous-section B.3 suivante

Nous allons maintenant donner quelques critères permettant d'évaluer la performance d'un système de localisation d'une manière générale. Plusieurs critères permettent d'évaluer les performances d'une méthode de positionnement [Kup05, p. 125] :

- L'erreur et la précision de localisation.

Les principaux paramètres d'un système de localisation sont l'erreur et la précision de localisation. L'erreur de localisation est l'erreur commise sur la position, c'est-à-dire l'écart entre le point localisé et la position réelle. Son unité est le mètre. Quant à la précision de mesure, c'est le rapport de la position estimée par rapport à la valeur moyenne de la mesure. Elle s'exprime en pourcentage.

- Le rendement et la cohérence.

Le rendement d'une méthode de localisation se rapporte à sa capacité à obtenir des points localisés dans tous les environnements. Quant à la cohérence, elle est la mesure de la stabilité de la précision dans différents environnements.

- Le coût de réalisation.

Comme tout système, un système de localisation nécessite pour sa mise en oeuvre des frais de réalisation. Ces charges peuvent se répartir entre frais de signalisation et frais liés au temps de calcul. Les frais de signalisation ont un impact sur la quantité d'informations échangées entre la cible et le terminal et entre le terminal et l'unité centrale de commande lors du processus de positionnement. Les frais relatifs au temps de calcul se réfèrent à la perte de puissance de traitement qui se produit dans les unités de contrôle ou les bases de données du réseau et au niveau du terminal. Plus le temps

de calcul est élevé, plus ces pertes deviennent importantes. Ce temps est étroitement lié à la précision de mesure recherchée. Par conséquent, le choix d'une méthode de positionnement appropriée doit toujours résulter d'un compromis entre la précision de mesure recherchée et le temps de calcul adéquat pour minimiser les frais de réalisation.

- La consommation énergétique.

La consommation électrique constitue une catégorie de frais supplémentaires, dont il faut tenir compte lors de la réalisation d'un système. La consommation énergétique d'une borne de positionnement est dans la plupart des cas fortement corrélée avec la signalisation et le temps de calcul.

- Le temps de latence.

Le temps de latence correspond à la période entre une demande de position et la transmission ultérieure de la position estimée. Un indicateur important est le temps de latence pour la première position localisée après la mise sous tension, qui est appelé Time To First Fix (TTFF). Dans les implémentations actuelles, le TTFF est de l'ordre de grandeur de quelques secondes pour le GPS

- Les coûts de déploiement et d'exploitation.

Les coûts de déploiement sont liés à l'installation de l'infrastructure des stations de base ou des bases de données et des unités de contrôle, aussi bien pour étendre une infrastructure existante que pour en déployer une nouvelle. C'est un critère important de la conception et de la mise en place d'une méthode particulière de localisation.

Les coûts d'exploitation sont fortement liés à la complexité de l'infrastructure de positionnement. Les réseaux intérieurs provoquent peu voire pas de gros coûts d'exploitation, alors que les réseaux satellites induisent généralement des charges élevées de fonctionnement. D'où l'intérêt de proposer des systèmes dédiés aux environnements indoor plutôt que d'amener les signaux GPS à l'intérieur des bâtiments.

### **B.3 Les sources d'erreur du système de localisation**

Une mauvaise précision pour un système de localisation est le résultat d'erreurs des observables mesurées par rapport aux valeurs exactes qui devraient être obtenues. Ces erreurs proviennent de diverses sources. En général, les sources d'erreur suivantes peuvent être identifiées [Kup05, p. 151–153] :

- L'horloge : l'éternel problème de synchronisation.

L'instabilité et la mauvaise précision des horloges dans les systèmes de positionnement entraînent directement des erreurs dans les mesures effectuées. Bien qu'il existe des mécanismes de synchronisation de l'horloge et des modèles mathématiques pour corriger ces erreurs, il demeure toujours une certaine erreur. Les horloges sont une source d'erreur pour toutes les méthodes de positionnement où les distances et les différences de distance sont déterminées par des mesures de temps.

- La réfraction ionosphérique et troposphérique.

La réfraction dans l'atmosphère terrestre est responsable de petites déviations de la vitesse des signaux par rapport à la vitesse de la lumière. Les réfractions ionosphérique et troposphérique ont une importance particulière dans les systèmes satellitaires.

- La non visibilité directe (No Line Of Sight - NLOS).

Lorsqu'il y a une vue directe (Line Of Sight - LOS) entre la station émettrice et la station réceptrice, on peut supposer que le premier signal arrivé a emprunté cette voie directe, et les autres signaux sont considérés comme des trajets réfléchis. Toutefois, dans certains cas, le LOS n'existe pas, donc tous les signaux reçus sont des trajets réfléchis, ce qui peut conduire à des retards énormes et donc à des erreurs de mesure des observables. Ce problème est particulier aux systèmes de positionnement en fonction du temps comme les systèmes cellulaires, et n'intervient pas pour le GPS (qui exige toujours le LOS). Le NLOS entraîne également d'importantes erreurs dans les systèmes utilisant l'AOA, car un signal réfléchi peut éventuellement suivre un trajet quelconque à partir de la station de base émettrice.

- Les trajets multiples.

Par suite de la propagation par trajets multiples, les différents signaux peuvent se superposer au niveau du récepteur et fausser l'amplitude et la phase du signal reçu. Il s'agit d'un problème particulièrement gênant si les intervalles sont déterminés par les mesures de RSS ou par des mesures de phase. En outre, les mesures collectées par la méthode du Finger Printing peuvent devenir différentes d'un moment à l'autre si la configuration de la scène de mesure (par exemple, la disposition des obstacles mobiles) est modifiée.

- Le support d'accès.

Les interfaces dans les systèmes de positionnement ont souvent été conçues pour la communication. Ils présentent donc certaines carences lors de leur utilisation pour le positionnement.

- Les coordonnées des stations de base.

Une autre source potentielle d'erreur sur les résultats peut provenir de l'inexactitude des coordonnées des stations de base. Dans les systèmes indoor et cellulaires, ce risque peut être facilement évité car les positions des stations sont fixes. Par contre, les satellites sont soumis, lors de leur mouvement orbital, aux forces gravitationnelles résultant de la forme non sphérique de la Terre, de la gravitation externe, des vents solaires. Ainsi, la véritable position du satellite s'écarte toujours un peu de sa position utilisée lors du calcul de la position et provoque ainsi des dégradations de précision.

- La mauvaise configuration géométrique.

Une mauvaise géométrie est obtenue si les stations de base sont disposées en ligne, par exemple, sur les autoroutes, ou si elles sont disposées trop près les unes des autres. En conséquence, les différents trajets arrivent au terminal selon des angles peu inclinés, ce qui augmente le niveau d'erreur. En règle générale, une bonne géométrie est obtenue si ces angles sont presque droits (incidence proche de la normale).

## B.4 Les métriques et méthodes de localisation

Nous allons maintenant présenter les techniques et méthodes utilisées pour la localisation. Les méthodes nous permettront de comprendre au mieux celles qui ont été évoquées dans le tableau B.1. Les métriques permettent d'obtenir les paramètres liés à la position. Dans la plupart des cas, chaque observable est déterminée à partir d'une métrique.

Avant de présenter les principales méthodes classiques utilisées pour déterminer la position d'un objet ou pour permettre à une personne de se positionner, nous allons d'abord analyser les différentes métriques existantes. Ces métriques sont étroitement liées aux caractéristiques des signaux radio de réception. Pour illustrer les différentes métriques, nous considérerons que toutes les stations émettrices et réceptrices sont situées dans le même plan et donc ont une même composante selon l'axe  $z$ .

### B.4.1 La métrique de l'angle d'arrivée

L'angle d'arrivée permet de définir la position de la station émettrice à partir de la méthode de triangulation (exposée plus loin) et ce, par la mesure d'au moins deux angles d'arrivée d'un signal transmis à au moins deux antennes de réception fixes.

Cette technique suppose l'existence du trajet direct (visibilité directe - LOS) entre émetteur-récepteur. Lorsque ce trajet n'existe pas, il est difficile, sinon impossible, de trouver la direction dans laquelle se trouve l'émetteur. Cette contrainte conduit souvent à écarter son utilisation dans les environnements d'intérieur à moins qu'on surdimensionne le système en nombre d'antennes. Dans ce cas, il est envisageable de recourir aux techniques basées sur l'utilisation de plusieurs antennes (Multi Input Multi Output - MIMO) en appliquant des algorithmes de super-résolution tels que Multiple Signal Classification (MUSIC) pour résoudre le problème de sources et de trajets multiples. Ces algorithmes améliorent la précision, mais ils nécessitent des temps de calcul importants pouvant entraîner une grande consommation d'énergie. Cet aspect est contraire au cahier des charges de nos systèmes, qui doivent consommer peu d'énergie.

### B.4.2 La métrique de la puissance du signal reçu

L'énergie d'une onde radio, du fait des interactions avec l'environnement, diminue quand elle se propage sur une certaine distance. De nombreux modèles décrivent la relation entre cette perte d'énergie et la distance. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour récupérer l'information spatiale. La métrique qui utilise ce principe est connue sous la dénomination anglaise Received Signal Strength (RSS). Cette technique consiste à estimer les pertes par atténuation du signal lors de la propagation [Eln04].

À partir de l'équation de Friis (B.1), ces pertes d'énergie pour une onde qui se propage en espace libre, en fonction de la distance séparant la source émettrice et le récepteur, sont traduites par l'équation (B.2) en dB.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \times G_r \times \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (\text{B.1})$$

$$PL(f, d) = 20 \times \log \left( \frac{4\pi f d}{c} \right) - G_t(f) - G_r(f) \text{ (dB)}, \quad (\text{B.2})$$



où l'on a utilisé la relation  $c = f\lambda$  entre la longueur d'onde  $\lambda$ , la fréquence  $f$ , la vitesse de propagation  $c$  de la lumière,  $PL(f, d)$  représente le rapport en dB entre la puissance émise et la puissance transmise,  $G_t$  et  $G_r$  représentant respectivement, les gains des antennes de réception et d'émission.

Les variations du canal sont principalement dues aux pertes de puissance par propagation et aux mécanismes de masquage. Lorsqu'on tient compte de ces variations lentes pour caractériser un canal réel par la dépendance des pertes par propagation en fonction de la fréquence et de la distance, on approxime le paramètre  $PL(f, d)$  par :

$$PL(f, d) = PL(f_0, d_0) + 10 \times N_f \times \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 10 \times N_d \times \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \xi(f, d), (\text{dB}) \quad (\text{B.3})$$

avec  $f_0$  et  $d_0$  respectivement, une fréquence et une distance arbitraires, généralement fixées à la fréquence centrale de la bande considérée et à une distance de 1 m. Les coefficients de pertes par propagation en fréquence et en distance sont respectivement  $N_f$  et  $N_d$ , dont les valeurs théoriques sont prises généralement égales à 2. La fonction  $\xi(f, d)$  (en dB) traduit les variations lentes du canal de propagation. Elle est souvent considérée comme une gaussienne d'écart-type  $\sigma_S$  et de valeur moyenne nulle, car les paramètres  $N_f$  et  $N_d$  sont calculés par régression linéaire.

Le tableau B.2 extrait de [Vu05, p. 11] donne quelques valeurs de  $N_d$  pour différents types d'environnement dans les LOS et NLOS.

TABLE B.2 – Paramètre  $N_d$  en fonction de l'environnement.

Environnement	$N_d$	
	LOS	NLOS
Espace libre	2	
GSM urbain	2, 7 à 3, 5	3 à 5
Intérieur des bâtiments	< 2	
Usine	2 à 3	4 à 6

Une fois ces pertes d'énergie déterminées, la méthode de triangulation ou de trilatération permet de calculer la position du mobile (voir plus loin). La RSS présente l'avantage d'être simple à mettre en oeuvre mais l'un des inconvénients est que la précision est considérablement dégradée par le canal multi-trajets.

De ce fait, le signal est fortement atténué et le point localisé peut ne pas être unique et difficile à déterminer. Le système de localisation souffre alors d'énormes erreurs.

### B.4.3 La métrique du temps d'arrivée

L'information sur le paramètre de position peut être obtenue de différentes manières à partir de la technique du temps d'arrivée (TOA).

La première manière, dite coopérative, met en scène un émetteur fixe et un récepteur mobile à localiser. Cette configuration est celle du GPS et elle nécessite une synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. La synchronisation permet au récepteur de connaître exactement l'instant d'émission du signal pour générer localement un signal identique pour sa reconnaissance.

Dans une autre manière, dite non-coopérative, l'objet à localiser agit comme un réflecteur ou une cible : c'est la technique radar. Ici pour l'estimation de la durée de propagation du signal, on se base sur le temps d'aller- retour, le signal réfléchi par la cible revenant vers la source qui l'a envoyé. Dans ce modèle, la synchronisation n'est pas nécessaire puisque la source émettrice connaît le moment où elle émet le signal. La durée de propagation est alors la moitié du temps d'aller et retour estimé.

Une autre méthode consiste à estimer le TOA en deux étapes (two-stage TOA). Cette technique est utilisée dans les environnements à trajets multiples et aussi pour éviter le problème de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur dans le cas collaboratif [Yu06]. Le principe de cette méthode est simple : l'émetteur envoie son signal en enregistrant l'instant d'émission et reçoit du destinataire un accusé de réception du signal envoyé. La différence entre ce temps de réception et le temps d'émission donne la durée de propagation du signal entre la source émettrice et le récepteur. Illustrons cette approche par un échange de messages entre la source S et le récepteur M. Nous supposons que S et M sont synchronisés. Soit  $t_s$  l'instant du début de la transmission du signal à partir de S et  $t_r$  l'instant de fin de réception du message par M. Dans ce cas, le TOA est obtenu à partir de l'équation (B.4). Une fois que ce temps de propagation estimé, on peut donc évaluer la distance séparant la source émettrice et le récepteur par la relation (B.5).

$$toa = t_r - t_s, \quad (\text{B.4})$$

$$d = c \times toa. \quad (\text{B.5})$$

Pour obtenir le lieu géométrique, on convertit d'abord les TOA obtenus en distances en considérant la vitesse de propagation du milieu dans lequel a lieu l'échange d'informations. La méthode géométrique de détermination du point localisé est identique à celle de la métrique de la RSS, comme nous le verrons par la suite. Les inconvénients de cette technique sont principalement liés aux problèmes de synchronisation entre émetteur et récepteur, aux trajets multiples et au NLOS, qui sont sources d'erreurs dans les systèmes de localisation.

#### B.4.4 La métrique de la différence de temps d'arrivée

Une alternative à la technique de la TOA, est la technique temporelle de la différence de temps d'arrivée (Time Difference Of Arrival - TDOA). Elle permet d'éviter le problème de synchronisation entre la source émettrice et le récepteur [Caf03]. Elle nécessite, en fonction de l'application visée, au moins deux stations émettrices (ou réceptrices) au lieu d'un récepteur (ou un émetteur) unique. En réalité, les techniques de TOA peuvent être assimilées aux techniques de la TDOA puisque, dans les deux cas, il est nécessaire de comparer, en temps, le signal utile à un signal de référence. Dans le cas du TOA, le signal de référence est dit signal de synchronisation qu'il convient de mesurer ou de restituer. Dans le cas de la TDOA, le signal de référence provient d'une autre antenne de réception (ou d'émission) qu'on appelle station de référence (cf. section 1.2.4) séparée spatialement de la première par une distance connue. Cette technique de TDOA a suscité de nombreux travaux de recherche et reste une approche recommandée lorsque les limites de la TOA ou du RSS apparaissent [Gez05]. L'information de position liée à la TDOA peut être obtenue de deux manières différentes.

La première approche suppose la transmission d'une source vers plusieurs récepteurs. Soit un signal,  $s(t)$ , émis à partir d'une source dans un canal bruité vers des stations réceptrices. Le modèle général d'estimation du temps de retard entre les signaux  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  reçus par les deux stations de base est donné par :

$$r_1(t) = \alpha_1 s_1(t - \tau_1) + n_1(t), \quad (\text{B.6})$$

$$r_2(t) = \alpha_2 s_2(t - \tau_2) + n_2(t), \quad (\text{B.7})$$

où  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont les atténuations du signal sur le trajet de l'émetteur vers les stations réceptrices 1 et 2,  $n_1(t)$  et  $n_2(t)$  représentent les bruits sur ces mêmes trajets, et  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont les temps de retard du signal (ou les TOA) correspondants. Ce modèle général d'estimation suppose que  $s(t)$  est réel et stationnaire,  $n_1(t)$  et  $n_2(t)$  sont des processus aléatoires de moyenne nulle et  $s(t)$  est non corrélé avec les bruits  $n_1(t)$  et  $n_2(t)$ . En se référant au temps de retard et aux amplitudes ramenées à l'échelle de l'amplitude du récepteur qui a le temps d'arrivée le plus court tel que  $\tau_1 < \tau_2$ , les équations (B.6) et (B.7) peuvent être reformulées respectivement, par (B.8) et (B.9).

$$r_1(t) = s(t) + n_1(t), \quad (\text{B.8})$$

$$r_2(t) = \alpha s_2(t - \Delta) + n_2(t), \quad (\text{B.9})$$

où  $\alpha = \alpha_2/\alpha_1$  est le rapport d'amplitude et  $\Delta = \tau_2 - \tau_1$ . L'objectif est d'estimer  $\Delta$ , la différence de temps d'arrivée (TDOA) de  $s(t)$  entre une paire de récepteurs.

De nombreuses méthodes plus directes dites méthodes d'inter-corrélation généralisée (Generalized Cross-Correlation - GCC) permettant d'obtenir la TDOA, ont été développées [Caf03, p. 55]. Nous allons présenter dans ce qui suit celles qui ont été proposées dans [Gar92, Kna76]. Ces méthodes de GCC effectuent un pré-filtrage des signaux de réception des deux stations avant d'estimer la TDOA. Ce pré-filtrage permet d'améliorer la précision de l'estimation de la TDOA en mettant, d'une part, en exergue les fréquences pour lesquelles le rapport signal à bruit (Signal to Noise Ratio - SNR) est le plus élevé et, d'autre part, en atténuant la puissance du bruit avant que le signal ne passe dans le corrélateur. L'expression permettant de décrire la méthode de GCC pour l'estimation des TDOA peut se mettre sous la forme (B.10).

$$C_{r_2 r_1}(\tau) = \alpha C_s(\tau - \Delta), \quad (\text{B.10})$$

avec  $C_s(\tau)$  et  $C_{r_2 r_1}(\tau)$  respectivement, les fonctions d'auto-corrélation de  $s(t)$  et d'inter-corrélation généralisée de  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$ .

La valeur de l'argument  $\tau$  qui maximalise la fonction d'auto-corrélation correspond à la valeur estimée de la TDOA ( $\Delta$ ). L'équation (B.10) est aussi équivalente à (B.11).

$$C_{r_2 r_1}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} r_1(t) r_2(t - \tau) dt. \quad (\text{B.11})$$

Cependant, comme la fonction  $C_{r_2 r_1}(\tau)$  ne peut être observée que pendant un temps fini, on ne peut obtenir qu'une estimation de cette fonction, décrite par (B.12). Afin d'améliorer la précision de l'estimation du retard, le filtrage des deux signaux est effectué avant l'intégration dans (B.12) comme le montre la figure B.4. Chaque signal  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  est filtré par des fonctions de transfert  $H_1(f)$  et  $H_2(f)$ , respectivement, avant corrélation. Cette opération est effectuée sur un intervalle temporel avec un décalage régulier de  $\tau$ , jusqu'à ce qu'un pic de corrélation soit obtenu. La valeur du retard correspondant au pic d'inter-corrélation est l'estimation de la TDOA (B.13). Si le corrélateur fournit une estimation non biaisée de la TDOA  $\Delta$ , les deux filtres à l'entrée du corrélateur doivent avoir les mêmes réponses en phase et dans ce cas, ils peuvent être considérés comme identiques [Hah73].

$$\hat{C}_{r_2 r_1}(\tau) = \int_0^T r_1(t) r_2(t - \tau) dt, \quad (\text{B.12})$$

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau} \left| \hat{C}_{r_2 r_1}(\tau) \right|, \quad (\text{B.13})$$

avec  $T$  la durée du temps d'observation et  $\hat{\tau}$  la valeur de  $\tau$  qui maximise  $\hat{C}_{r_2 r_1}(\tau)$ . Cette approche exige que les signaux  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  soient numérisés et transmis à une unité centralisée pour le traitement.

Soit  $G_{r_2 r_1}(f)$ , la densité spectrale d'inter-corrélation. Cette fonction est liée à la fonction d'inter-corrélation (B.11) par la relation :

$$C_{r_2 r_1}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_{r_2 r_1}(f) \exp(j\pi f \tau) df, \quad (\text{B.14})$$

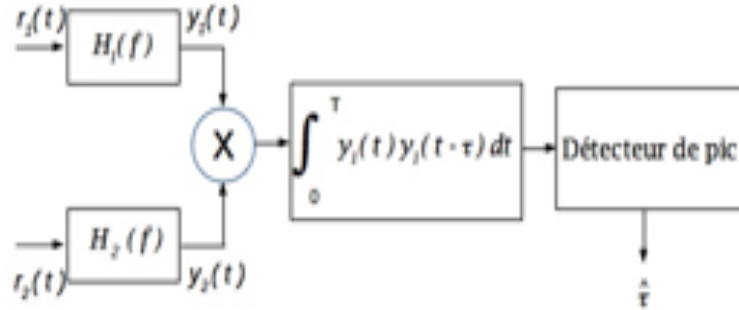


FIGURE B.4 – Méthode de l'inter-corrélation généralisée pour l'estimation des TDOA.

où

$$G_{r_2r_1}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{r_2r_1}(\tau) \exp(-j\pi f\tau) d\tau. \quad (\text{B.15})$$

Comme nous l'avons dit précédemment, puisqu'on ne peut observer  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  que pendant une durée finie, une estimation  $\hat{G}_{r_1r_2}(f)$  de  $G_{r_1r_2}(f)$  peut être obtenue. Par conséquent, si les filtrages de  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  donnent, respectivement,  $y_1(t)$  et  $y_2(t)$  avant la corrélation, la densité spectrale d'inter-corrélation peut s'écrire comme (B.16).

$$G_{y_2y_1}(f) = H_1(f)H_2(f)G_{r_2r_1}(f), \quad (\text{B.16})$$

où  $H_1(f)$  et  $H_2(f)$  sont les filtres utilisés pour  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$ , respectivement, et  $H$  représente l'expression complexe conjuguée de  $H$ . Ainsi, l'expression (B.11) de l'inter-corrélation généralisée entre  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  devient :

$$G_{y_2y_1}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} H_1(f)H_2(f)G_{r_2r_1}(f) \exp(j\pi f\tau) df. \quad (\text{B.17})$$

Si  $H_{GCC}(f) = H_1(f)H_2(f)$  désigne la fonction de transfert équivalente, comme on ne

peut obtenir qu'une estimation de  $G_{y_2y_1}(\tau)$ , la relation (B.17) se transforme en :

$$G_{y_2y_1}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} H_{GCC}(f) G_{r_2r_1}(f) \exp(j\pi f\tau) df, \quad (\text{B.18})$$

qui est utilisée pour estimer la TDOA  $\Delta$ . La méthode de GCC utilise la fonction de transfert  $H_{GCC}(f)$  pour minimiser le bruit et les interférences. Le choix de  $H_{GCC}(f)$  est donc très important, particulièrement quand le signal reçu contient plusieurs répliques du signal envoyé, du fait des trajets multiples. Les différents choix pour  $H_{GCC}(f)$  sont décrits dans [Car73, Fig68, Gar92, Hah73] et sont regroupés dans le tableau B.3.

