



**HAL**  
open science

# Communications coopératives dans les réseaux autour du corps humain pour la capture du mouvement

Arturo Mauricio Jimenez Guizar

► **To cite this version:**

Arturo Mauricio Jimenez Guizar. Communications coopératives dans les réseaux autour du corps humain pour la capture du mouvement. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Lyon, 2016. Français. NNT : 2016LYSEI091 . tel-01412953v2

**HAL Id: tel-01412953**

**<https://hal.science/tel-01412953v2>**

Submitted on 22 Feb 2018

**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.



No d'ordre NNT : 2016LYSEI091

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON**  
opérée au sein de  
**L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon**

**École Doctorale EDA 160**  
**ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE ET AUTOMATIQUE (E.E.A.)**

**Spécialité de doctorat : Ingénierie pour le vivant**

Présentée et soutenue publiquement le 27/09/2016 par :

**Arturo M. J. Guizar**

---

**Communications coopératives dans les réseaux  
autour du corps humain pour la capture du  
mouvement**

---

**Devant le jury composé de :**

BERDER, Olivier	Professeur des universités, <i>Université de Rennes 1</i>	Rapporteur
LE RUYET, Didier	Professeur des universités, <i>Conservatoire National des Arts et Métiers</i>	Rapporteur
UGUEN, Bernard	Professeur des universités, <i>Université de Rennes 1</i>	Examineur
JULIEN-VERGONJANNE, Anne	Professeur des universités, <i>Université de Limoges</i>	Examineur
GORCE, Jean-Marie	Professeur des universités, <i>INSA Lyon</i>	Directeur de thèse
GOURSAUD, Claire	Maître de conférences, <i>INSA Lyon</i>	Co-directrice de thèse



*A mi madre y a mi hermano,  
por su comprensión y sacrificios,  
y porque sin su apoyo incondicional,  
nunca hubiera llegado tan lejos.*



# Remerciements

Il me sera très difficile de remercier sur une page toutes les personnes qui ont contribué directe et indirectement à la réalisation de cette thèse.

J'aimerais tout d'abord remercier Claire Goursaud, ma co-directrice de thèse, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser mon rêve de faire la recherche. Elle a été toujours à l'écoute, et je l'apprécie énormément pour son encadrement et pour m'avoir conseillé, encouragé, guidé et fait beaucoup voyager partout dans le monde.

Ma reconnaissance va également à Jean-Marie Gorce, mon directeur de thèse, pour m'avoir accueilli et introduit au monde de la recherche. C'est en partie grâce à ses enseignements et ses conseils que je me suis intéressé à démarrer cette thèse. Et surtout pour m'avoir laissé une grande liberté et délégué plusieurs responsabilités dont j'espère avoir été à la hauteur.

Je tiens à remercier profondément Benoît Denis, Bernard Uguen et Claude Chaudet pour tous les échanges, les expériences et le travail en équipe au sein du projet CORMORAN. Je remercie également Anis Ouni, Jihad Hamie, Matthieu Lauzier, Paul Ferrand et Benoît Miscopein pour le temps qui m'a été accordé pour me former sur différents points techniques nécessaires pour la création du co-simulateur, la conception de la base de données et le design des protocoles coopératifs.

Je remercie tout l'équipe du CITI, pour son accueil et la bonne ambiance. En particulier, je remercie Gaëlle Tworkowski pour sa patience et son aide dans toutes les missions où elle m'a assisté. Je remercie également Fabrice Valois pour son soutien aux différents projets que j'ai entrepris au sein du laboratoire, notamment pour la création de la journée de doctorants. C'est également grâce à son encouragement et ses conseils que j'ai pu développer BeyondLab. Je remercie aussi Nicolas Stouls, pour ses conseils et pour m'avoir encouragé à faire l'enseignement. Enfin, je remercie Leonardo Cardoso et Samir Perlaza pour son bon humeur et les fous rires, grâce à eux il y avait rarement des mauvais jours.

Je remercie également tous les étudiants que j'ai pu encadrer et enseigner, c'est grâce à cette expérience que j'ai appris l'importance de la pédagogie pour divulguer et vulgariser mes recherches.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets sans mentionner Startup Weekend et BeyondLab. Je passe une dédicace spéciale à Bernabé Chumpitazi, Rémi Berthier et Nicolas Penet de m'avoir introduit à l'écosystème et surtout m'avoir tutoré sur les bons pratiques de l'entrepreneuriat. Je remercie Xavier Blot et Raphaël Meyer pour m'avoir embarqué dans leur aventure pour créer une communauté de chercheurs et entrepreneurs. Enfin, je remercie tous les jeunes entrepreneurs de Lyon qui m'ont montré les grandes similitudes entre la recherche et l'entrepreneuriat.



# Résumé

## Résumé

Les réseaux corporels sans fil (WBAN) se réfèrent à la famille des réseaux de capteurs sans fil (WSN) "portables" utilisés pour collecter des données personnelles, telles que l'activité humaine, la fréquence cardiaque, les séquences du sommeil ou la position géographique. Pour un grand nombre d'applications, la localisation de la personne portant le WBAN est souhaitée. Cette thèse a pour objectif de proposer des algorithmes coopératifs et des mécanismes inter-couche avec WBAN pour effectuer des applications de localisation, tels que la capture de mouvement individuelle à grande échelle et la navigation de groupe coordonné. Pour cela, nous exploitons les avantages des WBAN coopératifs et hétérogènes avec différentes topologies maillées partiellement/totalement à des fins de localisation, en utilisant les liens on-body à l'échelle du corps, les liens body-to-body entre les utilisateurs mobiles d'un groupe et les liens off-body par rapport à l'environnement et l'infrastructure. La transmission repose sur une radio impulsionnelle (IR-UWB) (basée sur le standard IEEE 802.15.6), afin d'obtenir des mesures de distance point à point précises, basées sur l'estimation du temps d'arrivée (ToA). Ainsi, on s'intéresse au problème de positionnement et d'estimation de distance à travers de la conception de stratégies inter-couche coopératives et en considérant la mobilité du corps et les variations canal réalistes. Notre première contribution consiste en la création d'une base de données de mesure WBAN sans précédent obtenue avec de vrais scénarios expérimentaux pour la modélisation de la mobilité et du canal. Ensuite, nous introduisons un outil de simulateur à événements discrets (WSNet) et déterministe (PyLayers) capables d'exploiter notre base de données de mesures pour nous aider à la conception et la validation des algorithmes coopératives pour la localisation. Grâce à ces outils, nous étudions d'abord l'impact de la mobilité des nœuds et des variations de canal sur l'estimation de la distance. En particulier, nous étudions le protocole "three way-ranging" (3-WR) et nous montrons que les retards de paquets 3-WR ont un impact sur les distances estimées en fonction de la vitesse de nœuds. Ensuite, nous quantifions et comparons l'erreur avec des modèles statistiques et nous montrons que l'erreur générée par le canal est plus grande que l'erreur de mobilité. Dans un second temps, nous étendons notre étude pour l'estimation de position. Ainsi, nous analysons différentes stratégies au niveau de la couche MAC avec des algorithmes d'ordonnancement et d'allocation de slot pour réduire l'impact de la mobilité. Ensuite, nous proposons d'optimiser notre algorithme de positionnement avec un filtre de Kalman étendu (EKF), en utilisant nos stratégies d'ordonnancement et les modèles statistiques d'erreurs de mobilité et de canal. Enfin, nous proposons un algorithme distribué coopératif basé sur l'analyse d'estimateurs de qualité de lien (LQEs) à long et court termes pour améliorer la fiabilité du positionnement. Pour cela,

---

nous évaluons le taux de succès de positionnement en utilisant trois modèles de canaux différents (empirique, simulé et expérimental) avec un algorithme conditionnel (basé sur la théorie des jeux) pour le choix des ancres virtuelles. Nous montrons que notre algorithme permet d'améliorer le nombre de positions estimées pour les nœuds ayant la pire performance de localisation.