TABLE B.3 – Les fonctions de transfert GCC.

Nom de la méthode	Fonction de transfert $H_{GCC}(f)$
Corrélation ordinaire	1
Roht Impulse Response	$1 / G_{r_1r_1}(f)$ ou $1 / G_{r_2r_2}(f)$
Smooth Coherence Transform	$1 / \sqrt{G_{r_1r_1}(f)G_{r_2r_2}(f)}$
Eckart	$G_{SS}(f) /  G_{n_1n_1}(f)G_{n_2n_2}(f) $
Hannon-Thomson ou Maximum Likelihood	$ \gamma_{r_2r_1}(f) ^2 /  G_{r_2r_1}(f)  [1 - \gamma_{r_2r_1}^2(f)]$  $\gamma_{r_2r_1}(f) = G_{r_2r_1}(f) / \sqrt{G_{r_1r_1}(f)G_{r_2r_2}(f)}$

L'approche de la TDOA qui vient d'être décrite est pratique quand l'objectif est de localiser une source. Elle ne s'applique pas dans le cas où c'est la source qui doit être positionnée à partir de signaux provenant de plusieurs sources. Par ailleurs, si on suppose que les deux stations émettrices sont synchronisées entre elles mais pas avec la station réceptrice, une méthode triviale d'estimation de la TDOA consiste à effectuer la différence entre les deux TOA obtenues.

#### B.4.5 Les métriques hybrides

Les techniques hybrides sont une combinaison d'au moins deux des techniques précédemment présentées (TOA/TDOA, TOA/AOA, TDOA/AOA, TOA/RSS, TDOA/RSS ou AOA/RSS).

Les travaux effectués dans [Con02, Wan06, Yan07] ont montré que l'utilisation de la TDOA/AOA permettrait de réduire les erreurs de localisation dues aux trajets multiples.

Par exemple, la technique TDOA/AOA proposée dans [Con02] pour localiser un utilisateur mobile dans des systèmes cellulaires large bande, a montré que cette combinaison serait plus performante que celle basée sur la TDOA uniquement si, et seulement si, la mesure de l'AOA est exacte. Les études basées sur la même technique ont également été menées dans [Wan06] mais cette fois, avec l'utilisation d'un filtre étendu de Kalman pour atténuer les erreurs de mesures des TOA et AOA dues aux NLOS. La même technique utilisée dans [Yan07] montre qu'elle peut permettre de faire de la localisation en 2-D avec seulement deux stations de base réceptrices.

Sahinoglu et Catovic dans [Sah04] ont mis en exergue l'avantage de combiner TDOA et RSS. Leurs résultats indiquent que pour des systèmes de communication large bande courte portée, l'utilisation de la RSS et de la TDOA conduit à deux types d'amélioration de la précision de localisation par rapport au cas où seules des mesures de TDOA sont utilisées. La combinaison TDOA/RSS permettrait alors d'améliorer la précision de l'estimation globale de position. Avec cette combinaison, ils ont abouti à la conclusion selon laquelle la limite de la borne de Cramer Rao (Cramer Rao Lower Bound - CRLB) devient significativement plus faible à proximité des appareils utilisant la RSS. Cette constatation provient de la suppression des singularités dans la CRLB lorsqu'on est à proximité des appareils fonctionnant avec la TDOA.

Le tableau B.4 fournit un récapitulatif des principales métriques de localisation. On y présente quelques unes de leurs limites ainsi que leurs avantages.



TABLE B.4 – Tableau récapitulatif des principales métriques de localisation.

Techniques de localisation	Limites	Avantages
Technique basée sur la puissance des signaux reçus (Received Signal Strength, RSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'avoir un trajet direct</li> <li>- Précision faible</li> <li>- Mauvaise performance en présence de trajets multiples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implémentation facile</li> <li>- Algorithme simple</li> <li>- Disponibilité des modèles mathématiques d'atténuation</li> </ul>
Technique basée sur l'angle d'arrivée des signaux reçus (Angle Of Arrival, AOA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'avoir un trajet direct</li> <li>- Coût d'implémentation élevé</li> <li>- Sensibilité aux trajets multiples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algorithme simple</li> <li>- Nombre de stations de base fixes réduit</li> </ul>
Technique basée sur le temps d'arrivée des signaux reçus (Time of Arrival, TOA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Synchronisation entre émetteur et récepteur</li> <li>- Nécessité d'avoir un trajet direct</li> <li>- Nécessité d'une résolution temporelle élevée du récepteur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Précision élevée en milieu confiné</li> <li>Bonne estimation des paramètres</li> <li>- Algorithme simple</li> </ul>
Technique basée sur la différence de temps d'arrivée des signaux reçus (Time Difference Of Arrival - TDOA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Synchronisation entre récepteurs ou émetteurs</li> <li>- Nécessité d'avoir un trajet direct</li> <li>- Nécessité d'une résolution temporelle élevée du récepteur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Précision élevée en indoor</li> <li>- Bonne estimation des paramètres</li> <li>- Algorithme simple</li> <li>Pas de synchronisation entre émetteur et récepteur</li> </ul>

## B.5 Les méthodes de localisation

Après avoir présenté les différentes techniques qui permettent d'obtenir les observables utilisées comme paramètres de position dans les systèmes de localisation, nous allons aborder les méthodes qui permettent d'obtenir la position proprement dite. Ces méthodes ont été listées dans le tableau 2.1. Chaque méthode étant basée sur une métrique, on peut donc distinguer deux grandes classes de méthodes : les méthodes utilisant le calcul de la distance et celles basées sur la mesure des angles d'arrivée.

### • La triangulation

La méthode de triangulation est la celle utilisant au moins deux angles d'arrivée (AOA). Pour appliquer cette méthode, le mobile doit connaître les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$  indiqués dans la figure B.5 ainsi que la distance  $S_1S_2$  séparant les deux stations de base.

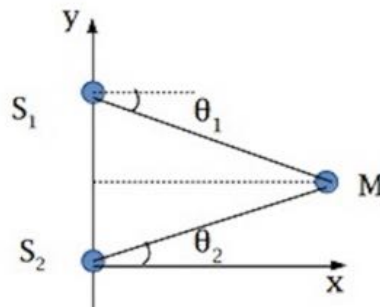


FIGURE B.5 – Schéma de principe de la triangulation.

Soit un mobile  $M(x, y)$ , de position inconnue, la source du signal reçu par les stations  $S_1(x_1, y_1)$  et  $S_2(x_2, y_2)$ . Les angles d'arrivée du signal  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont mesurés respectivement, entre les axes  $MS_1$  et  $MS_2$  et les perpendiculaires à la direction  $S_1S_2$  en  $S_1$  et  $S_2$ . Ils sont estimés soit à l'aide d'antennes directives ou d'un réseau d'antennes directives en supposant que les premiers signaux arrivent toujours selon le trajet direct. fin de déterminer la position de  $M$ , nous définissons un repère avec  $S_1$  comme origine et  $S_1S_2$  l'axe des ordonnées (figure B.5). Une fois ces angles estimés par la technique AOA décrite au paragraphe B.3.1.1, on peut déterminer facilement les caractéristiques du triangle  $S_1MS_2$ , soit :

$$S_1 M = \frac{S_1 S_2 \times \cos(\theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (\text{B.19})$$

$$S_2 M = \frac{S_1 S_2 \times \cos(\theta_1)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (\text{B.20})$$

La position du mobile  $M$  est alors déterminée à partir des équations (B.21) et (B.22).

$$x = S_1 S_2 \text{tg}(\theta_1) + \text{tg}(\theta_2), \quad (\text{B.21})$$

$$x = S_1 S_2 \text{tg}(\theta_1) \text{tg}(\theta_1) + \text{tg}(\theta_2). \quad (\text{B.22})$$

#### • La méthode du Pattern matching ou du Fingerprinting

La méthode du Pattern matching ou Fingerprinting est basée sur la fusion de données ou la collecte de données. Ces données peuvent être des RSS, des AOA, des TOA et/ou des TDOA. Elle s'opère en deux étapes [Pah02]. Dans la première étape ou étape d'apprentissage, des caractéristiques de l'environnement sont mesurées à des endroits différents et les données sont stockées avec une information de référence spatiale. Cette étape est également qualifiée de phase hors ligne, car elle est généralement effectuée avant l'activation du service de localisation fourni par le réseau. La deuxième étape ou phase en ligne commence lors de l'opération réelle de localisation. Les mêmes caractéristiques de l'environnement sont mesurées et les résultats sont comparés aux valeurs stockées (valeurs des paramètres obtenues lors de la première phase).

Selon l'évolution de la caractéristique mesurée au cours du temps, cette méthode peut s'avérer très performante. Cependant, lorsque la zone de couverture devient grande et qu'un grand nombre de capteurs sont impliqués, la taille de la base de données augmente considérablement, ce qui rend l'utilisation du Fingerprinting fastidieuse en terme de temps de calcul [Pah02]. En outre, toute modification de la configuration telle que le déplacement d'une balise ou la modification de l'environnement, impliquera la création d'une nouvelle base de données.

- **Les méthodes basées sur un calcul de distance**

Ces méthodes permettent de remonter à la position de localisation recherchée par le calcul de distance à partir des paramètres de position évoqués dans la section B.2.6.1 : lorsqu'on utilise les observables de la RSS ou du TOA, on parle de trilatération; lorsqu'on utilise les TDOA, la méthode porte le nom de multilatération.

**La trilatération** : La trilatération est une méthode permettant de déterminer la position du mobile récepteur  $M$  en utilisant la géométrie des triangles d'une manière similaire à la triangulation. Le procédé implique la connaissance de la distance du mobile par rapport aux différentes stations de base  $T_i, i = 1, \dots, N$ . Pour déterminer la position en 2-D, il faut au moins trois noeuds de référence. Soient  $(x_i, y_i)$  les coordonnées des stations émettrices et  $(x, y)$  celles du mobile qui veut se localiser. La position des stations et celle du mobile sont reliées par (B.23) :

$$d_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2, \quad (\text{B.23})$$

où  $d_i$  représente la distance entre le mobile et la station de base  $i$ . Ces distances sont déduites des valeurs obtenues par RSS ou TOA.

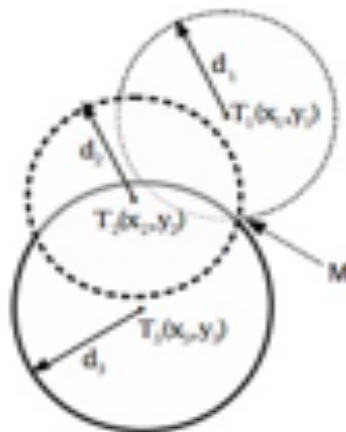


FIGURE B.6 – Méthode de localisation par trilatération.

La position de l'émetteur (ou du récepteur) en 2-D est alors déduite de l'intersection d'au moins trois cercles dont les centres sont les positions des différents récepteurs (ou

émetteurs) et les rayons sont les distances  $d_i$  entre l'émetteur (ou le récepteur) et les différents récepteurs (ou différents émetteurs). Dans le cas d'une configuration géométrique en 3-D, ce lieu géométrique devient l'intersection de trois sphères.

La figure B.6 montre la localisation en 2-D d'un mobile  $M$  à l'intersection des cercles  $C_1(T_1, d_1)$  et  $C_2(T_2, d_2)$ . En cas d'ambiguïté ou de l'existence de deux intersections des deux cercles, un troisième cercle  $C_3(T_3, d_3)$  émetteur peut être utilisé pour affiner le choix de la position  $M$ .

**La multilatération :** La multilatération est un procédé basé sur l'intersection soit d'hyperboles en 2-D, soit d'hyperboloïdes en 3-D obtenues à partir de TDOA décrites par (B.24) :

$$\begin{aligned} d_{i,1} &= d_i^2 - d_1^2, \\ &= [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2] - [(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2], \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

$$i = 1, \dots, N - 1, \quad (\text{B.25})$$

avec  $N$  le nombre de stations émettrices. Une phase importante de cette méthode est le choix d'une antenne de référence, supposée être la station de base numéro 1 ( $T_1$ ). La position est obtenue en utilisant au minimum trois (ou quatre) émetteurs et un récepteur en 2-D (ou en 3-D) comme l'illustre la figure B.7.

Lorsqu'on suppose une localisation en 2-D (ou en 3-D), on obtient alors  $N - 1$  équations d'hyperboles (ou hyperboloïdes) et la position de l'objet est donnée par le point d'intersection de ces hyperboles (ou hyperboloïdes). La figure B.8 est un exemple de lieu géométrique de la multilatération pour  $N = 4$  en 3-D.

Nous venons de présenter quelques notions fondamentales sur la localisation. Elles ont mis en évidence les différentes catégories de localisation, les éléments du processus de localisation, les sources d'erreur des systèmes de localisation et les critères qui permettent d'évaluer leur performance, les métriques et méthodes usuelles des systèmes de localisation en relevant les avantages et les limites de chacune.

Le système étudié utilisera, d'une part, des paramètres temporels et devra permettre, d'autre part, à un objet mobile de se positionner en 2-D ou en 3-D dans un environnement confiné ou non, éventuellement riche en trajets multiples et en l'absence de trajet direct (NLOS).

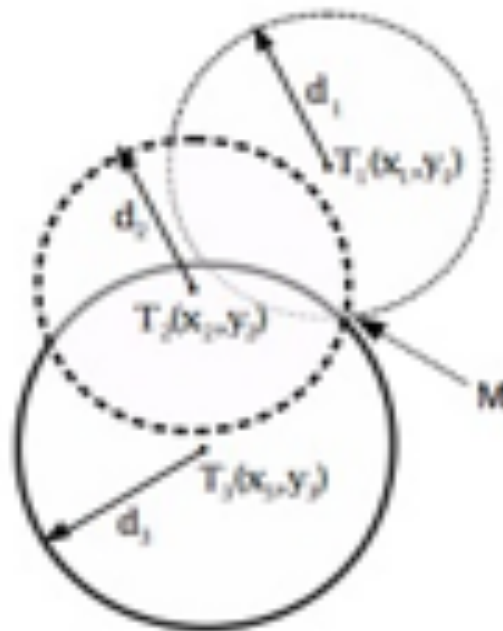


FIGURE B.7 – Méthode de localisation par multilatération.

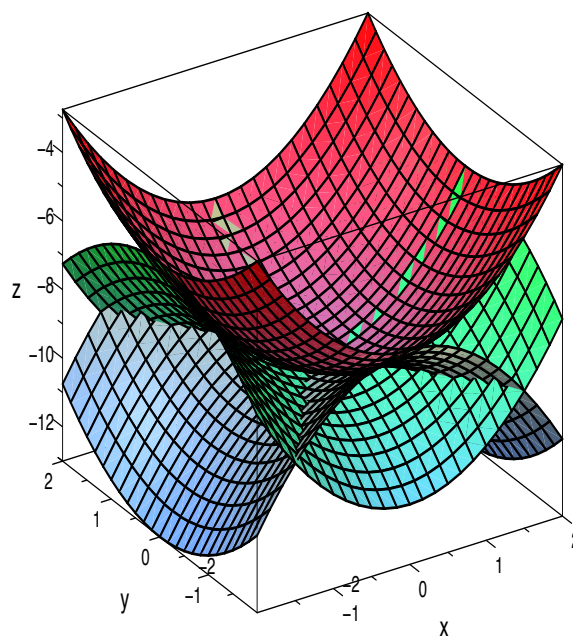


FIGURE B.8 – Exemple de lieu géométrique de multilatération.

De ce fait, la métrique adéquate parmi toutes celles qui ont été présentées est la métrique temporelle basée sur la TDOA. La méthode de localisation qui en découle est la multilatération. La position du mobile est calculée à partir d'algorithmes basés sur la méthode des moindres carrés ou des méthodes itératives [Sri07, Foy76]

## **B.6 Système de positionnement en milieu confiné utilisant les techniques ULB**

### **B.6.1 Introduction**

Un système de positionnement 3D est constitué de deux grandes parties comme l'illustre la figure B.9.

- Le système d'émission, utilisé pour générer les signaux de localisation et gérer les techniques d'accès multiples.
- Le système de réception, constitué de deux sous-blocs : le sous-bloc d'extraction des paramètres de positionnement et le sous-bloc de calcul de la position.

Le sous-bloc d'extraction des paramètres de position reçoit les signaux après passage dans le canal. Il utilise une métrique de positionnement et une technique d'estimation de ses paramètres, souvent en présence de trajets multiples et parfois en l'absence de vision directe entre certains émetteurs et le récepteur.

Le second sous-bloc est principalement constitué d'une unité de calcul implémentant l'algorithme de positionnement 3-D, qui permettra à l'objet mobile de retrouver ou d'identifier sa position.

Le canal de propagation envisagé est l'intérieur des bâtiments ou un tunnel décrit par les différents canaux ULB indoor proposés dans le standard IEEE 802.15.4a. Ces canaux peuvent servir dans la validation du système par simulation.

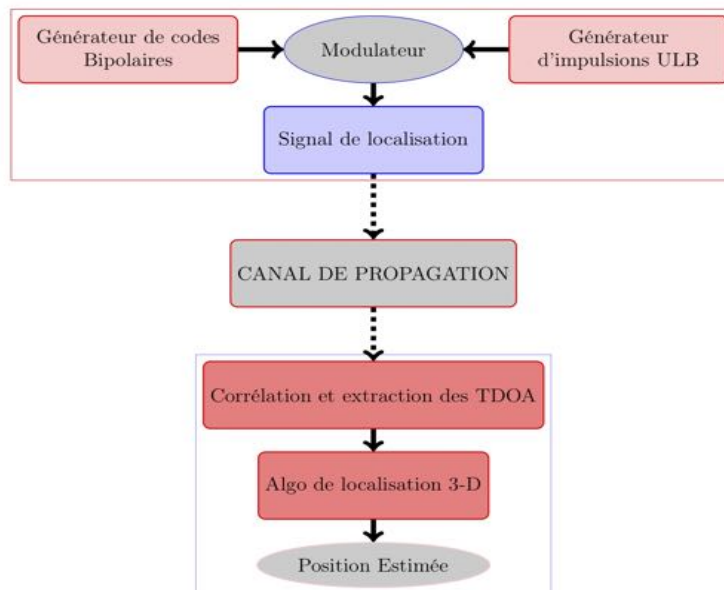


FIGURE B.9 – Architecture générale du système de localisation.

## B.6.2 Le bloc émetteur

Il convient d'abord choisir les paramètres du signal de localisation pour dimensionner les impulsions, fixer leur période de répétition et sélectionner les techniques d'accès multiples pour répondre au cahier des charges.

### B.6.2.1 Paramètres du signal de positionnement

Le choix de la période de répétition  $T_f$  des impulsions, la durée du signal  $T = N_f \times T_f$ , la longueur du code de localisation et la technique de codage des impulsions sont des paramètres importants qu'il faut prendre en compte lors de la conception du signal de localisation [Gez09, Sah08].

Le respect des limites des puissances d'émission des systèmes ULB fixées par la normalisation conditionne la largeur  $\tau$  de l'impulsion. En pratique, il est pratiquement très difficile de générer des impulsions de durée suffisamment brève pour couvrir toute la bande de fréquence utilisable sans licence. Le générateur d'impulsions programmable dont nous disposons possède une fréquence d'échantillonnage maximale de 20 Giga



éch. par seconde (Géch/s) et une largeur de bande de 3 GHz. De ce fait, la largeur de l'impulsion est fixée en fonction de cette contrainte technique et de la précision de localisation souhaitée.

Cette précision de localisation s'évalue à l'aide de la limite inférieure de Cramer-Rao, CRLB (Cramer-Rao Lower Bound) [Qi02, Qi03, Ram01] comme la limite de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, Root Mean Square Error, exprimée en mètres) :

$$RMSE \geq \frac{c}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{SNR}\beta}, \quad (\text{B.26})$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière,  $SNR$  est le rapport signal sur bruit (Signal to Noise Ratio) du signal reçu (exprimé dans une échelle linéaire) et  $\beta$  un paramètre défini par :

$$\beta^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2 |S(f)|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2}, \quad (\text{B.27})$$

où  $f$  désigne la fréquence et  $S(f)$  la densité spectrale de puissance du signal de localisation.

Remarquons que si le rapport signal à bruit est faible, d'autres bornes plus fiables doivent être utilisées, comme celles de Barankin et Ziv-Zakai [Jac04].