## Abstract

Wireless Body Area Networks (WBAN) refers to the family of “wearable” wireless sensor networks (WSN) used to collect personal data, such as human activity, heart rate, sleep sequences or geographical position. This thesis aims at proposing cooperative algorithms and cross-layer mechanisms with WBAN to perform large-scale individual motion capture and coordinated group navigation applications. For this purpose, we exploit the advantages of jointly cooperative and heterogeneous WBAN under full/half-mesh topologies for localization purposes, from on-body links at the body scale, body-to-body links between mobile users of a group and off-body links with respect to the environment and the infrastructure. The wireless transmission relies on an impulse radio Ultra-Wideband (IR-UWB) radio (based on the IEEE 802.15.6 standard), in order to obtain accurate peer-to-peer ranging measurements based on Time of Arrival (ToA) estimates. Thus, we address the problem of positioning and ranging estimation through the design of cross-layer strategies by considering realistic body mobility and channel variations. Our first contribution consists in the creation of an unprecedented WBAN measurement database obtained with real experimental scenarios for mobility and channel modelling. Then, we introduce a discrete-event (WSNet) and deterministic (PyLayers) co-simulator tool able to exploit our measurement database to help us on the design and validation of cooperative algorithms. Using these tools, we investigate the impact of nodes mobility and channel variations on the ranging estimation. In particular, we study the “three-way ranging” (3-WR) protocol and we observed that the delays of 3-WR packets have an impact on the distances estimated in function of the speed of nodes. Then, we quantify and compare the error with statistical models and we show that the error generated by the channel is bigger than the mobility error. In a second time, we extend our study for the position estimation. Thus, we analyze different strategies at MAC layer through scheduling and slot allocation algorithms to reduce the impact of mobility. Then, we propose to optimize our positioning algorithm with an extended Kalman filter (EKF), by using our scheduling strategies and the statistical models of mobility and channel errors. Finally, we propose a distributed-cooperative algorithm based on the analysis of long-term and short-term link quality estimators (LQEs) to improve the reliability of positioning. To do so, we evaluate the positioning success rate under three different channel models (empirical, simulated and experimental) along with a conditional algorithm (based on game theory) for virtual anchor choice. We show that our algorithm improve the number of positions estimated for the nodes with the worst localization performance.

**Keywords :** Wireless body area networks, impulse radio ultra-wideband, cooperative communications, IEEE 802.15.6, motion capture, localization, medium access control, scheduling, distributed algorithms, navigation, mobility model, positioning, ranging estimation, ranging error model, channel model, discrete-event simulation, ray-tracing.

# Table des matières

Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xix
Glossaire	xxi
Publications	xxv
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Applications et enjeux des services basés sur la localisation (LBS)	2
1.2 Les réseaux corporels sans fil (WBAN)	4
1.2.1 Spécificités entre WBAN et WSN	4
1.2.2 Architecture du WBAN	5
1.2.3 La localisation avec les WBAN	6
1.2.4 La radio impulsionnelle UWB pour les WBAN	10
1.3 Positionnement du problème	12
1.3.1 Partis pris, motivations et objectifs	12
1.4 Contributions et plan du manuscrit	14
<b>2 Capture du mouvement avec les réseaux corporels</b>	<b>17</b>
2.1 Introduction	18
2.2 Localisation et capture du mouvement	18
2.2.1 Historique sur l'étude du mouvement	19
2.2.2 Types de technologies pour la capture du mouvement	21
2.2.3 Intérêt des WBANs pour la capture du mouvement et la navigation de groupe	23
2.2.4 Projets existants sur les WBANs	30
2.3 Problèmes spécifiques et aspects techniques	34
2.3.1 Principe de localisation avec IR-UWB	34
2.3.2 Contraintes à considérer au niveau de la couche PHY	37
2.3.3 Challenges au niveau MAC	38
2.4 Discussion sur le design d'un protocole inter-couche pour la localisation	41
<b>3 Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels</b>	<b>43</b>
3.1 Introduction	44
3.2 Plateformes existantes pour l'étude des BANs	44