Il reste à fixer la période de répétition des impulsions. La suite d'impulsions transmises s'écrit :

$$s(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} I_n g(t - nT_f), \quad (\text{B.28})$$

où  $I_n$  représente une séquence cyclique stationnaire de moyenne  $\mu_i$ , de variance  $\xi_i$  et de période  $T_f$ . Il est établi dans [Pro00, p. 204-207] que la densité spectrale de puissance moyenne (DSP) d'un tel signal est de la forme :

$$\Phi_{ss}(f) = \frac{\xi^2}{T_f} |G(f)|^2 + \frac{\mu_i^2}{T_f^2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left| G\left(\frac{m}{T_f}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{m}{T_f}\right), \quad (\text{B.29})$$

où  $G(f)$  est la transformée de Fourier de l'impulsion  $g(t)$  et  $\delta(f)$  est la fonction de Dirac. On remarque que la DSP du signal a une composante continue (premier terme), proportionnelle à  $\xi_i^2 |G(f)|^2$  et inversement proportionnelle à la période de répétition  $T_f$  de  $g(t)$ . Le second terme est la composante discrète de la DSP du signal, proportionnelle à  $\frac{\mu_i^2}{T_f^2} |G(f)|^2$ , qui apparaît à des fréquences multiples de  $1/T_f$ . La DSP du signal contient donc de fortes raies, ce qui pourrait entraîner une violation des limites des puissances d'émission autorisées à ces fréquences. Pour supprimer ces composantes discrètes, il faut donc utiliser des séquences aléatoires périodiques de moyenne nulle ( $\mu_i = 0$ ).

Ceci conduit à choisir  $I_n$  comme une séquence aléatoire de moyenne nulle et de variance  $\xi_i = 1$  telle que  $I_n \in [+1, -1]$ , afin d'améliorer les propriétés spectrales du signal. Ainsi, l'équation (B.29) devient :

$$\Phi_{ss}(f) = \frac{|G(f)|^2}{T_f}. \quad (\text{B.30})$$

Si l'on suppose que la DSP maximale des signaux ULB est proche du maximum autorisé (-41,3 dBm/MHZ) dans une bande de fréquence  $B$  (en MHz), l'énergie maximale de l'impulsion  $E$  (en Joules) est donnée par :

$$E = BT_f 10^{-7,13}, \quad (\text{B.31})$$

et que l'on peut écrire  $SNR = N_f E / N_0$ , le rapport signal à bruit est donc proportionnel à  $N_f T_f$  (limite inférieure du temps d'estimation de la position). En considérant l'équation (B.26), il est alors possible de montrer que  $RMSE$  varie comme l'inverse de la racine carrée du produit précédent, de sorte que la précision de mesure s'améliore quand le temps de mesure augmente.

### B.6.2.2 Techniques de codage pour l'accès multiple

Les techniques de codage pour l'accès multiples déjà présentées dans l'Annexe A s'appliquent en fait aux problèmes de communication. Dans le cadre des problèmes de localisation, un unique bit de données doit être transmis. On peut donc recourir à des

techniques classiques plus basiques, comme le multiplexage temporel (TDMA, Time Division Multiple ACCESS) ou le multiplexage fréquentiel (FDMA, Frequency Division Multiple ACCESS). Par contre, il faut utiliser plusieurs émetteurs, chacun étant caractérisé par son propre code. Les codes de localisation doivent donc être orthogonaux entre eux (avoir des inter-corrélations nulles) pour permettre au récepteur de différencier les signaux provenant des différentes stations de base. Ceci suggère donc l'utilisation de la technique dite à étalement de spectre CDMA (Code Division Multiple Access) [Vit98, Bue06, Pet95].

Dans la section précédente, l'intérêt d'utiliser des codes pseudo-aléatoires de moyenne nulle a été montré. Ceux qui, parmi ces derniers, ont des propriétés de quasi-orthogonalité sont donc les plus utiles. On peut citer :

- Les séquences à longueur maximale (m-séquences) générées à l'aide de registres à décalages synthétisant un polynôme générateur, qui sont utilisées dans la technique DS (Direct Sequence)-CDMA [Pet95]. Ces séquences possèdent de bonnes propriétés d'auto-corrélation, mais leurs propriétés d'inter-corrélation sont relativement médiocres.
- les séquences de Gold [Gol67], qui présentent à la fois de bonnes propriétés d'auto-corrélation et d'inter-corrélation, générées à partir de deux m-séquences dites préférentielles.

Cependant, la technique traditionnellement la plus étudiée dans la littérature pour l'accès multiple en ULB est le Time Hopping (TH) unipolaire. Dans cette méthode toutes les impulsions ont la même polarité. L'utilisation de cette technique TH combinée avec la modulation PPM (Pulse Position Modulation) présente des raies spectrales qui peuvent être réduites en utilisant des codes pseudo-aléatoires [Nak06]. il faut alors construire des codes TH permettant à chaque station de base de transmettre une unique impulsion dans chaque slot de durée  $T_c$  et les codes TH des différentes stations émettrices doivent également être orthogonaux pour éviter toute collision à la réception [Iac02]. La technique est désignée simplement sous le nom de TH-CDMA.

### B.6.3 Méthode de localisation

Dans les systèmes de localisation, l'émetteur et le récepteur peuvent être synchrones ou asynchrones. Les deux techniques temporelles les plus utilisées pour faire du positionnement en ULB sont la TOA et la TDOA. Seule la TDOA ne nécessite pas de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur, ce qui explique notre choix de cette technique. Bien que les émetteurs et le récepteur ne soient pas synchrones, les émetteurs (stations de base) sont quant à eux supposés synchrones.

Les systèmes de localisation basés sur la TDOA reposent sur l'un des deux procédés suivants. Dans le premier procédé, un signal de référence est diffusé par l'objet mobile vers plusieurs stations de base qui partagent leurs estimations de TOA pour calculer les TDOA [Caf99]. Dans le second schéma, plusieurs signaux sont diffusés à partir des stations de base fixes, synchronisées entre elles et dont les positions sont connues, vers un objet mobile. C'est l'objet mobile qui dans ce cas mesure les différentes TDOA (technique utilisée par le GPS). C'est ce dernier procédé que nous choisissons.

Les stations de base, situées à des positions connues décrites par leurs coordonnées  $x_i$ ,  $y_i$  et  $z_i$ , vont transmettre de manière synchrone leurs signaux à l'objet mobile dont la position inconnue est caractérisée par ses coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ . Parmi toutes les stations émettrices, l'objet mobile va choisir celle dont le signal est reçu en premier comme station de référence, par rapport à laquelle les TDOA seront calculées.

Avec  $N$  stations émettrices, on obtient  $(N - 1)$  TDOA. Si nous visons une localisation 3-D, avec donc trois inconnues  $x$ ,  $y$  et  $z$ , le nombre de stations doit être supérieur ou égal à quatre ( $N \geq 4$ ). Par ailleurs, si nous visons une localisation 3-D, avec trois inconnues  $x$ ,  $y$  et  $z$ , le nombre de stations doit être supérieur ou égal à quatre ( $N \geq 4$ ). L'interprétation qui en découle est que la position du récepteur (mobile) est l'intersection d'au moins trois hyperboloïdes dans la localisation 3-D.

Bien avant la détermination proprement dite de la position du mobile, il faut estimer avec la meilleure précision possible le premier trajet et les possibles trajets multiples,  $\tau_d^{(k)}$  et  $\tau_n^{(k)}$  respectivement, de chaque émetteur. Une mauvaise estimation de ces paramètres, lorsque le trajet de plus forte amplitude mesuré ne correspond pas au premier trajet, entraîne inévitablement des erreurs de positionnement.

### B.6.3.1 Détection du premier trajet

Le premier trajet d'un canal riche en trajets multiples peut ne pas toujours correspondre au trajet d'amplitude la plus forte [Win02], alors que le récepteur à corrélation permet de déterminer les paramètres  $\alpha_n^{(k)}$  et  $\tau_n^{(k)}$  du trajet le plus fort. Dans le modèle IEEE 802.15.4a, le premier trajet (ou trajet direct) est pris en compte si et seulement si sa puissance est supérieure ou égale au seuil des -10 dB de la puissance maximale du trajet le plus fort. Il s'avère donc important de rechercher toujours le premier trajet quelque soit sa puissance à l'aide de techniques robustes et efficaces, une fois le trajet fort déterminé.

Différentes études basées sur les techniques du Maximum de Vraisemblance (Maximum-Likelihood, ML) [Wei], MUSIC (MUltiple Signal Classification) et ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique) ont été proposées pour estimer le temps d'arrivée [Sch86, Roy89]. Du fait de leur grande complexité, ces méthodes ne sont pas adaptées pour un système à basse consommation d'énergie. Nous retiendrons donc la technique basée sur la méthode du Maximum de Vraisemblance Généralisée (General Maximum-Likelihood, GML) [Wei]. Après avoir déterminé tous les trajets utiles (dont la puissance dépasse un certain seuil), ce que font très bien les récepteurs Rake [Zie01].

L'expression générale du signal reçu est décrite par l'équation B.32 :

$$r_m(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_d^{(k)} s^{(k)}(t - \tau_d^{(k)}) + \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^{L_p} \alpha_n^{(k)} s^{(k)}(t - \tau_n^{(k)}) + n_S(t). \quad (\text{B.32})$$

Cette équation comporte des trajets directs ( $\alpha_d^{(k)}$  et  $\tau_d^{(k)}$ ,  $k = 1, \dots, N$ ), où  $N$  est le nombre de stations émettrices, ainsi que d'autres trajets éventuels, au nombre de  $L_p$  (a priori inconnu), représentés par ( $\alpha_n^{(k)}$  et  $\tau_n^{(k)}$ ,  $n = 1, \dots, L - p$ ). Les retards des différents trajets sont ordonnés par valeurs croissantes :

$$\tau_d^{(k)} \leq \tau_1^{(k)} \leq \tau_2^{(k)} \leq \dots \leq \tau_{L_p}^{(k)}. \quad (\text{B.33})$$

Le terme  $n_S(t)$  est un bruit supposé gaussien et de moyenne nulle. Le terme  $s^{(k)}(t)$  est appelé signal de référence (template en anglais). Il représente la réponse impulsionnelle du canal ULB en l'absence de bruit et d'interférence, qui diffère du signal émis

car celui-ci subit des distorsions en amplitude et phase de ses composantes fréquentielles lors de la traversée du canal.

Comme chaque signal reçu est composé d'une seule impulsion, le signal  $s^{(k)}(t)$ , en présence de  $L_p$  trajets, est reconstruit comme :

$$\widehat{s^{(k)}}(t) = \sum_{n=1}^{L_p} \widehat{c}_n g\left(t - \widehat{\tau}_n^{(k)}\right). \quad (\text{B.34})$$

Les paramètres  $\widehat{c}_n \in \mathfrak{R}$  et  $\widehat{\tau}_n^{(k)} \in \mathfrak{R}^+$  sont deux variables aléatoires, dont on doit trouver les meilleures estimations pour que  $\widehat{s^{(k)}}(t)$  constitue la meilleure approximation de  $s(t)$ . Pour déterminer les  $L_p$  trajets, on échantillonne le signal reçu avec une période de  $\Delta\tau$  secondes. Lorsque la puissance  $c_n^2$  de l'échantillon  $n$  du signal reçu excède un seuil minimal, le trajet  $|c_n^{(k)}|$  est associé au trajet de retard  $n\Delta\tau$ .

En fait, c'est le principe du récepteur Rake, qui utilise  $L_p$  "doigts". Pour un nombre de "doigts" supérieur à 5, la complexité du récepteur Rake devient excessive, la technique du maximum de vraisemblance ML est supérieure [Win02, Lee02]. La méthode proposée par Lee permet de déterminer complètement les trajets significatifs.

### B.6.3.2 Algorithme de localisation

Pour permettre au mobile de calculer sa position, on a recours à des algorithmes. Par exemple, dans le cas d'une localisation en 2-D avec un nombre d'émetteurs supérieur à 4, on utilise la méthode des moindres carrés ou des méthodes itératives [Sri07]. Toutes les TDOA sont déterminées par rapport à la station de référence, repérée par l'indice  $r \in [1, \dots, N]$ ,  $N$  étant le nombre total de stations. Les autres stations sont repérées par l'indice  $i$  qui prend ses valeurs dans l'intervalle de 1 à  $N$  ( $r$  étant exclu). Introduisons les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  du mobile (à déterminer) et celles  $(x_i, y_i, z_i)$  de l'émetteur  $i$  qui sont fixes et connues. La distance entre le mobile et l'émetteur  $i$  est notée  $d_i$ . L'écart de distance  $d_{i,r}$  entre l'émetteur de référence et l'émetteur  $i$  s'écrit :

$$\begin{aligned} d_{i,r} &= d_i - d_r, \\ &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \\ &\quad \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2}. \end{aligned} \quad (\text{B.35})$$

Cette équation est non-linéaire. Quand  $i$  varie, on obtient un système de  $(N - 1)$  équations non-linéaires, dont la solution donne la position du mobile. Cette solution est

obtenue généralement par linéarisation. On écrit  $d_i = d_{i,r} + d_r$  et on élève au carré et on remplace  $d_i$  par son expression, il vient :

$$\widehat{d}_{i,r}^2 + 2d_{i,r} = K_i - K_r - 2X_{i,r}x - 2Y_{i,r}y - 2Z_{i,r}z. \quad (\text{B.36})$$

Cette équation comporte 4 inconnues : la position du mobile  $(x, y, z)$  et la distance  $d_r$  entre le mobile et l'émetteur de référence. Le terme  $d_{i,r}$  est équivalent à la TDOA estimée :

$$\begin{aligned} d_{i,r} &\simeq c\widehat{\tau}_{i,r}, \\ &\simeq c(\tau_i - \widehat{\tau}_r), \end{aligned} \quad (\text{B.37})$$

où  $c$  représente la vitesse de la lumière.

La relation ci-dessus n'est qu'approximative, car les estimations des retards sont toujours entachées d'erreurs. En posant  $\widehat{d}_{i,r} = c\widehat{\tau}_{i,r}$ , il vient finalement :

$$\widehat{d}_{i,r}^2 + 2\widehat{d}_{i,r} \simeq K_i - K_r - 2X_{i,r}x - 2Y_{i,r}y - 2Z_{i,r}z, \quad (\text{B.38})$$

un système d'équations linéaires qui donne le résultat correct, pour peu que l'approximation effectuée soit très proche de la réalité.

Afin de bien couvrir l'environnement considéré, il est évident que les émetteurs ne doivent pas être alignés, l'équation (B.38) se simplifiant alors : les coordonnées accessibles du mobile sont situées dans un même plan, l'autre coordonnée n'étant pas mesurable. Par ailleurs, le choix de la meilleure configuration des stations de base peut utiliser le critère de dilution géométrique de la précision (GDOP, Geometric Dilution Of Precision). Il s'agit d'un estimateur non biaisé donné par :

$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_{mes}} \quad (\text{B.39})$$

où  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  sont les erreurs respectives selon les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$ , et  $\sigma_{mes}$  est l'erreur fondamentale due aux systèmes de mesure des paramètres RSS, TOA ou TDOA.

L'erreur de position est donc non seulement liée aux paramètres mesurés, mais elle l'est aussi à la configuration des stations de base. En général, on choisit une configuration telle que la valeur de GDOP soit suffisamment basse dans la majorité des positions susceptibles d'être occupées par le mobile (à l'intérieur de la zone que l'on désire couvrir).

De plus, le système doit être cohérent : le nombre de TDOA dont on dispose doit être égal au nombre d'inconnues (coordonnées du mobile), soit 3 dans le cas de la 3-D et 2 pour la 2-D. Ceci entraîne 4 (3-D) ou 3 (2-D) stations de base (compte-tenu de la station de référence). La résolution du système d'équations obtenu permet d'obtenir la solution  $(x, y, z)$  sous forme paramétrique (en fonction des  $X_{i,r}, Y_{i,r}, Z_{i,r}, K_i$  et  $K_r$ ). La valeur de  $d_r$  peut ainsi être calculée et la position du mobile déterminée. Cette méthode est celle proposée par Fang [Fan90] et Chan et Ho [Cha94].

Si le système est incohérent et que le nombre de stations de base excède la valeur nécessaire, il y a redondance et les méthodes itératives, basées sur des séries de Taylor [Foy76, Tor84] sont utilisées. Ces méthodes itératives sont souvent coûteuses en temps de calcul et peuvent souffrir d'un problème de convergence fortement lié au choix du point initial. Des méthodes non-itératives ont donc été proposées, dont l'interpolation sphérique [Smi87b], l'intersection sphérique [Sch87, Smi87a], Divide and Conquer [Abe89], la méthode de Fang [Fan90] et la méthode hyperbolique de Chan et HO [Cha94]. Les deux dernières sont moins gourmandes en temps de calcul et donc préférables si une consommation énergétique faible est visée.

### B.6.3.3 Algorithme 3-D

La méthode itérative de Fang [Fan90] utilise exactement 2 TDOA pour la 2-D et 3 TODA pour la 3-D. Lorsque le nombre de TDOA est supérieur à 3 c'est-à-dire que le nombre d'émetteurs est supérieur à 4, cette méthode de Fang ne peut pas être utilisée. Un autre algorithme, basé sur la méthode de Chan et HO [Cha94], qui s'applique lorsque le nombre d'informations de position (TDOA) est supérieur ou égal à 3 pour la 2-D et à 4 pour la 3-D, a été proposé par Kossonou dans sa thèse [Kos14]. En posant

$$\mathbf{h}_1 = \frac{1}{2} \left( \widehat{d}_{i,r}^2 - K_i + K_r \right), \quad (\text{B.40})$$

$$\mathbf{G}_a = - \left( X_{i,r} \quad Y_{i,r} \quad Z_{i,r} \quad \widehat{d}_{i,r} \right), \quad (\text{B.41})$$

$$\mathbf{Z}_a = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ Z_{i,r} \end{pmatrix}, \quad (\text{B.42})$$



l'équation (B.38) peut s'écrire sous la forme matricielle alternative :

$$\mathbf{h}_1 \simeq \mathbf{G}_a \times \mathbf{Z}_a, \quad (\text{B.43})$$

La matrice des erreurs de localisation s'écrit :

$$\psi_1 = \mathbf{h}_1 - \mathbf{G}_a \times \mathbf{Z}_a. \quad (\text{B.44})$$

Les valeurs de  $\mathbf{Z}_a$  sont alors celles qui maximisent la fonction de distribution du maximum de vraisemblance ML :

$$\widetilde{\mathbf{Z}}_{\alpha ML} = \arg \max_{\mathbf{Z}_a} (p(\mathbf{h}_1 | \mathbf{Z}_a)), \quad (\text{B.45})$$

où  $p$  représente la fonction de densité de probabilité conditionnelle de  $(\mathbf{H}_1)$  par rapport à  $(\mathbf{Z}_a)$ .

Si on suppose que le vecteur des erreurs  $\psi_1$  suit une loi gaussienne de moyenne nulle et de matrice de covariance  $(\Phi)$ , la fonction ML se met sous la forme [Caf99] :

$$p(\mathbf{h}_1 | \mathbf{Z}_a) = \frac{1}{(2\pi)^{(N-1)/2} |\Phi|^{1/2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\mathbf{h}_1 - \mathbf{G}_a \times \mathbf{Z}_a)^T \times \Phi^{-1} \times (\mathbf{h}_1 - \mathbf{G}_a \times \mathbf{Z}_a) \right], \quad (\text{B.46})$$

où  $(.)^T$  est la transposée de  $(.)$ .

L'équation B.45 devient donc :

$$\widetilde{\mathbf{Z}}_{\alpha ML} = \arg \min_{\mathbf{Z}_a} \left[ (\mathbf{h}_1 - \mathbf{G}_a \times \mathbf{Z}_a)^T \times \Phi^{-1} \times (\mathbf{h}_1 - \mathbf{G}_a \times \mathbf{Z}_a) \right]. \quad (\text{B.47})$$

Ce système d'équations est encore non-linéaire et peut-être résolu en deux étapes [Cha94].

Dans la première on suppose qu'il n'existe pas de relation entre les coordonnées  $(x, y, z)$  du mobile et sa distance  $d_r$  à la station de référence. Il vient ainsi :

$$\widetilde{\mathbf{Z}}_{\alpha ML} = (\mathbf{G}_a^T \times \Phi^{-1} \times \mathbf{G}_a)^{-1} \times \mathbf{G}_a^T \times \mathbf{h}_1. \quad (\text{B.48})$$

Or, comme [Cha94] :

$$\Phi \simeq c^2 \mathbf{B} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{B}, \quad (\text{B.49})$$

où  $\mathbf{B}$  est la matrice diagonale des  $(d_i)$  ( $i \neq r$ ) et  $\mathbf{Q}$  est la matrice de covariance des TDOA de dimension  $(N-1) \times (N-1)$ .

En supposant que tous les SNR sont égaux à la réception, les éléments diagonaux de la matrice précédente sont égaux à la variance  $a^2$  des TDOA, alors que les éléments hors-diagonale valent tous  $a^2/2$ . On obtient ainsi une première estimation de la position :

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{Z}}_{\mathbf{a}_1} &= \left( Z_{a_x} \quad Z_{a_y} \quad Z_{a_z} \quad Z_{a_{d_r}} \right)^T \\ &= \left( \mathbf{G}_{\mathbf{a}}^T \times \mathbf{Q}^{-1} \times \mathbf{G}_{\mathbf{a}} \right)^{-1} \times \mathbf{G}_{\mathbf{a}}^T \times \mathbf{Q}^{-1} \times \mathbf{h}_1. \end{aligned} \quad (\text{B.50})$$

Dans la seconde étape, on tient compte de la dépendance entre les coordonnées du mobile et sa distance à la station de référence. Un nouveau vecteur d'erreurs  $\psi_2 = \mathbf{h}_2 - \mathbf{G}_{\mathbf{f}} \times \mathbf{Z}_{\mathbf{a}_2}$  est défini, avec :

$$\mathbf{h}_2 = \begin{pmatrix} (Z_{a_x} - x_r)^2 \\ (Z_{a_y} - y_r)^2 \\ (Z_{a_z} - z_r)^2 \\ (Z_{a_{d_r}} - d_r)^2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{G}_{\mathbf{f}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Z}_{\mathbf{a}_2} = \begin{pmatrix} (x - x_r)^2 \\ (y - y_r)^2 \\ (z - z_r)^2 \end{pmatrix}. \quad (\text{B.51})$$

La solution de la seconde estimation est alors :

$$\begin{aligned} \widetilde{\mathbf{Z}}_{\mathbf{f}} &\simeq \left( \mathbf{G}_{\mathbf{f}}^T \times \mathbf{D}^{-1} \times \mathbf{Q}^{-1} \times \mathbf{G}_{\mathbf{a}}^T \times \mathbf{D}^{-1} \times \mathbf{G}_{\mathbf{a}} \mathbf{G}_{\mathbf{f}} \right)^{-1} \times \\ &\quad \left( \mathbf{G}_{\mathbf{f}}^T \times \mathbf{D}^{-1} \times \mathbf{G}_{\mathbf{a}}^T \times \mathbf{Q}^{-1} \times \mathbf{G}_{\mathbf{a}} \times \mathbf{D}^{-1} \mathbf{h}_2 \right), \end{aligned} \quad (\text{B.52})$$

avec  $\mathbf{D}$  matrice diagonale contenant les résultats de la première estimation :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} (Z_{a_x} - x_r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (Z_{a_y} - y_r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (Z_{a_z} - z_r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (Z_{a_{d_r}}) \end{pmatrix}. \quad (\text{B.53})$$

La solution finale est alors :

$$\widetilde{\mathbf{Z}}_{\mathbf{f}} = |\mathbf{Z}_{\mathbf{p}} - \mathbf{Z}_{\mathbf{r}}|, \quad (\text{B.54})$$

avec  $\mathbf{Z}_{\mathbf{p}} = (x \ y \ z)^T$  et  $\mathbf{Z}_{\mathbf{r}} = (x_r \ y_r \ z_r)$ . Comme  $\widetilde{\mathbf{Z}}_{\mathbf{f}}$  n'est connu qu'en valeur absolue, on peut mettre la solution finale sous la forme :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_r \pm \sqrt{\widetilde{Z}_{f_x}} \\ y_r \pm \sqrt{\widetilde{Z}_{f_y}} \\ z_r \pm \sqrt{\widetilde{Z}_{f_z}} \end{pmatrix}. \quad (\text{B.55})$$

Il y a donc en fait 8 solutions, parmi lesquelles on devra choisir la meilleure. Une première approche consiste à estimer les TDOA pour chaque solution et à retenir celle qui conduit à la plus faible TDOA [Kos11]. Elle nécessite un temps de calcul plus important (et donc une consommation d'énergie accrue) que la seconde approche. Cette dernière consiste en la comparaison des distances euclidiennes des 8 solutions possibles avec le résultat de la première estimation  $\widehat{\mathbf{Z}}_{\mathbf{a}_1}$ . La meilleure solution est celle qui conduit à la plus petite distance euclidienne [Kos12].