## Table des matières

---

3.2.1	Mesures et modèles de canal . . . . .	45
3.2.2	Modèles de mobilité . . . . .	47
3.2.3	Simulateurs et outils déterministes pour les WBANs . . . . .	48
3.3	Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe . . . . .	51
3.3.1	Environnement expérimental . . . . .	51
3.3.2	Technologies et plateformes utilisées . . . . .	51
3.3.3	Scénarios d'expérimentation . . . . .	54
3.3.4	Traces de mesures radio/mobilité et post-traitement . . . . .	59
3.3.5	Discussion . . . . .	62
3.4	Co-simulateur dédié aux réseaux corporels . . . . .	63
3.4.1	Adaptations des simulateurs choisis . . . . .	63
3.4.2	Architecture développée pour le co-simulateur . . . . .	73
3.4.3	Synthèse des scénarios d'étude possibles . . . . .	74
3.5	Conclusion et discussion sur l'exploitation de ces outils . . . . .	75
<b>4</b>	<b>Caractérisation de l'erreur sur l'estimation de la distance avec UWB</b>	<b>77</b>
4.1	Introduction . . . . .	78
4.2	Impact du délai de réponse sur l'estimation de la distance de nœuds mobiles	78
4.2.1	L'erreur de localisation en fonction du retard des paquets . . . . .	79
4.2.2	Simulation et résultats . . . . .	80
4.3	Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste . . . . .	82
4.3.1	Scénario d'étude et modèle de mobilité . . . . .	82
4.3.2	Modélisation de l'impact de la mobilité . . . . .	83
4.3.3	MAC conventionnel avec des stratégies d'ordonnancement . . . . .	84
4.3.4	Simulation & Évaluation des performances . . . . .	85
4.3.5	Conclusion sur l'impact de la mobilité . . . . .	91
4.4	Caractérisation de l'erreur de localisation entre la mobilité et le canal avec différents types des liens . . . . .	92
4.4.1	Configuration du réseau . . . . .	92
4.4.2	Évaluation du positionnement et des distances . . . . .	93
4.4.3	Modèle de mobilité . . . . .	93
4.4.4	Simulation & Résultats . . . . .	94
4.4.5	Conclusion . . . . .	97
4.5	Conclusion du chapitre . . . . .	99
<b>5</b>	<b>Réduction de l'erreur sur l'estimation de la distance et du positionnement des nœuds</b>	<b>101</b>
5.1	Introduction et état de l'art . . . . .	102
5.1.1	Allocation de ressources au niveau MAC . . . . .	102
5.1.2	Impact des algorithmes de calcul de position . . . . .	102
5.2	Étude des stratégies d'ordonnancement pour le positionnement . . . . .	103
5.2.1	Problématique autour des protocoles MAC considérés . . . . .	104
5.2.2	Ordonnancement pour le positionnement d'un nœud avec 4 ancres	104
5.2.3	Ordonnancement pour la capture du mouvement avec plusieurs nœuds mobiles . . . . .	107

5.2.4	Synthèse sur l'ordonnement pour le positionnement . . . . .	111
5.2.5	Conclusion . . . . .	113
5.3	Étude sur l'allocation de ressources pour l'estimation de distance . . . . .	114
5.3.1	Configuration du système . . . . .	115
5.3.2	Modèles de mobilité . . . . .	115
5.3.3	Allocation de slots par niveau de mobilité . . . . .	116
5.3.4	Simulation & Résultats . . . . .	117
5.3.5	Conclusion . . . . .	121
5.4	Amélioration de l'algorithme coopératif de calcul des positions . . . . .	122
5.4.1	Scénario de suivi et navigation coopérative . . . . .	124
5.4.2	Filtres de suivi coopératif proposé . . . . .	125
5.4.3	Simulation & proposition . . . . .	129
5.4.4	Conclusion . . . . .	130
5.5	Discussion . . . . .	130
<b>6</b>	<b>Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste</b> . . . . .	<b>133</b>
6.1	Introduction . . . . .	134
6.2	Impact de la perte de paquets de distance sur le positionnement . . . . .	136
6.2.1	Configuration du on-body et scénario d'étude . . . . .	136
6.2.2	Hypothèses et formulation du problème . . . . .	137
6.2.3	Stratégies d'ordonnement considérées pour la localisation . . . . .	137
6.2.4	Modèles de canal utilisés pour générer la perte de paquets . . . . .	138
6.2.5	Analyse du taux de succès de positionnement . . . . .	139
6.2.6	Discussion . . . . .	142
6.3	Quantification du taux de succès de positionnement . . . . .	142
6.3.1	Hypothèses et formulation du problème . . . . .	142
6.3.2	Évaluation de performance du taux de succès de positionnement . . . . .	143
6.3.3	Discussion . . . . .	145
6.4	Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds . . . . .	146
6.4.1	Formulation de la proposition . . . . .	146
6.4.2	Analyse du positionnement à long terme . . . . .	147
6.4.3	Analyse de la fiabilité du lien à court terme pour un positionnement coopérative et distribué . . . . .	149
6.4.4	Permutation conditionnelle des ancrs sur le corps . . . . .	152
6.5	Discussion et perspectives . . . . .	162
<b>7</b>	<b>Conclusion et perspectives</b> . . . . .	<b>165</b>
7.1	Synthèse des travaux et conclusions . . . . .	166
7.1.1	Études préliminaires . . . . .	166
7.1.2	Outils développés pour l'étude de localisation avec des WBANs . . . . .	168
7.1.3	Caractérisation de l'erreur d'estimation de distance générée par la mobilité et le canal . . . . .	170
7.1.4	Réduction de l'erreur d'estimation de la distance et des positions . . . . .	171
7.1.5	Amélioration du protocole de localisation avec une approche coopérative inter-couche . . . . .	173
7.2	Perspectives . . . . .	174

## Table des matières

---

7.2.1	Développement d'un co-simulateur en temps réel . . . . .	174
7.2.2	Impact de l'erreur sur le temps d'arrivée . . . . .	174
7.2.3	Modélisation des interférences et coexistence multi-WBAN . . . . .	175
7.2.4	Communication coopérative pour la localisation multi-WBANs . . . . .	175
<b>Bibliographie</b>		<b>177</b>

# Table des figures

1.1	Caractéristiques des WBANs comparées avec les WSN [Latré 11] . . . . .	4
1.2	Architecture à trois niveaux basée sur un système de communication WBAN [Chen 11] . . . . .	6
1.3	Définition du UWB [Bensky 07] . . . . .	10
1.4	Bandes de fréquence disponibles pour les WBANs [Cavallari 14] . . . . .	11
2.1	Scénarios pour la capture du mouvement individuel à grande échelle (LSIMC)	24
2.2	Scénarios pour la navigation en groupe coordonné (CGN) . . . . .	26
2.3	Protocoles 2-WR et 3-WR pour la localisation avec IR-UWB . . . . .	35
2.4	Erreur sur l'estimation de la distance avec TDOA entre un nœud statique et un nœud mobile . . . . .	39
3.1	Gymnase d'expérimentation de l'ENS/IRISA pour la capture de mouvement. . . . .	52
3.2	Système optique (Vicon) utilisé pour la capture du mouvement et l'obtention des positions des nœuds en temps réel pour nos deux scénarios d'étude. . . . .	53
3.3	Plateforme radio Hikob FOX IEEE 802.15.4 (NB 2.4 GHz) . . . . .	54
3.4	Plateforme radio BeSpoon IEEE 802.15.4a (IR-UWB à 3.994 GHz) . . . . .	54
3.5	Avant et arrière des images de la personne équipée avec 12 capteurs HiKoB FOX, le SpoonPhone (main droite), les 2 tags BeSpoon et 10 nœuds TCR, ainsi que plusieurs dizaines de marqueurs Vicon pour le scénario LSIMC mono-utilisateur.) . . . . .	55
3.6	Scénarios expérimentaux considérés pour le cas de la capture de mouvement individuel à large échelle (LSIMC). . . . .	56
3.7	Scénarios expérimentaux considérés pour le cas de la navigation en groupe (CGN).) . . . . .	58
3.8	Résultats non-synchronisés des traces du RSSI (en vert) et l'inverse de la distance au carré (en bleue) avec le niveau d'occultation de liens (en jaune). 60	
3.9	Comparaison du RSSI (bleue) et la quantité $dhs$ (rouge) centrée pour les liens ayant le facteur de corrélation le plus grand. . . . .	61
3.10	Comparaison du RSSI (bleue) et la quantité $dhs$ (rouge) centrée pour les liens ayant le facteur de corrélation le plus bas.) . . . . .	62
3.11	Comparaison des différents systèmes de coordonnées implémentés en PyLayers pour la mobilité du corps et pour le calcul du canal de propagation.) . . . . .	64