# Annexe C

## Intégration des systèmes au moyen de circuits logiques programmables

### Sommaire

---

<b>B.1</b>	<b>Notions fondamentales sur les systèmes de localisation . . . . .</b>	<b>151</b>
B.1.1	Le repère . . . . .	152
B.1.2	Le support de transmission . . . . .	152
B.1.3	Les éléments du processus de localisation . . . . .	153
B.1.4	Les observables ou paramètres de position . . . . .	155
B.1.5	Méthodes de base de positionnement . . . . .	155
B.1.6	Infrastructure et protocoles de positionnement . . . . .	155
<b>B.2</b>	<b>Les différents critères d'évaluation des performances de localisation</b>	<b>157</b>
<b>B.3</b>	<b>Les sources d'erreur du système de localisation . . . . .</b>	<b>158</b>
<b>B.4</b>	<b>Les métriques et méthodes de localisation . . . . .</b>	<b>160</b>
B.4.1	La métrique de l'angle d'arrivée . . . . .	161
B.4.2	La métrique de la puissance du signal reçu . . . . .	161
B.4.3	La métrique du temps d'arrivée . . . . .	163
B.4.4	La métrique de la différence de temps d'arrivée . . . . .	164
B.4.5	Les métriques hybrides . . . . .	168

<b>B.5 Les méthodes de localisation</b> . . . . .	<b>171</b>
<b>B.6 Système de positionnement en milieu confiné utilisant les techniques ULB</b> . . . . .	<b>176</b>
B.6.1 Introduction . . . . .	176
B.6.2 Le bloc émetteur . . . . .	177
B.6.2.1 Paramètres du signal de positionnement . . . . .	177
B.6.2.2 Techniques de codage pour l'accès multiple . . . . .	179
B.6.3 Méthode de localisation . . . . .	181
B.6.3.1 Détection du premier trajet . . . . .	182
B.6.3.2 Algorithme de localisation . . . . .	183
B.6.3.3 Algorithme 3-D . . . . .	185

---

## C.1 Introduction

Une plateforme de développement en temps réel, basée sur les composants logiques programmables FPGA (Field Programmable Gate Array) a été développée au laboratoire. L'implémentation d'une unité de traitement en temps réel reste une tâche complexe comparée à la réalisation des manipulations sur les équipements de laboratoire (effectuées à l'aide d'un oscilloscope numérique qui permet d'observer des signaux de fréquence allant jusqu'à 20GHz), déjà plus complexe que la simulation sous le logiciel Matlab. Cette difficulté réside dans le choix des composants programmables nécessaires à la mise en place de cette plateforme, à savoir le FPGA, le CAN (convertisseur analogique-numérique, ADC) et le CNA (convertisseur numérique-analogique, DAC) [AD12]. Ces derniers doivent fonctionner à une très haute fréquence et offrir une large bande passante. En outre, l'interopérabilité entre ces différents composants est un élément primordial.

Le FPGA est un composant révolutionnaire qui offre une grande flexibilité matérielle et logicielle. Il est très utile pour les opérations qui traitent un important flux de données, telles que le traitement du signal et du réseau [Van13]. Il peut être des centaines

de fois plus rapide que les modèles à base de microprocesseurs, car il permet d'effectuer des millions d'opérations sur des architectures parallèles, programmées au sein de ressources réparties sur une puce de silicium. L'avantage majeur du FPGA est sa possibilité d'être reprogrammé plusieurs fois.

L'idée de combiner l'ultra large bande aux FPGAs est très prometteuse. En effet, les atouts du FPGA et la supériorité de l'ULB apporteront de nombreux avantages aux technologies, en particulier dans le domaine des communications sans fil. Au niveau matériel, le coût peut être négligé car la configuration et la maintenance peuvent être effectuées facilement. Au niveau système, de nombreuses techniques de communications peuvent être mises en oeuvre en raison de la capacité de l'Ultra Large Bande.

## C.2 Présentation des composants électriques : FPGA, CAN, CNA

Pour réaliser nos systèmes de communication ULB, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs de traitement du signal numérique à très haute vitesse. Chez les fabricants de FPGA, CAN et CNA, on ne trouve pas, de nos jours, de FPGA fonctionnant à des fréquences suffisamment élevées pour échantillonner ou traiter des signaux ULB directement. Une recherche relativement exhaustive sur les composants FPGA et CAN a été effectuée en vue de sélectionner les plateformes les plus rapides existantes sur le marché. Des cartes FPGA, CAN, CNA proposées par les sociétés Xilinx et Alphadata ont été choisies, au vu leurs caractéristiques techniques.

La figure C.1 représente l'architecture générale d'implémentation de nos systèmes ULB, qui se compose de :

1. Une carte porteuse : ADC-EMC,
- 2 Deux cartes de calcul : ADM-XRC (maximum 750 MHz),
3. Une carte CAN-CNA : XRM-ADC-S4/3G.

La carte porteuse (ADC-EMC) est une carte mère qui permet d'installer deux cartes ADM-XRC dans deux emplacements différents. Le schéma bloc de cette dernière est donné par la figure C.2.

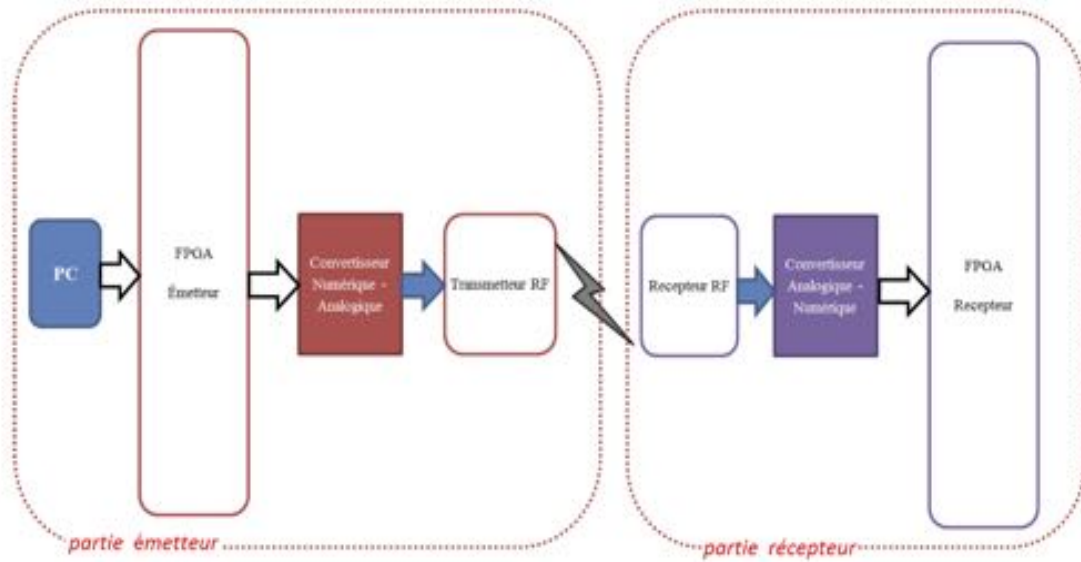


FIGURE C.1 – Architecture générale des systèmes.

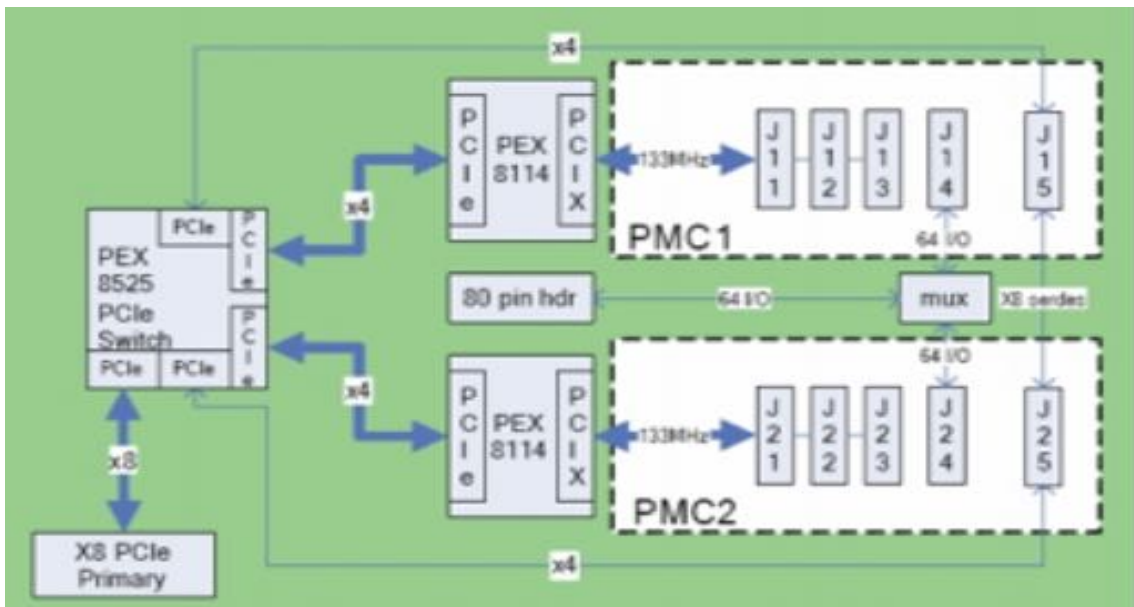


FIGURE C.2 – Schéma bloc de la carte porteuse ADC-EMC.

Elle est montée au niveau de l'unité centrale d'un poste de travail et connectée au port PCIe de ce dernier. La carte de calcul ADM-XRC-5T1 est une PMC (PCI Mezzanine Card) qui comporte deux composants FPGA (un pour le contrôle et un autre pour le développement), des bus de connexion, ainsi que d'autres éléments. On utilise aussi des horloges internes programmables variant de 31,25 MHz à 625 MHz.

## C.2.1 FPGA

### C.2.1.1 Présentation du composant FPGA

Le FPGA (Field-Programmable Gate Array) est un dispositif semi-conducteur, basé sur une matrice de blocs logiques configurables (CLB). C'est une plateforme programmable, contenant de nombreuses portes logiques et combinant les deux technologies PLD (Programmable Logic Device) et ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Le PLD est également un circuit intégré (IC : Integrated Circuit) programmable, tandis que l'ASIC est un circuit figé conçu pour des besoins spécifiques. Ce dernier composant est rapide, mais coûteux à fabriquer. Quand au FPGA, qui combine les deux, il peut surmonter leurs faiblesses à moindre coût, étant donné que même après sa fabrication, il peut être reprogrammé selon l'évolution des exigences de l'application [Van13].

Bien qu'une unique programmation du FPGA (OTP : One-Time Programmable) soit disponible, l'utilisation de la fonctionnalité de reprogrammation grâce aux SRAM reste dominante. La figure C.3 illustre le fonctionnement interne d'un FPGA, qui se compose de blocs logiques intégrés dans une structure générale de routage. Les blocs logiques configurables (CLB) sont entrelacés dans une matrice de commutation chargée de réorganiser les interconnexions entre eux. Chaque bloc logique est programmé séparément pour exécuter une fonction logique simple (telle que ET, OU, OU-EXCLUSIF, etc.) et les commutateurs sont programmés pour connecter ces blocs de sorte que les fonctions logiques globales soient implémentées.

Les unités logiques ont souvent une mémoire restreinte. Par conséquent, chaque fonction combinatoire booléenne de cinq ou six entrées doit être mise en oeuvre dans un bloc logique. Du fait que la structure générale de routage permet un câblage électrique arbitraire, les éléments logiques peuvent être alors connectés de la manière souhaitée.



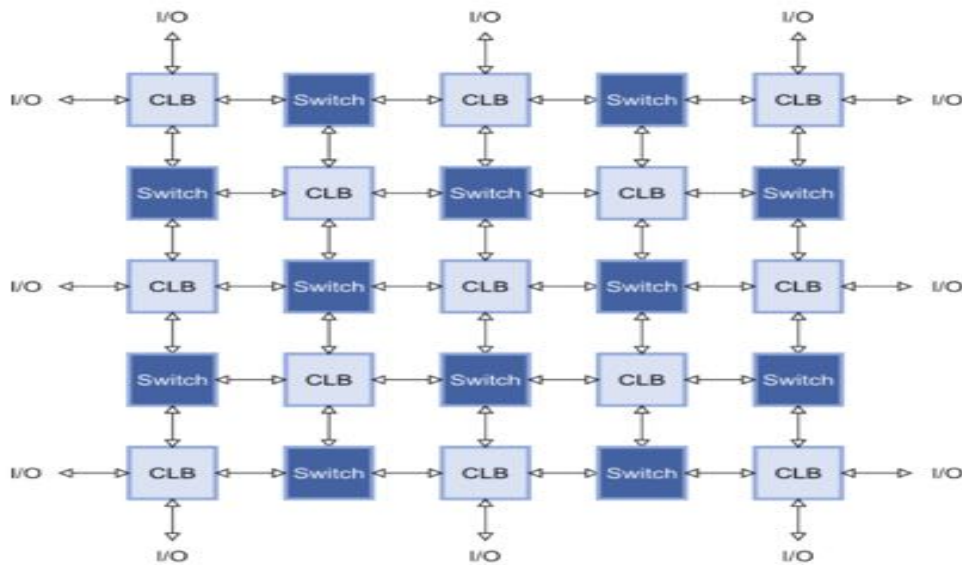


FIGURE C.3 – Le fonctionnement interne d'un FPGA.

Les fabricants de FPGA offrent un logiciel de développement qui compile une description de haut niveau d'une conception logique et génère un flux binaire. Ce dernier définit les bits de configuration du FPGA de manière appropriée, comme le représente la figure C.4

### C.2.1.2 La carte de traitement

L'ADM-XRC-5T1 est une carte FPGA de Alpha-Data de type PCI Mezzanine Carte (PMC) qui est conçue pour les applications utilisant le FPGA Virtex-5 SX95T de Xilinx. Le schéma en est donné à la figure C.5. Cette carte communique avec l'ordinateur via un pont PCI développé par Alpha-Data qui supporte le PCI-X et PCI. Ainsi, un multiplexeur des bus adresses/données à haute vitesse relie l'ordinateur au FPGA. Cette carte utilise également un connecteur XMC primaire pour fournir des connexions série à haute vitesse.

Le SMA-XRC-5T1 supporte le fonctionnement PCI-X/PCI haute performance sans la nécessité d'intégrer les noyaux de propriété dans le FPGA. Les spécifications sont les suivantes :

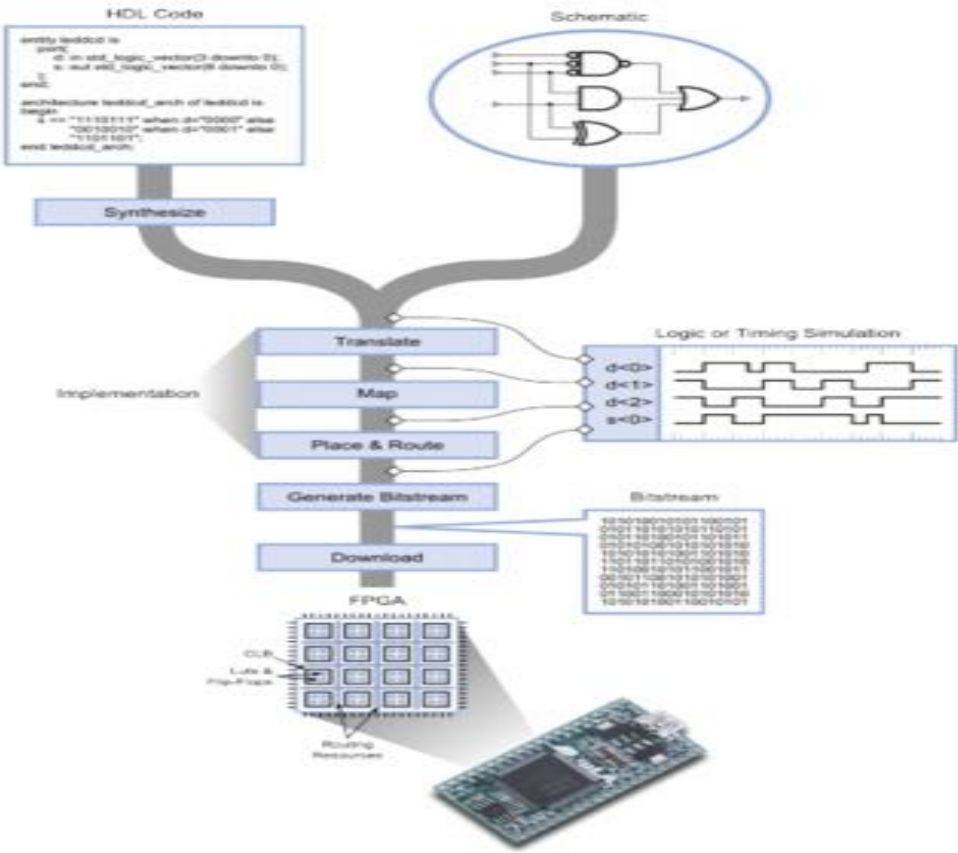


FIGURE C.4 – La conception logique et la génération du flux binaire.

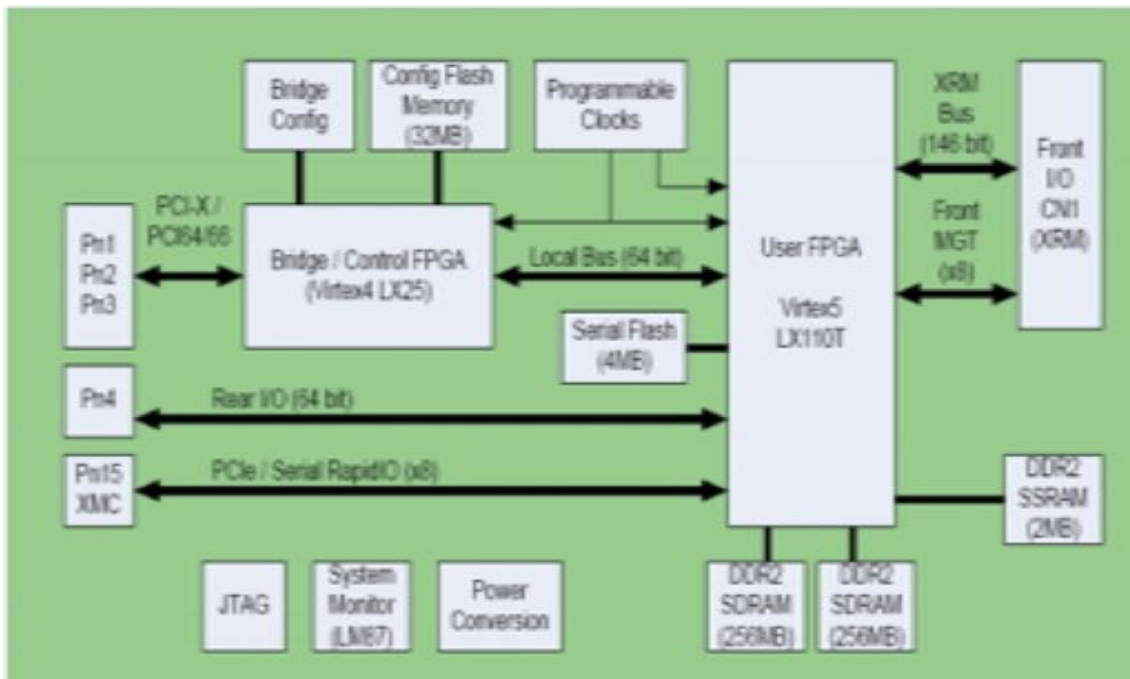


FIGURE C.5 – Schéma bloc de la carte de traitement ADM-XRC-5T1.

- Conforme au standard VITA 42 XMC,
- Conforme à la norme IEEE P1386-2001 Mezzanine Card commune (via le connecteur XMC),
- 8 voies de connexion PCIe/Serail RapidIO (via le connecteur XMC),
- 8 liens MGT supplémentaires (via l'adaptateur du panneau),
- PCI à haute performance et des contrôleurs DMA,
- Des vitesses de bus locaux jusqu'à 80 MHz,
- Deux banques indépendantes de 64Mx32 DDRII SDRAM (512MB en total),
- Une banque de 2Mx18 DDRII SSRAM (4 MB au total),
- Une horloge programmable entre 31.25MHz et 625MHz,
- Une horloge à faible jitter, stable à 200 MHz, pour la précision des retards IO,
- Un panneau arrière de l'utilisateur, connecteur PMC avec 64 signaux gratuits IO

- Une tension programmable d'E/S sur les interfaces
- Une prise en charge de 3,3 V de PCI et un PCI-X à 64 bits.

### C.2.1.3 Description du convertisseur Numérique/Analogique CNA

Le XRM-DAC-D4/1G est un module I/O qui fournit deux convertisseurs CNA de 16-bits, avec une fréquence d'échantillonnage allant jusqu'à 1GHz. La conversion numérique analogique joue un rôle important dans les systèmes mixtes analogiques/numériques. Dans les solutions DSP (Digital Signal Processing) modernes, où les signaux à grande vitesse sont utilisés, l'utilisation de CNA à grande vitesse est nécessaire [AD09]. Alpha-Data a développé trois variantes de carte pour la génération de signal analogique rapide, fonctionnant à des fréquences d'échantillonnage allant jusqu'à 1 GHz, sur la base des dispositifs DAC5681, DAC5681Z et DAC5682 de Texas Instruments. Cette carte est appelée XRM-DAC-D4/1G illustrée sur la figure C.6.

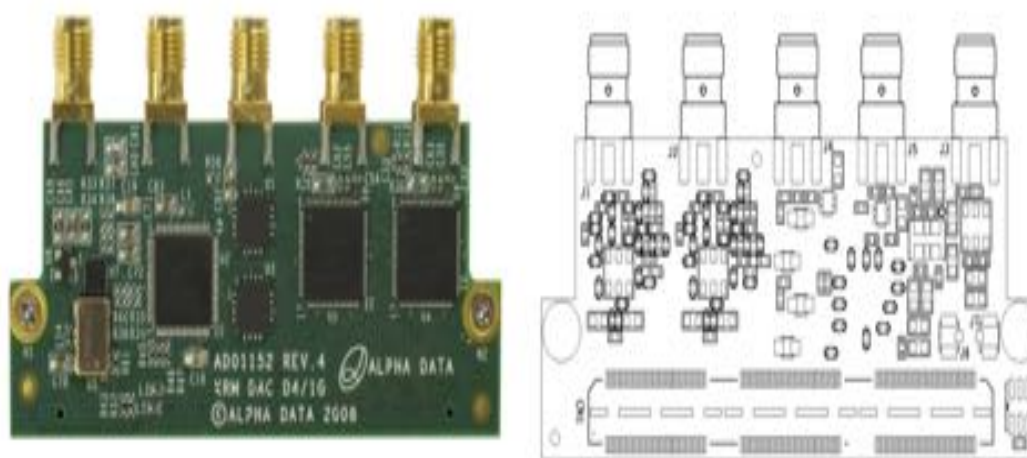


FIGURE C.6 – La carte XRM-DAC-D4/1G.

Annotation de la figure figC7 :

- J1 - La sortie CNA du canal "I",
- J2 - La sortie CNA du canal "Q",
- J3 - L'entrée d'horloge externe,
- J4 - Le connecteur AUX IO,

- J5 - Le connecteur Trig IO,
- J6 - Le connecteur GPIO, côté p,
- J7 - Le connecteur GPIO, côté n.

L'application développée doit d'abord configurer le FPGA avec le flux de bits en utilisant les fonctions du Standard SDK avant d'accéder à quelque matériel que ce soit via le bus local. Les différents blocs de système doivent être configurés dans le bon ordre afin de générer des signaux analogiques correctement. Premièrement, la source d'horloge doit être établie, le synthétiseur configuré, puis vient la génération d'horloge du FPGA. Une fois qu'un signal stable DCLK a été établi, les registres internes du CAD peuvent être configurés en fonction de la fréquence de fonctionnement requise.

#### C.2.1.4 Description du convertisseur Analogique/Numérique CAN

Le convertisseur analogique-numérique (CAN) est le composant frontal dans notre récepteur ULB. Dans ce projet, nous avons utilisé la carte CAN S4/3G d'Alpha-Data. La carte CAN S4/3G est basée sur le dispositif ADC083000 de National Instruments [AD12]. L'ADC083000 a une résolution de 8 bits et une fréquence d'échantillonnage allant jusqu'à 3,4 Géch/s. Il consomme une faible puissance et offre une haute performance CMOS en terme de conversion analogique-numérique. A la cadence de 3 Géch/s, il ne consomme que 1,8 Watts en utilisant une seule alimentation de 1,9 volts. Pour atteindre un taux d'échantillonnage de 3 Géch/s, il peut utiliser à la fois le front montant et descendant de l'entrée d'horloge de 1,5 GSPS [Sem06].

La conversion du signal analogique en signal numérique est assurée par la carte CAN (XRM-ADC-S4/3G) dont le schéma est donné à la figure C.7, et l'opération inverse par le convertisseur CNA. Le CAN peut échantillonner un signal jusqu'à 3 Géch/sec avec une résolution de 8 bits. Deux entrées nous intéressent : celle du signal d'entrée (J3), et celle de l'horloge d'échantillonnage (J5).

Les échantillons du CAN sont transférés vers le FPGA via 32 paires de liaisons LVDS (Low Voltage Differential Signaling) plus une paire OVR (over riding). Ces données envoyées depuis le CAN sont capturées par des ISERDES (entrée sérialiseur-désérialiseur), le CAN génère des données tant que l'horloge est alimentée. Donc, si les horloges ISERDES ont été alignées avec les données du CAN, des données valides seront gé-

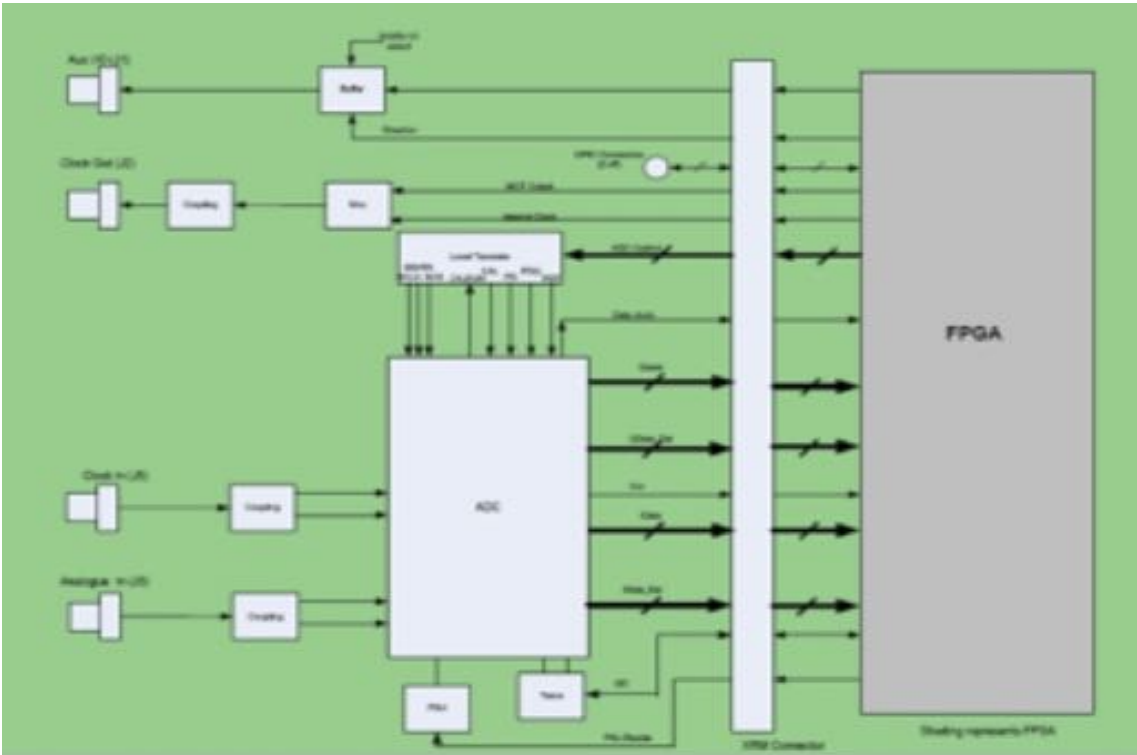


FIGURE C.7 – Schéma bloc de la carte CAN XRM-ADC-S4/3G.

nées constamment. Le signal de chaque broche est un flux de données DDR (Double Data Rate) fonctionnant à  $F_{clock}/4$  où le  $F_{clock}$  est la fréquence d'horloge fournie au CAN [AD12]. L'entrée d'ISERDES fonctionne également à cette vitesse, tandis que la sortie fonctionne à  $F_{clock}/8$ . Cette horloge ainsi que celle du FPGA ont la même fréquence. Chaque ISERDES fournit 4 bits de données en parallèle à chaque cycle d'horloge FPGA et il y en a 32, donc la sortie des ISERDES se compose de 4 voies de données de 32 bits chacune. Comme les échantillons ont 8 bits de largeur, nous avons soit : 8 échantillons par canal sur deux canaux chacun à  $F_{clock}/8$ , ce qui fait un taux d'échantillonnage de  $8 \times F_{clock}/8 = F_{clock}$  ou 16 échantillons sur un seul canal et donc un taux d'échantillonnage de  $16 \times F_{clock}/8 = 2 \times F_{clock}$ . Dans les deux cas, 16 échantillons sont émis à chaque cycle d'horloge du FPGA ( $F_{clock}/8$ ) [Sem06].

## C.3 Synthèse d'un système ULB

### C.3.1 Architecture globale du système

Les architectures sont développées en VHDL (VHSIC Hardware Description Language, VHSIC étant l'acronyme de Very High Speed Integrated Circuit), langage de description matérielle, sous les environnements de synthèses ISE de chez Xilinx [Lil12] et l'outil de simulation Modelsim de Mentor Graphics [ENS08].

L'architecture globale d'un système ULB comprend un bloc émetteur et un bloc récepteur, comme le montre la figure C.8. Le bloc récepteur est représenté à la figure C.9.

Le signal de référence est généré à partir de ses échantillons contenus dans une mémoire morte dont l'adresse est générée par un compteur qui est commandé par l'horloge système à 750 MHz. Le compteur génère aussi des signaux "activer" (utilisé pour valider le corrélateur en sortie) et "écrire" (utilisé dans la phase de calcul), servant à commander le fonctionnement du corrélateur travaillant en parallèle. Le compteur est également chargé de l'adressage en entrée du corrélateur pour gérer les échantillons du signal reçu en sortie du CAN.

Un détecteur, placé à la sortie du corrélateur, permet de trouver les pics de la corrélation et de les comparer afin d'élaborer sa sortie, qui représente une décision sur les

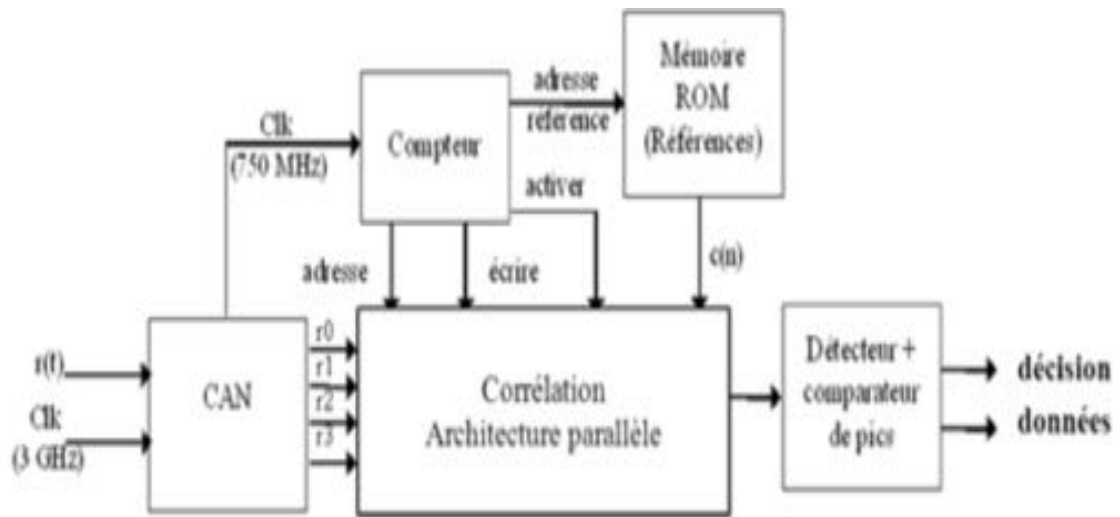


FIGURE C.8 – Architecture générale d'implémentation sur FPGA.

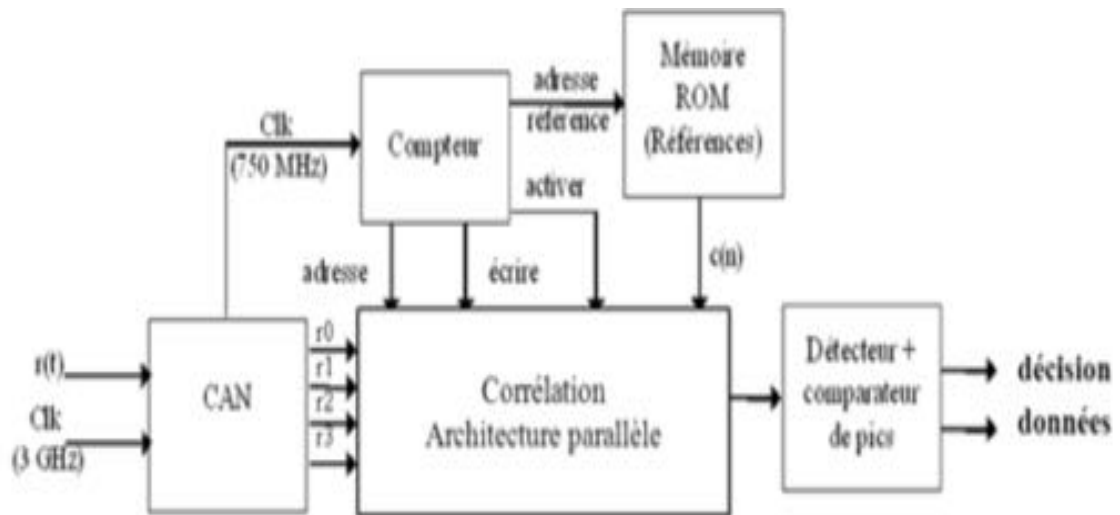


FIGURE C.9 – Architecture du récepteur d'un système de communication ULB.



données du signal reçu. Le bloc de détection est nécessaire pour déterminer le pic de corrélation. Chaque symbole reçu est corrélé avec le symbole de référence et, en cas de forte ressemblance, on obtient un pic maximum. Un comparateur est également utilisé, dont la valeur du seuil permet de distinguer le signal du bruit. En cas d'utilisation d'une modulation spéciale des signaux ULB, comme dans la technique OAM, le bloc récepteur doit comporter un décodeur afin de reconnaître le symbole émis.

Cet algorithme peut être décrit comme suit : Partie synchronisation

- 1 Détection de la position du pic,
- 2 Calcul de la distance entre deux pics successifs,
- 3 Comparaison de la distance calculée avec la longueur du symbole. Elle doit être maximale, sinon on calcule la distance suivante entre deux pics successifs et on revient à l'étape 3,

## Partie décision

4 Une fois le maximum trouvé, on regarde si la position de la distance est médiane. Le symbole commence alors à partir de cette position. Ensuite, nous retournons au début de chaque symbole par un pas de 8 index (si le symbole contient 8 échantillons),

5 Une fois la première position trouvée, on vérifie la position et la polarité des pics. Si la position est au début du symbole, le bit le moins significatif (LSB)  $S_2$  est 0, sinon 1,

6. Passage à l'étape 1.

Ceci est illustré dans la figure C.10.

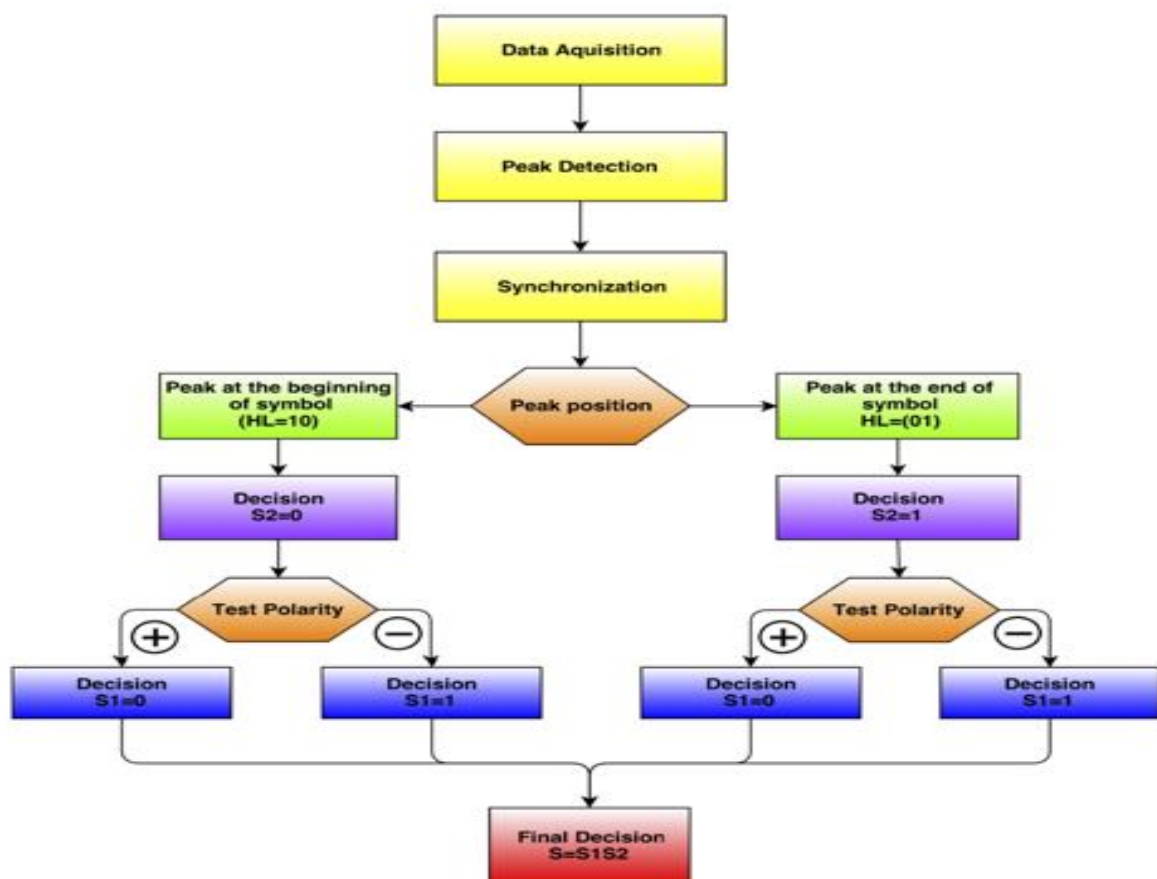


FIGURE C.10 – Diagramme de décodage.

En ce qui concerne le bloc émetteur, il comprend un générateur ULB que l'on peut intégrer dans les FPGA : on peut enregistrer les impulsions ULB d'une même famille dans une mémoire morte, prévoir la sélection d'un membre de la famille et la lecture

commandée par une horloge. Les échantillons successifs sont appliqués à l'entrée du CNA (commandé par la même horloge), la sortie étant envoyée sur une électronique d'émission (amplificateurs, antenne). Ceci revient à intégrer un générateur de signaux plus ou moins programmables (pourquoi ne pas prévoir d'enregistrer plusieurs familles d'impulsions dans la même mémoire morte). A titre d'exemple, la figure C.11 présente l'algorithme de développement VHDL pour la modulation 4\_OAM.

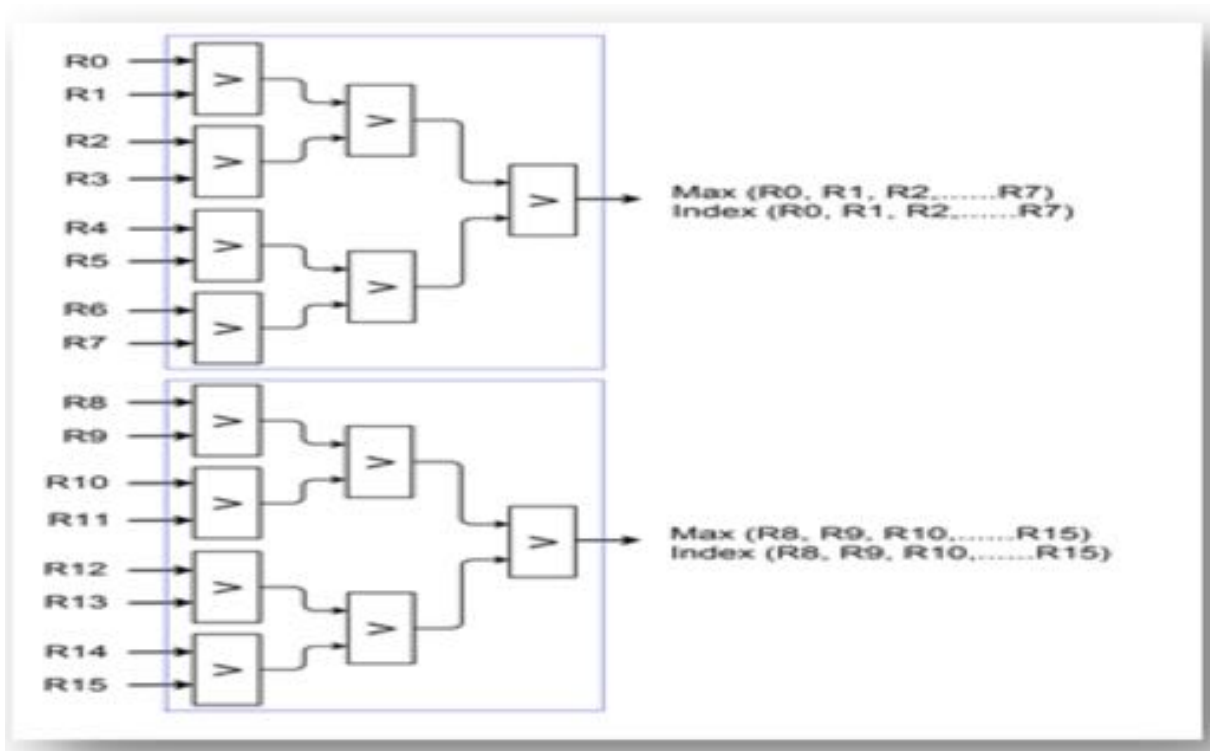


FIGURE C.11 – Algorithme de développement VHDL pour la modulation 4\_OAM.