## Table des figures

3.12	Architecture du co-simulateur avec WSNNet et PyLayers. . . . .	65
3.13	Comparaison des RSSI calculés par simulation avec des traces obtenues par mesures (Hikob FOX) pour différents liens off-body : $R_1$ (bleue), $R_2$ (rouge) et $RSSI_{exp}$ (vert). . . . .	67
3.14	Comparaison des RSSI calculés par simulation avec des traces obtenues par mesures (Hikob FOX) pour différents liens on-body : $R_1$ (bleue), $R_2$ (rouge) et $RSSI_{exp}$ (vert). . . . .	68
3.15	Image qui montre la totalité des scénarios possibles avec le co-simulateur Pylayers-WSNet.) . . . . .	74
4.1	Scénario d'étude pour montrer l'impact de la mobilité sur l'estimation de la distance de deux nœuds WBAN . . . . .	79
4.2	Protocole Three Way Ranging . . . . .	80
4.3	Impact de la mobilité sur l'estimation de la distance. Les délais sont modélisés par le nombre de slots (1 slot $\approx$ 2 ms). Pour les figures (b) et (c), la vitesse a été fixé à 5 m/s. . . . .	81
4.4	Scénario d'étude pour la validation du modèle théorique . . . . .	82
4.5	Mise en pratique du modèle proposé . . . . .	83
4.6	Schéma sur les algorithmes d'ordonnement P2P-B et A&B . . . . .	85
4.7	Vitesse des ancres on-body . . . . .	85
4.8	Vitesse des nœuds mobiles . . . . .	86
4.9	Séquence des positions de yoga effectuées . . . . .	86
4.10	Comparaison de l'erreur sur la distance par simulation entre les nœuds mobiles et $A_4$ avec (a) P2P-B et (b) A&B avec affichage des trois périodes principales d'activité : Sb1 (0-50)s, Sb2 (50-70)s et Sb3 (70-100)s . . . . .	87
4.11	Comparaison de l'erreur sur la distance théorique entre les nœuds mobiles et $A_4$ avec (a) P2P-B et (b) A&B . . . . .	88
4.12	Évolution de la distance réelle entre les nœuds et l'ancre $A_4$ . . . . .	89
4.13	Comparaison de l'erreur sur la distance théorique avec P2P-B entre les nœuds mobiles et (a) $A_1$ , (b) $A_2$ et (c) $A_3$ . . . . .	90
4.14	Comparaison entre (a) l'erreur sur la position estimée avec P2P-B par simulation et (b) l'erreur sur la distance normalisée théorique entre les nœuds mobiles et $A_4$ . . . . .	91
4.15	Scénario d'étude avec la représentation des trois types de liens : on-body (ligne rouge), inter-body (lignes vertes) et off-body (lignes jaunes). Les nœuds mobiles (en bleue) se positionnent par rapport aux ancres fixes. . . . .	93
4.16	CDF de l'erreur quadratique (RMSE) sur l'estimation de distance avec le scénario Yoga (cas LSIMC). (a) RMSE des différents liens on-body et (b) RMSE avec les différents stratégies d'ordonnement. . . . .	94
4.17	CDF de l'erreur quadratique (RMSE) sur l'estimation de distance des liens on-, off- et inter-body dans le cas de la navigation en groupe (CGN) avec A&B. . . . .	94
4.18	Distribution des erreurs de distance avec les différents types de liens : (a) on-body, (b) inter-body et (c) off-body. . . . .	96
4.19	RMSE moyenne des distances estimées pour les liens on-, inter- et off-body. . . . .	98

5.1	Scénario de capture de mouvement individuel avec différentes stratégies d'ordonnancement . . . . .	104
5.2	Stratégies d'ordonnancement pour un nœud et quatre ancres. Dans ce schéma, chaque nœud a une couleur. Ainsi, la couleur de chaque paquet représente le nœud de destination. . . . .	105
5.3	RMSE en fonction de la vitesse pour évaluer l'impact des différents schémas d'ordonnancement (a) avec une mobilité linéaire et (b) un scénario d'activité Yoga réaliste. . . . .	106
5.4	Stratégie d'ordonnancement S1 avec les requêtes en broadcast . . . . .	107
5.5	Stratégies d'ordonnancement pour quatre nœuds et quatre ancres. Dans ce schéma, chaque nœud a une couleur. Ainsi, la couleur de chaque paquet représente le nœud de destination. . . . .	108
5.6	RMSE en fonction de la vitesse par rapport à la position $P_{ref_{1,i}}(t)$ pour chaque nœud mobile : (a) le poignée droit ( $N_5$ ), (b) le poignée gauche ( $N_6$ ), (c) le pied droit ( $N_7$ ) et (d) le tête ( $N_8$ ). . . . .	109
5.7	RMSE en fonction de la vitesse par rapport à la position $P_{ref_{2,i}}(t)$ pour chaque nœud mobile : (a) le poignée droit ( $N_5$ ), (b) le poignée gauche ( $N_6$ ), (c) le pied droit ( $N_7$ ) et (d) le tête ( $N_8$ ). . . . .	110
5.8	RMSE en fonction de la vitesse par rapport à la position $P_{final_i}(t)$ pour chaque nœud mobile : (a) le poignée droit ( $N_5$ ), (b) le poignée gauche ( $N_6$ ), (c) le pied droit ( $N_7$ ) et (d) le tête ( $N_8$ ). . . . .	111
5.9	Meilleures stratégies d'ordonnancement . . . . .	112
5.10	Schéma sur les algorithmes d'ordonnancement P2P-B et A&B . . . . .	113
5.11	Comparaison des durées de trames en fonction du nombre de nœuds entre P2P(rouge), P2P-B (vert) et A&B (bleu). . . . .	114
5.12	Configuration du système pour l'étude de l'impact de l'allocation de slots en fonction de la mobilité des noeuds . . . . .	116
5.13	Allocation de slots ( $NS_k$ ) en fonction du niveau de mobilité avec 4 nœuds mobiles. . . . .	117
5.14	Impact de l'allocation de slots par niveau de mobilité sur la précision de positionnement avec P2P-B dans le scénario yoga. . . . .	118
5.15	Distribution du RMSE pour tous les $NS_k$ dans le scénario yoga. . . . .	119
5.16	CDF du RMSE pour le pire cas : A&B et P2P-B par rapport à $P_{final_i}$ avec NS1. . . . .	120
5.17	CDF du RMSE pour le meilleur cas : A&B (resp. P2P-B) par rapport à $P_{ref_{1,i}}$ (resp. $P_{ref_{2,i}}$ ) indépendamment du $NS_k$ . . . . .	121
5.18	Déploiement d'un système de WBANs coopératifs pour la localisation absolue des nœuds sur le corps dans les application de navigation avec trois types de liens : on-body (ligne rouge), inter-body (lignes vertes) et off-body (lignes jaunes). . . . .	125
5.19	Diagramme de blocs du EKF. . . . .	126
5.20	CDF du RMSE des positions sur le corps obtenues de manière coopérative dans un scénario de navigation en groupe. . . . .	130
5.21	RMSE moyenne des positions estimées des nœuds pour chaque corps avec un EKF coopératif classique et amélioré par l'atténuation de l'erreur liée à la mobilité. . . . .	131

## Table des figures

6.1	Configuration du système pour l'étude de l'impact du canal sur le taux de succès de positionnement. . . . .	136
6.2	(a) Reconstruction multi-cylindrique du corps. (b) Scénario de mobilité de marche et représentation avec PyLayers. . . . .	137
6.3	Stratégies d'ordonnancement : P2P, P2P-B et A&B . . . . .	138
6.4	Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d'ordonnancement (A&B, P2P-B et P2P), avec $\rho = -91dBm$ . . . . .	140
6.5	Nombre de positions estimées avec 3-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d'ordonnancement (A&B, P2P-B et P2P), avec $\rho = -91dBm$ . . . . .	140
6.6	Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 2-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d'ordonnancement (A&B, P2P-B et P2P), avec $\rho = -91dBm$ . . . . .	141
6.7	Nombre de positions estimées avec 2-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d'ordonnancement (A&B, P2P-B et P2P), avec $\rho = -91dBm$ . . . . .	141
6.8	Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR et P2P en utilisant les différents canaux. . . . .	144
6.9	Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR et P2P-B en utilisant les différents canaux. . . . .	144
6.10	Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR et A&B en utilisant les différents canaux. . . . .	145
6.11	Évolution de la puissance de réception ( $R_x$ ) pour les nœuds $N_7$ et $N_9$ ayant le pire $P_{succ}$ (avec A&B et le canal simulé par PyLayers. . . . .	146
6.12	Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d'ordonnancement (A&B, P2P-B et P2P), avec $\rho = -80dBm$ . . . . .	147
6.13	Taux de succès de l'estimation de distance $R_{succ}$ entre les différents modèles de canal avec A&B et $\rho = -80dBm$ . . . . .	148
6.14	Taux de succès de l'estimation de distance $R_{succ}$ entre les différents modèles de canal avec P2P-B et $\rho = -80dBm$ . . . . .	148
6.15	Taux de réception de paquet de l'estimation de distance entre les différents modèles de canal avec A&B et $\rho = -80dBm$ . . . . .	150
6.16	Taux de réception de paquet de l'estimation de distance entre les différents modèles de canal avec P2P-B et $\rho = -80dBm$ . . . . .	151
6.17	Taux de succès de positionnement avec P2P-B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et la stratégie avec la meilleure permutation des ancrs (bleue) pour chaque nœud (avec la contrainte où deux nœuds ne peuvent pas être ancrs mutuellement). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du $P_{succ}$ . Les ancrs et les candidats d'ancrs virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de $R_{succ}$ . Les ancrs marquées en rouge représentent les ancrs remplacés et les nœuds marqués en vert représentent les ancrs virtuelles choisies pour chaque nœud. . . . .	153