Le point le plus critique dans la réalisation est le corrélateur fonctionnant en parallèle, point qui va faire l'objet d'une étude plus détaillée.

### C.3.2 Synthèse du corrélateur

Le récepteur calcule la corrélation entre le signal reçu et le signal de référence :

$$R_{cr}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} c(n)r(n+k), \quad (\text{C.1})$$

avec  $c(i)$  signal de référence,  $r(i)$  signal reçu,  $N$  longueur du signal de référence.

Par exemple, pour  $N = 8$ , les expressions des 9 premiers échantillons de la corrélation s'écrivent :

$$\begin{aligned} R_{cr}(i) = & c(0)r(i) + c(1)r(i+1) + c(2)r(i+2) + \\ & c(3)r(i+3) + c(4)r(i+4) + c(5)r(i+5) + \\ & c(6)r(i+6) + c(7)r(i+7), \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

avec  $0 \leq i \leq 8$ .

En complément, il faut signaler qu'en raison de la très courte durée des impulsions, la synchronisation entre émetteur et récepteur doit posséder une excellente précision, tout en utilisant des horloges à quartz bon marché. Ce problème peut s'avérer délicat à résoudre.

De plus, si l'on désire réaliser des tâches de localisation, l'estimation du temps d'arrivée des impulsions nécessite le développement d'algorithmes performants qui détectent l'impulsion correspondante au trajet direct, même si le trajet direct est obstrué ou si la forme de l'impulsion est altérée durant la propagation.

#### C.3.2.1 Problème de la limite d'échantillonnage

Dans le cas classique, après la réception du signal, dont la bande est  $F_s$ , on l'échantillonne à une fréquence  $F_e = N/T_s$ ,  $T_s$  étant la durée du signal. La valeur minimale de  $N$  (donc de  $F_e$ ) assurant une bonne corrélation est recherchée. Le facteur  $N$  représente aussi la taille de la corrélation. On diminue donc  $N$  jusqu'à constater une dégradation du signal de corrélation. Cette méthode est approximative et ne donne qu'un ordre

de grandeur. En effet ni l'horloge, ni le signal, ne sont en réalité stables et de plus, le niveau du bruit influence aussi le résultat. Un calcul pratique : si on prend  $T_s = 600$  ps (soit une bande du signal  $F_s = 3$ GHz), pour une valeur raisonnable  $N = 10$ , on a au minimum  $F_e = 30$  GHz. Une telle fréquence d'échantillonnage est loin d'être réalisable avec les matériels actuellement existants.

Afin de contourner la limitation de la fréquence d'échantillonnage et d'obtenir de bonnes performances, on peut augmenter la durée de l'impulsion d'origine, dont le spectre devient plus étroit, de façon à respecter le théorème de Shannon. Mais cette solution peut rarement être appliquée, car le spectre du signal sortira en partie du domaine autorisé pour l'ULB.

Dans la suite, une solution de contournement adaptée à la limitation de l'échantillonnage dans le but d'implémenter la corrélation, qui a été étudiée avec le simulateur VHDL Modelsim, est présentée : une architecture parallèle, utilisant plusieurs coeurs fonctionnant en parallèle.

### C.3.3 Architecture parallèle

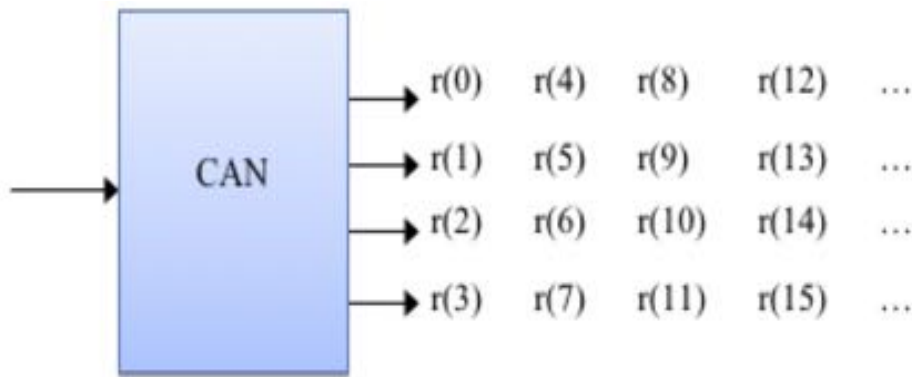
Nous avons testé des architectures en série, mais la vitesse de traitement n'est pas suffisante (750MHz). Pour augmenter le débit, nous souhaitons réaliser des calculs à 3 GHz. Nous proposons alors une architecture parallèle. Nous allons discuter de l'architecture pour  $N = 8$  et  $M = 4$ ,  $N$  étant la taille du signal de référence et  $M$  le nombre d'échantillons délivrés par le CAN. Par la suite, nous pouvons généraliser le résultat pour des valeurs de  $N$  et  $M$  quelconques (avec  $M < N$ ). Pour avoir  $M > 4$  échantillons à la sortie du CAN, on lui ajoute en cascade un démultiplexeur. Nous calculons la corrélation pendant chaque période de répétition  $T_r$  soit pour  $0 \leq k \leq K$  avec  $K = T_r/T_e$ .

Le CAN effectue une décimation et délivre 4 échantillons en parallèle :

$$r_i(k) = r(4k + i). \quad (\text{C.3})$$

(voir figure C.12).

Puisqu'il est difficile de calculer la corrélation à la vitesse 3 GHz, nous proposons de la calculer à la vitesse de 750 MHz (3 GHz/4). Le composant est divisé en 4 blocs de sous- corrélations (voir figure C.13) et un bloc de décalage. Les signaux  $R_0(k)$ ,  $R_1(k)$ ,

FIGURE C.12 – Décimation réalisée par le CAN ( $M = 4$ ).

$R_2(k)$  et  $R_3(k)$  sont les résultats de sous-corrélations dont chacun est une décimation d'un rapport de 4 du résultat final  $R_{cr}(k)$ .

En général l'architecture parallèle est composée de  $M$  blocs de sous-corrélations et un bloc de décalage. Le schéma d'un sous-corrélateur est donné à la figure C.14.

Nous avons dans le cas général :

$$\begin{aligned} r_i(k) &= r(Mk), \\ R_i k &= R_{ir}(Mk - (N - 1) + i) \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

avec  $i = 0, 1, \dots, M - 1$  et la fréquence de fonctionnement du FPGA sera  $(3/M)$  GHz.

Pour calculer le signal  $R_i(k)$  à un instant donné (qui correspond à un coup d'horloge), nous procédons de la manière suivante :

- Les sorties du CAN  $r_i(k), r_{i-1}(k), \dots, r_0(k)$  sont reliées directement aux entrées du sous-corrélateur numéro  $i$  d'indices allant de  $N - 1$  jusqu'à  $N - (i + 1)$ .
- Tous les  $N - 1 - i$  premiers échantillons de  $r(k)$  parmi les  $N - 1$  qui étaient reliés, pendant le coup d'horloge précédent, aux entrées du sous-corrélateur numéro 3 (4-1) (en général  $M - 1$ ) sont transférés vers les  $N - 1 - i$  dernières entrées du sous-corrélateur numéro  $i$ .

Donnons un exemple. Soit l'instant du coup d'horloge où on a, au niveau de la sortie du CAN :  $r_0 = r(12)$ ,  $r_1 = r(13)$ ,  $r_2 = r(14)$  et  $r_3 = r(15)$ . Pour calculer  $R_0(3) = R_{cr}(5)$ ,  $r_0$  est relié à l'entrée d'indice 7 du sous-corrélateur numéro 0 et tous les 7 échantillons

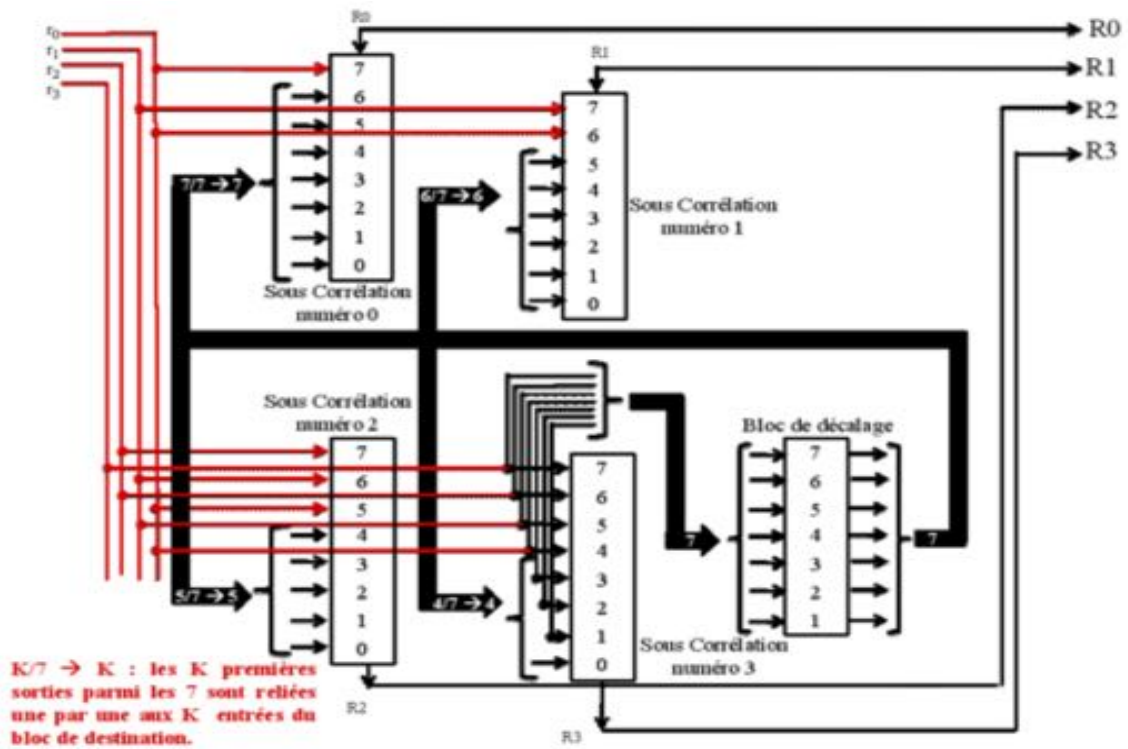


FIGURE C.13 – Architecture parallèle de la corrélation ( $N = 8$  et  $M = 4$ ).

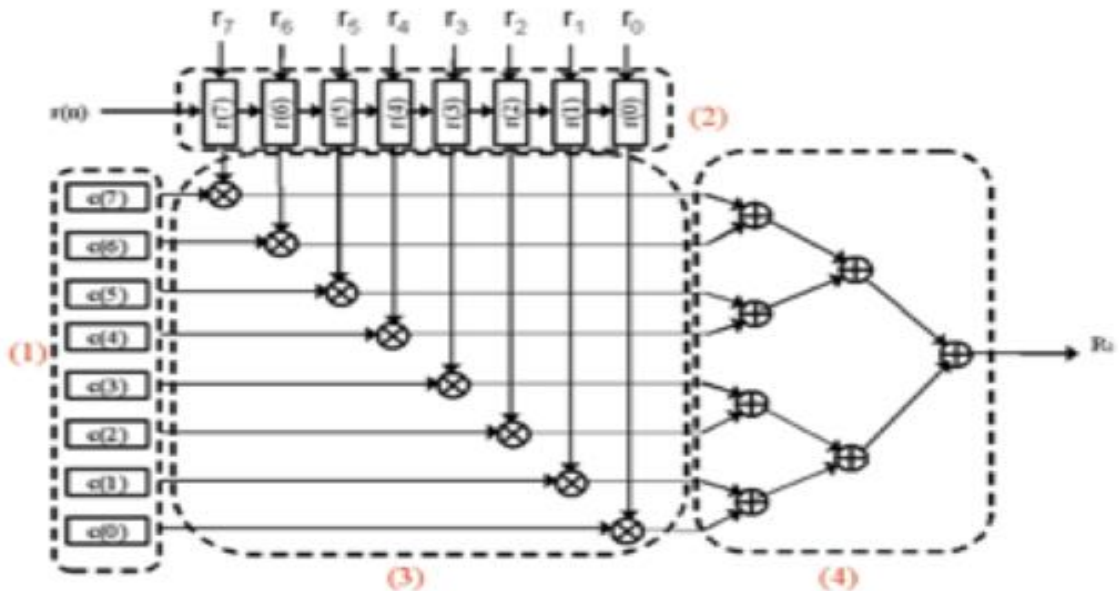


FIGURE C.14 – Bloc de sous-corrélation de l'architecture parallèle ( $N=8$ ).

---

de  $r(i)$  qui étaient reliés pendant le coup d'horloge précédent aux entrées du sous-corrélateur numéro 3 sont reliés aux 7 dernières entrées du sous-corrélateur numéro 0 (voir les équations des 9 premiers échantillons de la corrélation).





# Bibliographie

- [Aba10] D. Abassi-Moghadam, D. Tabataba Vakili, *Channel characterization of time reversal UWB communication systems*, **Wiley International Journal of Communication Systems**, vol. 65(9–10), p. 601–614, 2010.
- [Abe89] J.S. Abel, *A divide and conquer approach to least-squares estimation with application to range-difference-based localization*, **International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, IEEE, p. 214–2147, 1989.
- [Abo99] G.D. Abowd, A.K. Dey, *Towards a better understanding of context and context-awareness*, **Handheld and ubiquitous computing**, Springer, p. 304–307, 1999.
- [AD09] *Xrm-dac-d4-1g user manual*, **Alpha-Data**, online, <http://www.alpha-data.com>, 2009.
- [AD12] *Adm-xrc 5t1 user manual*, **Alpha-Data**, online, <http://www.alpha-data.co>, 2012.
- [Ait03] E. Aitenbichler, M. Mulhauser, *An IR local positioning system for smart items and devices*, **23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops**. (IEEE), p. 334–339, 2003
- [Ako05] A.E. Akogun, *Theory and Application Of Time Reversal Technique to Ultra Wideband Wireless Communications*, **Master thesis of science in Electrical Engineering**, Tennessee Technological University, 2005.
- [Alo12a] I. Alouani, S. Niar, F.J. Kurdahi, M. Abid, *Parity-Based Mono-Copy Cache for Low Power Consumption and High Reliability*, **International Symposium on Rapid System Prototyping**, RSP, October 2012.

- [Alo12b] I. Alouani, S. Niar, F.J. Kurdahi, *Working Conditions-Aware Fault Injection Technique*, **MajecSTIC**, 2012.
- [Alo14a] I. Alouani, M. Saghir, S. Niar, *ARABICA : A Reconfigurable Arithmetic Block for ISA Customization*, **The 10th International Symposium on Applied Reconfigurable Computing**, ARC 2014, Vilamoura, Algarve, Portugal, April 2014.
- [Alo14b] I. Alouani, M. Saghir, S. Niar, *BADR : Boosting Reliability Through Dynamic Redundancy*, **Third Workshop on Manufacturable and Dependable Multicore Architectures at Nanoscale MEDIAN 2014**, Dresde, in conjunction with DATE 2014, march 2014.
- [Alo15a] I. Alouani, Y. Elhillali, S Niar, A. Rivenq, *Modeling Transistor Level Masking of Soft Errors in Combinational Circuits*, **IEEE East- West Design and Test Symposium**, EWDTS, 2015.
- [Alo15b] I. Alouani, B.L. Mediouni, S. Niar, *A Multi-Objective Approach for Software-Hardware Partitioning in Reconfigurable Embedded Systems*, **International Symposium on Rapid System Prototyping (RSP)**, October 2015.
- [Alo16a] I. Alouani, S Niar, Y. Elhillali, A. Rivenq, *Auto-tuning fault tolerance technique for DSP-based circuits in transportation systems*, **1st Workshop on Resource Awareness and Application Autotuning in Adaptive and Heterogeneous Computing**, RES4ANT 2016, Dresden, Germany, march 14-16, CEUR Workshop Proc. 1643, p. 33–37, 2016.
- [Alo16b] I. Alouani, H. Ahangari, O. Ozturk, S Niar, *NS-SRAM : Neighborhood Solidarity SRAM for Reliability Enhancement of SRAM Memories*, **2016 Euromicro Conference on Digital System Design**, (DSD), p. 154–159, 2016.
- [Alo17a] I. Alouani, T. Wild, A.M. Eltawil, S. Niar, *A Novel Heterogeneous Approximate Multiplier for Low Power and High Performance*, **2017 Euromicro Conference on Digital System Design**, (DSD), p. 538–542, 2017.
- [Alo17b] I. Alouani, W.M. Elsharkazi, A. Erkersdorf, F.J. Kurdahi, S. Niar, *Reconfigurable Hardened Latch and Flip-Flop for FPGAs*, **2017 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI**, (ISVLSI), p. 433–438, 2017.

- [Alo17c] I. Alouani, T. Wild, A. Erkersdorf, S. Niar, *AS8-static random access memory (SRAM) : asymmetric SRAM architecture for soft error hardening enhancement*, **IET Circuits, Devices & Systems**, vol.11(1), p. 89–94, 2017.
- [Alo18] I. Alouani, H. Ahangari, O. Ozturk, S. Niar, *A Novel Heterogeneous Approximate Multiplier for Low Power and High Performance*, **IEEE Embedded Systems Letters**, Early Access, 2017.
- [Bah00] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, *RADAR : An in-building RF-based user location and tracking system*, **Proceedings of the Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)**, vol. 2, p. 775–784, 2000.
- [Bar00] T.W. Barret, *History of UltraWideBand (UWB) Radar & Communications : Pioneers and Innovators*, **Progress in Electromagnetics Research Symposium**, Cambridge (Mass.) Electromagnetics Academy Publish., p. 1–42, July 2000.
- [Bat03] A.Batra, *Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a*, **Tech. Rep. Document IEEE P802.15-03/268r1 IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)**, 2003.
- [Boc07] M. Bocquet, *Contribution à la mise en place d'une plateforme de communication et de localisation en technologie ultra large bande en gamme millimétrique*, **Thèse de Doctorat** Université de Lille I, 2007.
- [Bru03] R. Bruno, F. Delmastro, *Design and analysis of a bluetooth-based indoor localization system*, **Personal wireless communications** (Springer), p. 711-725, 2003
- [Bue06] R.M. Buehrer, *Code Division Multiple Access (CDMA)*, **Morgan & Claypool Publishers**, 2006.
- [Caf03] J.J. Caffery, *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*, **Kluwer Academic Publishers**, Norwell, MA, USA, p. 1–189, 1999.
- [Car73] G.C. Carter, A.H. Nuttall, P.G.Cable, *The smoothed coherence transform*, **Proceedings of the IEEE**, vol. 61(10), p. 1497–1498, 1973.
- [Cha94] Y.T. Chan, K.C. Ho, *A simple and efficient estimator for hyperbolic location*, **IEEE Transactions on Signal Processing**, vol. 42(8), p.1905–1915, 1994.

- [Cho04] H.D. Chon, *Using RFID for accurate positioning*, **Journal of Global Positioning Systems**, vol. 3(1–2), p. 32–39, 2004.
- [Cho06] C.C. Chong, F. Watanabe, H. Inamura, *Potential of UWB technology for the next generation wireless communications*, **Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications**, IEEE, p. 42–429, 2006.
- [Co02] L. Cong, W. Zhuang, *Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems*, **IEEE Transactions on Wireless Communications**, vol. 1(3), p. 439–447, 2002.
- [Cos84] J. Costas, *A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range-doppler ambiguity properties*, **Proc. IEEE**, vol. 72(8), p. 996–1009, 1984.
- [Dan08] L. Daniel, *802.15.6 Call for Applications - Response Summary Tech. Rep. Document IEEE P802.15-08-0407-05 IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, November 2008.
- [Den11] L. De-Nardis, J. Fiorina, D. Panaitopol, M.G. Di Benedetto, *Combining UWB with Time Reversal for improved communication and positioning*, **Telecommun. Syst.**, DOI10.1007/s11235-011-9630-1, 2011.
- [Dix00] A. Dix, *Exploiting space and location as a design framework for interactive mobile systems*, **ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)**, vol. 7(3), p. 285–321, 2000.
- [ECM08a] *ECMA-368 High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard*, **ECMA 3rd Edition**, December 2008.
- [ECM08b] *ECMA-369 MAC-PHY Interface for ECMA-368*, **ECMA 3rd Edition**, December 2008.
- [Eko12] S.M. Ekome, *Étude et conception d’une couche physique UWB-IR pour les réseaux BAN*, **Thèse de Doctorat**. Université Paris-Est, 2012.
- [Ela11a] A. Elabed, F. Boukour, Y. Elhillali, A. Rivenq, *Bipolar PPM coding for asynchronous multi-users UWB communications*, **2nd World Congress on Computer Science and Information Engineering**, CSIE 2011, June 2011, Changchun, China, 2011.

- [Ela11b] A. Elabed, Y. Elhillali, R. Ellassali, F. Boukour, A. Rivenq, *Novel coding techniques dedicated to UWB for V2V communication System*, **Proceedings of First International Conference on Mobility, Security, and Logistics in Transport**, MSLT 2011, Hammamet, Tunisia, may 31-june 3, 2011.
- [Ela12a] A. Elabed, *Étude et conception d'un système IR-UWB dédié aux communications sans fils haut débit*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2012.
- [Ela12b] A. Elabed, F. Elbahhar, Y. Elhillali, A. Rivenq, R. Ellassali, *UWB Communication System Based on Bipolar PPM with Orthogonal Waveforms*, **Wireless Engineering and Technology**, vol. 3(3), Article ID :21474, 8 pages, 2012.
- [Ela13] A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, Y. Elhillali, *A Comparison of energy efficiency for UWB modulations*, **Proceedings of 4th Workshop of COST Action IC0902, Cognitive Radio and Networking for Cooperative Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks**, 2013.
- [Ela14a] A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, Y. Elhillali, *An energy efficient modulation comparative study for a railway beacon*, **Proceedings of 7th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, ISIVC 2014, Marrakech, Morocco, november 19-22 session on Intelligent Transport System, paper 30, 4 pages, e-ISBN 978-1-4244-5997-1, 2014.
- [Ela14b] A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, Y. Elhillali, *Comparison of UWB modulations over Nakagami-m fading channels with path-loss for an energy efficient railway beacon application*, **Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Ultra-Wideband**, ICUWB 2014, Paris, France, september 1-3, 2014, session S18 - Special Session on Transport Systems, p. 427-432, 2014.
- [Ela16a] A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, R. Ellassali, Y. Elhillali, *DS-UWB and TH-UWB energy consumption comparison*, **J. Telecomm. Inf. Technol.**, vol.1, p. 101—109, 2016
- [Ela16b] A. Elabboubi, F. Elbahhar, M. Heddebaut, R. Ellassali, Y. Elhillali, *Energy efficiency analysis of a TR-UWB system*, **J. Comput. Sci.** vol. 12(1), p. 19–30, 2016.

- [Ela16c] A. Elabboubi, *Etude et évaluation de la consommation énergétique d'une balise ferroviaire fondée sur l'ULB et le Retournement Temporel*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2016.
- [Ela17] R. Ellassali, K. Hamidoun, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, F. Elbahhar, K. Elbaamrani, L. Maatougui *Performance evaluation of high data rate M-OAM UWB physical layer for intelligent transportation systems*, **Wirel. Pers. Commun.**, vol.94(4), p. 3265–3283, 2017.
- [Elb01a] F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, J.M. Rouvaen, M. Heddebaut, *Inter-vehicle communication based on ultra-wide band and CDMA techniques*, **IEEE ITSC'2001**, August 2001, Oakland (CA), USA, 2001.
- [Elb01b] F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, J.M. Rouvaen, M. Heddebaut, *Inter-Vehicle communication based on Ultra-Wide Band and CDMA techniques*, **ITSC**, p. 959–961, Oakland, California, 2001.
- [Elb01c] F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, J.M. Rouvaen, P. Deloof, T. Boukour, *An Ultra-Wide band system for vehicle-to-vehicle communication*, **ITS'2001**, Septembre 2001, CD-ROM, Sydney, Australia, 2001..
- [Elb01d] F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, J.M. Rouvaen, T. Boukour, *A CDMA ultra-wide band system used for vehicle-to-vehicle communication*, **ITS'2001**, Septembre 2001, CD-ROM, Sydney, Australia, 2001.
- [Elb02] F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, J.P. Ghys, J.M. Rouvaen, T. Boukour, *Short wireless communication system using Ultra Wideband monocycle pulse*, **2ème EEE ISSPIT**, Décembre, Marrakech, Maroc, p. 499–502, 2002.
- [Elb04] F. Elbahhar, A. RivenqMenhaj, M. Heddebaut, J. M. Rouvaen, J.P. Ghys, *Ultra Wideband technique for short wireless communication system*, **Physical & Chemical News**, vol. 15, p. 4-9, Janvier 2004.
- [Elb05a] F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Multi-User Ultra-Wide Band Communication System Based on Modified Gegenbauer and Hermite Functions.*, **Wireless Personal Communications**, Kluwer, vol. 34(3), p. 255–277, 2005.
- [Elb05b] F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, M. Heddebaut, *Comparison between DS-CDMA and modified Gegenbauer functions for a multiuser communication ultra-wideband system*, **IEE Proceedings Communications**, vol. 152(6), pp. 1021-1027, 2005.

- [Elb05c] F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, M. Heddebaut, J.M. Rouvaen, *Using UWB gaussian pulses for inter-vehicle communication*, **I.E.E Proceedings Communications**, vol. 152(2), Issue 2, p. 229 - 234, 2005.
- [Elb07] F. Elbahhar, A. Rivenq, M. Heddebaut, J.P. Ghys, J.M. Rouvaen, *Communication entre véhicules de transport guidé fondée sur la technologie radio ultra large bande*, **Ed. Lavoisier, revue Recherche Transport Sécurité**, vol. 95, (2007), p.115–128, juillet 2007.
- [Elb08] F. Elbahhar, M. Heddebaut, C. Tatkeu, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Positioning system based on the Ultra wide Band technique for transport application*, **ICWCUCA08, 2nd International Conference on Wireless Communications in Underground and Conned Areas**, August 2008 Val d’Or, Quebec, Canada, 2008.
- [Elb09] F. Elbahhar, A. Rivenq, M. Heddebaut, J.M. Rouvaen, *Positioning system using the SS-Ultra Wide Band technique for transport application*, **ITST**, October, 2009.
- [Elb11a] F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, M. Heddebaut, *UWB multiple access communication system*, **Wireless Personal Communications**, Kluwer, vol. 56(2), p. 333-352, 2011.
- [Elb11b] F. Elbahhar, A. Lamari, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, M. Heddebaut, T. Boukour, L. Sakkila, *Novel approach of UWB multi-band system based on orthogonal function for transports applications*, **The European Physical Journal Applied Physics**, vol. 53(3), Art. 33608, DOI : 10.1051/epjap/2011100067, 2011.
- [Elb11c] F. Elbahhar, B. Fall, M. Heddebaut, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Indoor positioning system based on the UWB technique*, **2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)**, September, Guimarães, Portugal 2011.
- [Elb12] F. Elbahhar, A. Rivenq, *Intelligent transports systems based on UWB technologies*, **18th European Wireless Conference**, IEEE-IEEE, invited paper, p. 1–4, 2012.
- [Elb16] F. Elbahhar, A. Elabboubi, M. Heddebaut, Y. Elhillali, *An energy efficiency modulation comparative study in AWGN channel with path-loss*, **Proceedings of 2nd International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb**, CISTEM 2016, Marrakech, Morocco, october 26-28, paper ID171, 2016.



- [Elh05] Y. Elhillali, C. Tatkeu, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Implementation of a localization and communication system dedicated to guided transports*, **Conf. on Intelligent Transport System Telecommunications**, ITST 2005, Brest 27-29 june 2005.
- [Elh06] Y. Elhillali, C. Tatkeu, A. Rivenq,, J.M. Rouvaen, *A novel multiplexing method for high data rate communication systems*, **IEEE Vehicular Technology Conf. VT-2006**, art. 4109876, p. 2970-2973, 2006.
- [Elh07] Y. Elhillali, A. Rivenq, C. Tatkeu, J.M. Rouvaen, J.P. Ghys, *Embedded localization and communication system designed for intelligent guided transports*, **Eurasip Journal of Embedded Systems**, art. no. 79095, p. 1–8, 2007.
- [Elh08] Y. Elhillali, C. Tatkeu,A. Rivenq, J.M. Rouvaen, J.P. Ghys, *Location and communication using cooperative radar system dedicated to guided transports*, **Transport. Res. Part C : Emerging Technol.**, vol. 16(2), p. 141–152, 2008.
- [Elh09] Y. Elhillali, R. Ellassali, F. Boukour, A. Elabed, A. Rivenq, *Comparison of two coding techniques dedicated to UWB V2V communication system*, **Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications**, ITST 2009, Lille, France, october 20-22, p. 673–676, 2009.
- [Elh10] Y. Elhillali, C. Tatkeu, P. Deloof, L. Sakkila, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Enhanced high data rate communication system using embedded cooperative radar for intelligent transports systems*, **Transport. Res. Part C : Emerging Technol.**, vol. 18(3), p. 429-439, 2010
- [Eln04] E. Elnahrawy, X. Li, R.P. Martin, *The limits of localization using signal strength : A comparative study*, **First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks**, IEEE, p. 406–414, 2004.
- [ENS08] *TUTORIAL ModelSim VHDL*, **ENSAT de Rennes**, 2008.
- [ETS05] *ETSI - Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band (UWB) technology for communication purposes in the frequency range 3,1 GHz to 10,6 GHz ; Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive*, **European Standard, ETSI EN 302 065 Draft v0.0.1**, December 2005.

- [ETS07] CEC *On allowing the use of the radio spectrum for equipment using ultra-wideband technology in a harmonised manner*, **Community Commission Decision no C 522**, February 2007.
- [ETS09] CEC *Amending Decision 2007/131/EC : On allowing the use of the radio spectrum for equipment using ultra-wideband technology in a harmonised manner*, **Community Commission Decision no C 2787**, vol. 522., April 2009.
- [Fal13] B. Fall, *Évaluation des performances d'un système de localisation de véhicules de transport guidés fondé sur l'association d'une technique radio ULB et d'une technique de retour-ement temporel*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, Nov. 2013.
- [Fal15] B. Fall, F. Elbahhar, A. Elabboubi, M. Heddebaut, A. Rivenq, *UWB and Time-Reversal Techniques Positioning System for Railway Application*, **FABULOUS 2015**, p. 181–187, 2015
- [Fan90] B.T. Fang, *Simple solutions for hyperbolic and related position fixes*, **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, vol. 26(5), p. 748–753, 1990.
- [FCC98] FCC - *Revision of the Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, Notice of Inquiry*, **Rapport, Federal Communications Commission**, 1998.
- [FCC00] : *Federal Communication Commission : Notice of proposed rule making*, **FCC 00-163, Et Docket 98-153, In the matter of revision of part 15 of the commission's rules regarding Ultra wideband transmission system**, Washington, may 2000.
- [FCC02] FCC *First report and order, revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems*, **Rapport no ET Docket**, p. 98–153, Avril 2002.
- [Fig68] W.G. Figel, N.H. Shepherd, W.F. Trammell, *Vehicle location by a signal attenuation method*, **19th IEEE Vehicular Technology Conference**, vol. 19, p. 105–109, 1968.
- [Fon01] R. Fontana, *Advances in ultra wideband indoor geolocation systems*, **3rd IEEE Workshop on WLAN**, 2001.
- [Foy76] W.H. Foy, *Position-location solutions by Taylor-series estimation*, **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, vol. 2, p. 18–194, 1976.

- [Gar92] W.A. Gardner, C.K. Chen, *Signal-selective time-difference-of-arrival estimation for passive location of man-made signal sources in highly corruptive environments. I. Theory and method*, **IEEE Transactions on Signal Processing**, vol. 40(5), p.1168–1184, 1992.
- [Gez05] S. Gezici, *Localization via ultra-wideband radios : a look at positioning aspects for future sensor networks*, **IEEE Signal Processing Magazine**, vol. 22(4), p. 70–84, 2005.
- [Gez09] S. Gezici, H.V. Poor, *Position estimation via ultra-wide-band signals*, **Proceedings of the IEEE**, vol. 97(2), p. 386–403, 2009.
- [Gha01] M. Ghavami, *Hermite function based orthogonal pulses for UWB communications*, **Proc. Wireless Personal Multimedia Conference 2001**, Aalborg, Denmark, Sept. 2001.
- [Gha04] M. Ghavami, L.B. Lachlan, R. Kohno, **Ultra Wideband Signal and Systems in Communication Engineering**, Wiley, 2004, p. 1–278.
- [Gol67] R. Gold, *Optimal binary sequences fo spread spectrum multiplexing*, **IEEE Transactions on Information Theory**, vol. 13(4), p. 619–621, 1967.
- [Gu09] Y. Gu, A. Lo, I. Niemegeers, *A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks*, **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 11(1), p. 13–32, 2009.
- [Guv03a] I. Guvenc, H. Arslan, *On the modulation options for UWB systems*, **IEEE Military Communications Conference**, p. 892–897, October 2003.
- [Guv03b] I. Guvenc, H. Arslan, *Performance evaluation of UWB systems in the presence of timing jitter*, **IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies**, p. 136–141, Novembre 2003.
- [Hah73] W. Hahn, S. Tretter, *Optimum processing for delay-vector estimation in passive signal arrays*, **IEEE Transactions on Information Theory**, vol. 19(5), p. 608–614, 1973.
- [Ham12] K. Hamidoun, R. Ellassali, Y. Elhillali, F. Elbahhar, A. Rivenq, *New Adaptive Architectures of Coding and Modulation for UWB infrastructure-vehicle communication*, **IS-VIC'2012**, Valenciennes, Juillet, 2012
- [Ham14a] K. Hamidoun, R. Ellassali, Y. Elhillali, K. Elbaamrani, A. Rivenq-Menhaj, F. Boukour, *UWB System Based on the M-OAM Modulation in IEEE.802.15.3a Channel*, **Doctoral conference on Computing Electrical and Industrial Systems 2014**, Springer, p. 507–514, 2014.

- [Ham14b] K. Hamidoun, R. Ellassali, Y. Elhillali, K. Elbaamrani, A. Rivenq-Menhaj, F. Boukour, *UWB M-OAM architecture for intelligent transportation system*, **Proc. of 7th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, ISIVC 2014, Marrakech, Morocco, session on Intelligent Transport System, paper 32, 5 pages, November 2014.
- [Ham15] K. Hamidoun, R. Ellassali, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, K. Elbaamrani, F. Boukour, *A new multi-user ultra wide band system based on modified Gegenbauer functions and M-OAM modulation for communication of intelligent transportation systems*, **Wirel. Pers. Commun.**, vol. 82(4), p. 2115–2134, 2015.
- [Ham16] K. Hamidoun, *Nouvelles Architectures Adaptatives de Modulation et Codage ULB selon la QoS requise pour la communication véhicule-infrastructure*, **Thèse de Doctorat**, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 2016.
- [Ham18] K. Hamidoun, R. Sadli, Y. Elhillali, R. Ellassali, A. Rivenq-Menhaj, K. Elbaamrani, *Implementation of a new IR-UWB system based on M-OAM modulation on FPGA component*, **International Journal of Wireless & Mobile Networks**, (IJWMN), vol. 10, 2, April 2018.
- [Iac02] M.S. Iacobucci, M.G. Di Benedetto, *Multiple access design for impulse radio communication systems*, **IEEE International Conference on Communications**, ICC 2002, vol. 2, p 817-820.
- [IEE03] *IEEE P802.15-03 Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and PHysical Layer (PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, 2003.
- [IEE06] *Part 15.4 : WirelessMedium Access Control (MAC) and PHYsical Layer (PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, **IEEE P802.15-03/D4** (Amendment of IEEE Std 802.15.4), July 2006.
- [Jac04] J. Jacobson, *Lower Bounds on Estimator Error and the Threshold Effect*, **Ph. D. Thesis**, Harvard College, 2004.
- [Kha06] J. Khan, Y. Elhillali, S. Niar, A. Rivenq, *A Low Speed Digital Correlator Architecture Optimized For Resource Savings*, **ReCoSoC 2006**, p. 207-213, 2006.

- [Kha09] J.Khan, S. Niar, M. Saghir, Y. Elhillali, A. Menhaj-Rivenq, *Trade-off exploration for target tracking application in a customized multiprocessor architecture*, **EURASIP J. Embedded Systems**, paper 175043, p. 1-21, 2009.
- [Kna75] C. Knapp, G. Carter, *The generalized correlation method for estimation of time delay*, **IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing**, vol. 24(4), p. 320–327, 1976.
- [Kos11a] I. Kossonou, *Three-Dimension Localization Method based on Time Difference Of Arrival for Ultra Wide Band Systems*, **Proceedings of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation**, (IPIN'2011), short papers, posters and demos, Guimares, Portugal, September 21–23, isbn : 978-972-8692-63-6.
- [Kos11b] I. Kossonou, Y. Elhillali, M. Bocquet, J. Assaad, A. Rivenq, I. Doumbia, *Optimisation of three-dimensional hyperbolic location method*, **Proceedings of First International Conference on Mobility, Security, and Logistics in Transport**, MSLT 2011, Hammamet, Tunisia, may 31-june 3, 2011.
- [Kos11c] I. Kossonou, Y. Elhillali, M. Bocquet, J. Assaad, A. Rivenq, I. Doumbia, *Three-dimension localization method based on time difference of arrival for ultra wide band*, **Proceedings of 2nd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation**, IPIN 2011, Guimarães, Portugal, september 21-23, pp.1–4, 2011.
- [Kos12] I. Kossonou, *High Accuracy Self-Location Systems based on Time Difference of Arrival and Ultra-Wide Band Techniques*, **Proceedings of the International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, (ISIVC 2012), Valenciennes, France, July 04–06, 2012.
- [Kos14a] I. Kossonou, Y. Elhillali, M. Bocquet, A. Rivenq-Menhaj, J. Assaad, *Non-iterative three dimensional positioning algorithm based on time difference of arrival technique*, **International Journal of Computer Science Issues**, (IJCSI), vol. 11(2), p. 19–29, 2014.
- [Kos14b] I. Kossonou, *Étude d'un système de localisation 3-D haute précision basé sur les techniques de transmission Ultra Large Bande à basse consommation d'énergie pour les objets mobiles communicants*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2014.
- [Kos14c] I. Kossonou, Y. Elhillali, M. Bocquet, A. Rivenq-Menhaj, J. Assaad, *Direct path detection algorithm in multiple input single output configuration for transport applications*,

**Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB 2014**, Paris, France, september 1-3, session S18 - Special Session on Transport Systems, p. 438-443, 2014.

[Kup05] A. Küpper, *Location-Based Services : Fundamentals and Operation*, **John Wiley & Sons**, p. 1–386, 2005.

[Lad08] C.Laderrière, M. Heddebaut, J.B. Prost, A. Rivenq, F. Elbahhar, J.M. Rouvaen, *Wide-band indoor localization effectiveness in presence of moving people*, **WPNC 2008**, p. 103–111, 2008.

[Lam09] A. Lamari, F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, M.Heddebaut, *Performance Evaluation of a Multi-band UWB Location and Communication System Based on Modified Gegenbauer Functions*, **Wireless Personal Communications**, vol. 48(3), p. 361–384, 2009.

[Lam07] A. Lamari, *Conception et modélisation d'un système de communication Multi-Utilisateurs basé sur la technique Ultra Large Bande*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2007

[Lee02] J.Y. Lee, *Ultra-wideband ranging in dense multipath environments*, **Ph. D. Thesis**, University of Southern California, 2002.

[Lil12] *Didacticiel d'initiation à l'environnement de conception FPGA*, **Université de Lille 1 et École Polytechnique de Montréal**, 2012.

[Liu08] X. Liu, B.Z. Wang, S. Xiao, J. Deng, *Performance of Impulse Radio UWB Communication Based On Time Reversal Technique*, **Progress In Electromagnetics Research, PIER**, vol. 7911, p. 401–413, 2008.

[Lop06] C.V. Lopes, *Localization of off-the-shelf mobile devices using audible sound : architectures, protocols and performance assessment*, **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**, vol. 10(2), p. 38–50, 2006.

[Maa15a] L. Maatougui, K. Hamidoun, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, A. Hajjaji, H. Ouahmane, *Intelligent receiver for M-OAM IR-UWB modulations system*, **Proc. of 4th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport, IEEE ICALT 2015**, Valenciennes, France, Session Logistics & Supply Chain Management LSCM II, paper LSCM34, p. 111–115, May 2015.

- [Maa15b] L. Maatougui, K. Hamidoun, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, A. Hajjaji, H. Ouahmane, *IR-UWB cognitive radio system based on the M-OAM modulations*, **2nd International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems**, WITS 2015, Fez, Morocco, april 29-30, 2015, session COD - Information Coding and Transmission, paper COD-6, *Mediterr. Telecomm. J.* vol. 5(2), p. 98–103, 2015.
- [Maa15c] L. Maatougui, H. Ouahmane, A. Hajjaji, K. Hamidoun, A. Rivenq-Menhaj, Y. Elhillali, *Spectrum sensing applied to IR-UWB system based on M-OAM*, **Proceedings of 3rd World Conference on Complex Systems**, WCCS 2015, Marrakech, Morocco, november 23-25, 6 pages, e-ISBN 978-1-4673-9669-1 doi : 10.1109/ICoCS.2015.7483218, 2015.
- [Maa16a] L. Maatougui, K. Hamidoun, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, A. Hajjaji, H. Ouahmane, *An autonomous IR-UWB receiver applied for intelligent transportation system*, **Proceedings of 2nd International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb**, CISTEM 2016, Marrakech, Morocco, october 26-28, 2016, paper ID373, 2016.
- [Maa16b] L. Maatougui, L. Sakkila, R. Sadli et A. Rivenq, *Computation of correlation and cumulant 4 under FPGA architecture*, **International Journal of Engineering and Technical Research**, vol. 5(3), p. 86–90, 2016.
- [Maa17a] L. Maatougui, *Développement d'un récepteur intelligent dédié aux systèmes sans fil basés sur les modulations M-OAM*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2017.
- [Maa17b] L. Maatougui, L. Sakkila, A. Rivenq-Menhaj, A. Hajjaji, H. Ouahmane, *Higher order statistics applied to IR-UWB system based on M-OAM*, **Int. J. Communication Systems**, (IEJTR), vol. 5(3), paper e3337, May 2017.
- [Mag01] G.M. Maggio, N. Rulkov, L. Reggiani, *Pseudo-chaotic time hopping for UWB impulse radio*, **IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Fundamental Theory and Applications**, vol. 48(12), p. 1424–1435, 2001.
- [Man05] A. Mandal, *Beep : 3D indoor positioning using audible sound*, **Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference**, p. 348–353, 2005.

- [Mfo13] A.O. M'foubat, C. Tatkeu, F. Elbahhar, *UWB system based on the Modified Gegenbauer Function in MISO Channel*, **Wireless Engineering and Technology**, vol. 4(2), p. 117–123, 2013.
- [Mol04] A.F. Molisch, *IEEE 802.15.4a channel model - Final Report*, **IEEE P802**, vol. 15(4), p. 662, 2004.
- [Mro09] A. Mroué, M. Heddebaut, F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *UWB Radar for Railway Fall on Track Object Detection and Identification*,. **VTC Spring 2009**, 2009.
- [Nak06], Y.P. Nakache, A.F. Molisch, *Spectral shaping of UWB signals for time-hopping impulse radio*, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 24(4) (2006), p. 738–744, 2006.
- [Ni04] L.M. Ni, *LANDMARC : indoor location sensing using active RFID*, **Wireless networks**, vol. 10(6), p. 701–710, 2004.
- [Lam09] A. Lamari, F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, M.Heddebaut, *Performance Evaluation of a Multi-band UWB Location and Communication System Based on Modified Gegenbauer Functions*, **Wireless Personal Communications**, vol. 48(3), p. 361–384, 2009.
- [Mro09a] A. Mroué, M. Heddebaut, F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *UWB Radar for Railway Fall on Track Object Detection and Identification*, **IEEE VTC Spring 2009**, Barcelona, April 2009.
- [Mro09b] A. Mroue, M. Heddebaut, F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *UWB radar for railway fall on track object detection and identification*, **IEEE 60th Vehicular Technology Conf.**, Spring, p. 1–5, 2009.
- [Mro11] A. Mroué, M. Heddebaut, F. Elbahhar, A. Rivenq, J-M. Rouvaen, *Automatic radar target recognition of objects falling on railway tracks*, **IOP Science, Measurement Science and Technology**, vol. 23(2), Art. 025401, 2012
- [Mro13] A. Mroue, M. Heddebaut, F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Automatic Passenger Detection in Safety Critical Mass Transit Environments*, **Int. J. ITS Res.**, Springer, vol. 11(2), p. 87–100, 2013.
- [Oua15] M. Ouadou, O. Zytoune, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, D. Aboutadjine, *Minimum spanning tree topology in real Zigbee-Arduino sensor network*, **Proceedings of 7th EAI International Conference on Ad Hoc Networks**, AdHocNets 2015, San Remo, Italy, september 1-2, p. 57–68, 2015.



- [Oua16] M. Ouadou, O. Zytoune, D. Aboutadjine, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, *Cluster-tree topology adapted for indoor environment in Zigbee sensor network*, **11th International Conference on Future Networks and Communications**, FNC 2016, Montreal, QC, Canada, august 15-18, Session S-2 - Topological Aggregation Procedia , published in Comput. Sci. vol. 94, p. 272–279, 2016.
- [Pag07] P. Pagani, F. Tchoffo-Talom, P. Pajusco, *Communication ultra large bande : le canal de propagation radioélectrique*, **Collection technique et scientifique des télécommunications**, Hermès Science Publications/Édit. Lavoisier, isbn 978-2-7462-1636-5, 2007.
- [Pah02] K. Pahlavan, X. Li, J.P. Makela, *Indoor geolocation science and technology*, **IEEE Communications Magazine**, vol. 40(2), p. 112–118, 2002.
- [Per16] G. Pertuisot, N. Belanger, Y. Elhillali, A.M. Eltawil, F.J. Kurdahi, S. Niar, *A co-design space exploration tool for avionic high performance heterogeneous embedded architectures*, **2016 11th International Design & Test Symposium**, (IDT), p. 77–82, 2016.
- [Pet95] R.L. Peterson, R.E. Ziemer, D.E. Borth, *Introduction to spread-spectrum communications*, **Prentice Hall New Jersey**, vol. 64, 1995.
- [Pic82] R. Pickholtz, D. Schilling, L. Milstein, *Theory of spread-spectrum communications : a tuto*, **IEEE Transactions on Communications**, vol. 30(5), p. 855–884, 1982.
- [Pra00] P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthy, P. Chrysanthis, *On indoor position location with wireless LANs*, **The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**, vol. 2, p. 720–724, 2002.
- [Pri00] N. Priyantha, A. Chakraborty, H. Balakrishnan, *The cricket indoor location system*, **Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking**, ACM, p. 32–43, 2000.
- [Pri05] N. Priyantha, A. Chakraborty, H. Balakrishnan, *The cricket location-support system*, **Ph. D. Thesis**, Massachusetts Institute of Technology, 2005
- [Pro00] J.G. Proakis, *Digital Communications*, 4th edition, **McGraw-Hill**, 2000.
- [Qi02] Y. Qi, H. Kobayashi, *Cramer Rao lower bound for geolocation in non-line-of-sight environment*, **IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing**, ICASSP, T. 3, p. 2469–2473, 2002.

- [Qi03] Y. Qi, *Wireless geolocation in a non-line-of-sight environment*, **Ph. D. Thesis**, Princeton University, 2003.
- [Qiu15] H.J.F. Qiu, I.W.-H. Ho, C.K. Tse, Y. Xie, *A Methodology for Studying 802.11p VANET Broadcasting Performance With Practical Vehicle Distribution*, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, vol. 64, p. 4756–4769, 2015.
- [Ram01] F. Ramirez-Mireles, *On the performance of ultra-wide-band signals in Gaussian noise and dense multipath*, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, vol. 50(1), p. 244–249, 2001.
- [Ram98] F. Ramirez-Mireles, *Multiple-Access with Ultra-Wideband Impulse Radio Modulation Using Spread Spectrum Time-Hopping and Block waveform Pulse-Position-Modulated Signals*, **Ph.D. dissertation**, Communication Sciences Institute, Electrical Engineering Department, University of Southern California, 1998.
- [Roo] T. Roos, *A probabilistic approach to WLAN user location estimation*, **International Journal of Wireless Information Networks**, vol.9(3), p. 155–164, 2002.
- [Rot05] J. Roth, *A Decentralized Location Service Providing Semantic Locations*, **Ph. D. Thesis**, University of Hagen, 2005.
- [Roy89] R. Roy, T. Kailath, *ESPRIT - Estimation of signal parameters via rotation invariance techniques*, **IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc.**, vol. 17(7), p. 984–995, July 1989.
- [Sad2017a] R. Sadli, L. Maatougui, Y. Elhillali, C. Tatkeu, A. Rivenq, *Implementation of the 4th Order High Order Statistics (HOS) Based on FPGA for an UWB Short-Range Radar Receiver*, **TELECOM'2017 & JFMMA 10**, 11, Rabat, Maroc, May 2017.
- [Sad2017b] R. Sadli, Y. Elhillali, L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, *The 4th Order Statistics on Ultra Wideband Short-Range Radar (UWB-SRR) for Cyclist Detection*, **3rd Annual International Conference on Transportation**, Athens, Greece, June 2017.
- [Sag09] H. Saghir, M. Heddebaut, F. Elbahhar, J.M. Rouvaen, A. Rivenq, *Train-to-wayside wireless communication in tunnel using ultra-wideband and time reversal*, **Transportation Research Part C : Emerging Technologies**, Elsevier, vol. 17(1), p. 81-97, 2009.
- [Sag09b] H. Saghir, M. Heddebaut, F. Elbahhar, J.M. Rouvaen, A. Rivenq, J.P. Ghys, *Time Reversal UWB Wireless Communication-Based Train Control in Tunnel*, **Journal of Communications** (Academy Publisher), Vol. 4, No. 4, pp. 248-255, May 2009.

- [Sah04a] Z. Sahinoglu, A. Catovic, *A hybrid location estimation scheme (H-LES) for partially synchronized wireless sensor networks*, **IEEE International Conference on Communications**, vol. 7, p. 3797–3801, 2004.
- [Sah04b] Z. Sahinoglu, A. Catovic, *A hybrid location estimation scheme (H-LES) for partially synchronized wireless sensor networks*, **IEEE International Conference on Communications**, vol. 7, p. 3797–3801, 2004.
- [Sah06] Z. Sahinoglu, S. Gecizi, I. Guvenc, *Ultra-wideband positioning systems : Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols*, T. 2, **Cambridge University Press**, Cambridge, UK, 2008
- [Sak07a] L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, F. Boukour, J-M. Rouvaen, *Conception d'un radar Ultra Large Bande multi-utilisateurs pour la détection d'obstacle en environnement routier*, **Actes du 6ième colloque international TELECOM'2007 & 5ième JFMMA**, mars 2007, Fès, Maroc, p. 113–117, 2007.
- [Sak07b] L. Sakkila, Y. Elhillali, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Short range automotive radar based on UWB pseudo-random coding*, **International Conf. on Intelligent Transportation Systems and Telecommunications ITST-07**, p. 1–6, 2007.
- [Sak08a] L. Sakkila, C. Tatkeu, F. Boukour, Y. Elhillali, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *UWB Radar system for road anti-collision application*, **Information and Communication Technologies : From Theory to Applications**, ICTTA 2008, p. 1–6, 2008.
- [Sak08b] L. Sakkila, Y. Elhillali, F. Boukour, A. Rivenq, C. Tatkeu, J.M. Rouvaen, *Multi-users UWB inter vehicles communication system using MGF and DS-CDMA*, **10th International Conf. on Applications of Advanced Technologies in Transportation**, AATT 2008, ID 287, 2008.
- [Sak09a] L. Sakkila, *Etude et implémentation d'un radar ultra large bande pour la détection et la reconnaissance d'obstacles en milieu routier*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2009.
- [Sak09b] L. Sakkila, Y. Zaidouni, A. Rivenq, F. Boukour, C. Tatkeu, Y. Elhillali, J.M. Rouvan, *High order statistic receiver applied to UWB radar*, **Proceedings of the 2009 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing PacRim 2009**, Victoria, Canada, august 23-26, p. 643-647, 2009.

- [Sak09c] L. Sakkila, A. Rivenq, F. Boukour, C. Tatkeu, Y. Elhillali, J.M. Rouvaen, *Collision avoidance radar system using UWB waveforms signature for road applications*, **Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications**, ITST 2009, Lille, France, October 2009, p. 223-226, 2009.
- [Sak10a], L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, Y. Elhillali, J.-P. Ghys, J.M. Rouvaen, *Methods of target recognition for UWB radar*, **IEEE Intelligent Vehicles Symposium**, p. 949–954, 2010.
- [Sak10b] L. Sakkila, C. Tatkeu, Y. Elhillali, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Short range radar based on UWB technology*, **Radar Technology**, INTECH - ISBN 978-953-307-029-2, p. 19–38, 2010.
- [Sak14] L. Sakkila, A. Rivenq, C. Tatkeu, Y. Elhillali, J-P. Ghys, *Performances of Micro-power UWB Radar Using Orthogonal Waveforms*, **Wireless Engineering and Technology**, vol. 5(3), p. 74–87, 2014.
- [Sal17a] F. Salem, Y. Elhillali, S. Niar, *User Model-Based Method for IEEE 802.11p Performance Evaluation in Vehicular Safety Applications*, **2017 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety** Vienna, Austria, p. 63–68, 2017.
- [Sal17b] F. Salem, Y. Elhillali, S. Niar, *Stochastic modeling of IEEE 802.11p output process for efficient V2X large-scale interworking*, **IET Networks**, (SCVT 2017), 6 pages, Nov. 2017.
- [Sal17c] F. Salem, Y. Elhillali, S. Niar, *Efficient modeling of IEEE 802.11p MAC output process for V2X interworking enhancement*, **2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology**, (SCVT 2017), DOI10.1109/SCVT.2017.8240315, Nov. 2017.
- [Sal18a] F. Salem, Y. Elhillali, S. Niar, *QoS-based Sequential Detection Algorithm for Jamming Attacks in VANET*, **Future Network Systems and Security**, (FNSS 2018), Paris, France, juillet. 2018.
- [Sal18] F. Salem, *Fiabilité et sécurité des systèmes embarqués de communication dans les réseaux de véhicules intelligents : modélisation et optimisation*, Mémoire de thèse, Université de Valenciennes, septembre 2018.
- [Sal87] A.A. Saleh, R. Valenzuela, *A statistical model for indoor multipath propagation*, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 5(2)2, p. 128–137, 1987.
- [Sas11] A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, Y. Elhillali, A. Rivenq, *The impact of mobility on*

*the performance of V2X communication*, **Proceedings of 4th International Conference on Logistics**, LOGISTIQUA 2011, Hammamet, Tunisia, may 31-june 3, p. 434-438, 2011.

- [Sas12] A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, Y. Elhillali, A. Rivenq, *OFDM transmission performance evaluation in V2X communication*, **International Journal of Computer Science Issues**, IJCSI Press, vol. 9, p 141–148, 2012.
- [Sas14] A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, Y. Elhillali, A. Rivenq, *A Symbol-Based Estimation Technique for Inter-vehicular Communication Performance Optimization*, . **Computing Research Repository**, abs/1406.5588, 2014.
- [Sas15] A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, Y. Elhillali, A. Rivenq, *Experimental measurement for vehicular communication evaluation using OBU ARADA system*, **Proceedings of 11th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2015**, Dubrovnik, Croatia, august 24-28, 2015, p. 1358-1364, 2015.
- [Sas16a] A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, Y. Elhillali, A. Rivenq, *A bayesian network based estimation technique for IEEE 802.11P vehicular communication systems*, **Proceedings of 12th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2016**, Paphos, Cyprus, september 5-9, p. 806–811, 2016.
- [Sas16b] A. Sassi, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, F. Charfi, L. Kamoun, *Enhancing V2X communication based on a new comb-pilot estimation approach*, **Int. J. Veh. Technol.**, Hindawi, article ID 8341490, 14 pages (available online : <http://www.hindawi.com/journals/ijvt/aip/8341490>, 2016.
- [Sch93] R. Scholtz, *Multiple access with time-hopping impulse modulation*, **Military Communications Conference, (MILCOM'93)**, T. 2. IEEE. 1993, p. 447–450, 1993.
- [Sch86] R.O. Schmidt, *Multiple emitter location and signal parameter estimation*, **IEEE Trans. Antennas & Propagation**, vol. 34(3), p. 276–280, 1986,
- [Sch87] H. Schau, A. Robinson, *Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences* , **IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing** , vol. 35(8), p. 1223–1225, 1987.
- [Sem06] *Data sheet ADC083000 high performance, low power, 8-bit, 3 gsps A/D converter*, **National Semiconductor**, June 2006.
- [Sha48a] C. E.Shannon, Claude E. (July 1948). *A Mathematical Theory of Communication*, **Bell System Technical Journal**, vol. 27(3), p. 379–423, 1948.
- [Sha48b] C. E.Shannon, Claude E. (July 1948). *A Mathematical Theory of Communication*,

**Bell System Technical Journal**, vol.2(4), p. 623–666, 1948.

[Sha98] S. Shafer, *The new easyliving project at Microsoft Research*, **Proceedings of the 1998 DARPA/NIST Smart Spaces Workshop**, p. 127–130, 1998.

[She03] H. Sheng, P. Orlik, A.M. Aimovich, *On the spectral and power requirements for ultra-wideband transmission*, **IEEE International Conference on Communications**, vol. 1, p. 738–742, 2003.

[She07a] F. Shebli, I. Dayoub, J.M. Rouvaen, N. Al-Houlou, *A new management approach for finding an optimal path in an ad-hoc network*, **International Conf. on Networking and Services**, ICNS'07, p. 65-68, 2007.

[She07b] F. Shebli, I. Dayoub, J.M. Rouvaen, A. Zaouche, *A New Optimization Approach for Energy Consumption within Wireless Sensor Networks*, **Third Advanced International Conf. on Telecommunications**, AICT'07, art.4215235, p. 14-17, 2007.

[She07c] F. Shebli, I. Dayoub, A.O. M'foubat, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Minimizing energy consumption within wireless sensors networks using optimal transmission range between nodes*, **IEEE International Conf. on Signal Processing and Communications**, ICSPC 2007, p. 105, 2007.

[Sko81] M.I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, **McGraw-Hill Book Co.**, 2nd Edition, 1981.

[Smi87a] J. Smith, J. Abel, *Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements*, **IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing**, vol. 35(12), p. 166–1669, 1987

[Smi87b] J. Smith, J. Abel, *The spherical interpolation method of source localization*, **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, vol. 12(1), (1987), p. 246-252, 1987.

[Sri07] A. Srinivasan, J. Wu, *A survey on secure localization in wireless sensor networks*, **Encyclopedia of Wireless and Mobile communications**, 2007.

[Tah12] T. Tahri, Y. Elhillali, A. Rivenq-Menhaj, *UWB cooperative radar for localization and communication dedicated to railway transport*, **Int. J. Intell. Syst. Appl.**, vol. 6(10), p. 27-33, 2012.

- [Tah14a] T. Tahri, Y. Elhillali, L. Sakkila, A. Rivenq-Menhaj, *UWB cooperative radar for localization and communication dedicated to guided transport*, **Int. J. Intell. Syst. Appl.**, vol. 6(10), p. 27-33, 2014.
- [Tah14b] T. Tahri, *Systèmes radars coopératifs multimodes pour la détection, l'identification des obstacles sur les voies, la localisation et la transmission de données trains-infrastructures*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2014.
- [Tat04] C. Tatkeu, Y. Elhillali, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *Evaluation of coding methods for the development of a radar sensor for location and communication dedicated to guided transports*, **IEEE Vehicular Technology Conf.**, vol. 60(3), p. 395–402, 2004.
- [Tat06] C. Tatkeu, P. Deloof, Y. Elhillali, A. Rivenq, J.M. Rouvaen, *A cooperative radar system for collision avoidance and communication between vehicles*, **IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems ITSC 2006**, art. 1707354, p. 1012-1016, 2006.
- [Tat08] C. Tatkeu, F. Boukour, L. Sakkila, Y. Elhillali, P. Deloof, A. Rivenq, J.P. Ghys, *Radar system for collision avoidance and target detection in confined areas and subway environment*, **Proceedings of the 2nd International Conference on Wireless Communications in Underground and Confined Areas, ICWCUCA 2008**, Val-d'Or, Québec, Canada, p. 1-2, August 2008.
- [Tay95] J.D. Taylor, *Introduction to ultra-wideband radar systems*, **CRC Press**, J.D. Taylor Editor, Chapters 1 and 10, 1995.
- [The17] J. Thevenot, M. Brodallo, A. Hadid, *A survey on computer vision for assistive medical diagnosis from faces*, **IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics**, 2017
- [Tor14] N. Torabi, B.S. Ghahfarokhi, *Implementation of the IEEE 802.11p / 1609.4 WAVE in NS-2*, **4th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE) 2014**, p. 519–524, 2014.
- [Tou13a] N. Touati, C. Tatkeu, T. Chonavel, and A. Rivenq, *Phase coded Costas signals for ambiguity function improvement and grating lobes suppression*, **Vehicular Technology Conference (VTC Fall)**, 2013 IEEE 78th, p. 1–5, 2013.
- [Tou13b] N. Touati, C. Tatkeu, T. Chonavel, and A. Rivenq, *Doubly coded Costas signals for grating lobes mitigation*, **IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications**, p. 481–485, 2013.



- [Tou14a] N. Touati, C. Tatkeu, A. Rivenq, A. Chonavel, Y. Elhillali, *Pulse compression waveforms design and cross-ambiguity processing for radar applications*, **Proceedings of 7th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications**, ISIVC 2014, Marrakech, Morocco, session on Intelligent Transport Systems, paper 31, 4 pages, e-ISBN 978-1-4244-5997-1 , 2014.
- [Tou14b] N. Touati, C. Tatkeu, A. Rivenq, A. Chonavel, Y. Elhillali, *Multiuser phase coded Costas signals with improved cross-correlation and partial cross-ambiguity properties*, **International Radar Conference 2014**, october, p. 1–6, 2014.
- [Tou15a] N. Touati, *Optimisation des formes d'ondes d'un Radar d'aide à la conduite automobile, robustes vis-à-vis d'environnements électromagnétiques dégradés*, **Thèse de Doctorat**, Université de Valenciennes, 2015.
- [Tou15b] N. Touati, C. Tatkeu, T. Chonavel, Y. ElHillali, and A. Rivenq, *Ambiguity function and Cramer-Rao bounds for standard and new modified Costas signals*, **Electronics Letters**, vol. 51, p. 1497–499, 2015.
- [Tou16] N. Touati, C. Tatkeu, *Design and performances evaluation of new Costas-based radar waveforms with pulse coding diversity*, **IET Radar, Sonar and Navigation**, vol. 10(5), p. 877–891, 2016.
- [Tou17] N. Touati, C. Tatkeu, A. Rivenq-Menhaj, T. Chonavel, Y. Elhillali, *Multi-user radar waveforms based on doubly coded Costas signals*, **IET Radar Sonar Navig.**, vol. 11(2), p. 277–284, 2017.
- [Van13] D. Vandebout, *FPGAs!? now what?*, **XPress Corporation**, 2013.
- [Vit98] A.J. Viterbi, *CDMA. Principles of spread spectrum communication*, **Addislon Wesley Wireless Communications Series**, 1998.
- [Vu05] V.Y. Vu, *Conception et réalisation d'un sondeur de canal multi-capteurs utilisant les corrélateurs cinq-ports pour la mesure de propagation à l'intérieur des bâtiments*, **Thèse de Doctorat**, École Nationale Supérieure des Télécommunications, 2005.
- [Wan06] C.D. Wann, Y.J. Yeh, C.S.HSueh, *Hybrid TDOA/AOA indoor positioning and tracking using extended Kalman fillters*, **63rd IEEE Vehicular Technology Conference**, vol. 3, p. 1058–1062, 2006.

- [Wan92] R. Want, *The active badge location system*, **ACM Transactions on Information Systems** (TOIS), vol. 10(1), p. 91–102, 1992.
- [War] A. Ward, P. Steggles, R. Curwen, *The Bat Ultrasonic Location System*,  
**url : [www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/](http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/)**.
- [Wei] E.W. Weisstein, *Maximum Likelihood*, **MathWorld—A Wolfram Web Resource**..  
<http://mathworld.wolfram.com/MaximumLikelihood.html>
- [Win98] M.Z. Win, R.A. Scholtz *Impulse radio : How it works*, **IEEE Communications Letters**, vol. 2(2), p. 36–38, 1998.
- [Win02] M.Z. Win, R.A. Scholtz, *Characterization of ultra-wide bandwidth wireless indoor channels : a communication-theoretic view*, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 20(9), p. 1613–1627, 2002.
- [WUS] <http://www.usb.org/wusb/docs/Ultra-Wideband.pdf>, **Internet Resource**.
- [Yan07] C. Yang, Y. Huang, X.Zhu, *Hybrid TDOA/AOA method for indoor positioning systems*, **IET Seminar on Location Technologies**, IET, p. 1-5, 2007.
- [Yu06] K. Yu, *UWB location and tracking for wireless embedded networks*, **Signal Processing**, vol. 86(9), p. 2153–2171, 2006.
- [Zha13] X. Zhang, H. An, Z. Qin, B. Xiang, L. Zhang, *Implementation and field test of a small-scale WAVE system in IEEE 802.11p V2R/V2V environments*, **Communication Technology (ICCT) 2013 15th IEEE International Conference** , p. 462–466, 2013.
- [Zie01] R.E. Ziemer, W.H. Tranter, *Principles of Communications : Systems, Modulation, and Noise, 5th Edition*, **Wiley**, ISBN 978-0-471-39253-8, 2001.