6.18 Taux de succès de positionnement avec A&B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et la stratégie avec la meilleure permutation des ancrs (bleue) pour chaque nœud (avec la contrainte où deux nœuds ne peuvent pas être ancrs mutuellement). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du  $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du  $P_{succ}$ . Les ancrs et les candidats d'ancrs virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de  $R_{succ}$ . Les ancrs marquées en rouge représentent les ancrs remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancrs virtuelles choisies pour chaque nœud. . . . . 154

6.19 Taux de succès de positionnement avec P2P-B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et les stratégies de permutation conditionnelle des ancrs initial (bleue) et ajustée (vert). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du  $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du  $P_{succ}$ . Les ancrs sont triés par ordre décroissant en fonction du  $R_{succ}$  et les candidats d'ancrs virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de  $R_{succ}$ . Les ancrs marquées en rouge représentent les ancrs remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancrs virtuelles choisies pour chaque nœud. . . . . 158

6.20 Taux de succès de positionnement avec A&B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et les stratégies de permutation conditionnelle des ancrs initial (bleue) et ajustée (vert). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du  $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du  $P_{succ}$ . Les ancrs sont triés par ordre décroissant en fonction du  $R_{succ}$  et les candidats d'ancrs virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de  $R_{succ}$ . Les ancrs marquées en rouge représentent les ancrs remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancrs virtuelles choisies pour chaque nœud. . . . . 159

6.21 Comparaison des différents schémas d'ordonnancement des ancrs virtuelles en utilisant la permutation ajustée avec avec A&B et P2P-B. . . . . 160



# Liste des tableaux

1.1	Régulation pour les masques d'émission en UWB à travers le monde . . .	12
2.1	Récapitulatif des besoins pour les applications LSIMC et CGN . . . . .	27
2.2	Comparaison des systèmes de localisation par rapport aux spécifications techniques des scénarios LSIMC et CGN . . . . .	28
2.3	Tableau de comparaison sur les projets nationaux ayant traité la problématique la localisation avec WBAN et UWB . . . . .	30
2.4	Tableau de comparaison sur les projets internationaux ayant traité la problématique la localisation avec WBAN et UWB . . . . .	31
4.1	L'écart-type sur l'erreur de distance due à la mobilité des nœuds (m). . .	97
4.2	L'écart-type sur l'erreur de distance due au bruit du canal (m). . . . .	97
5.1	Erreur moyenne sur l'estimation de position avec les PC et MC . . . . .	121
5.2	L'écart-type sur l'erreur de distance due à la mobilité des nœuds (m). . .	129
5.3	L'écart-type sur l'erreur de distance due au bruit du canal (m). . . . .	129



# Glossaire

<b>2-WR</b>	Two way ranging protocol. (p. xvi, 34, 37, 38, 40, 72, 74, 76, 80, 81, 99, 139, 141, 142, 167, 169, 170)
<b>3-WR</b>	Three way ranging protocol. (p. vii, viii, xvi, 14, 35, 37, 38, 40, 41, 72–74, 76, 78–81, 83, 84, 89, 92–95, 97, 99, 102–104, 106, 108, 112, 113, 115–117, 122, 124, 125, 129, 131, 132, 134, 137–145, 147, 156, 162, 167, 169–171, 173)
<b>A&amp;B</b>	Aggregated and Broadcast protocol. (p. xiv–xvii, 41, 74, 76, 85–89, 92–95, 97, 111–114, 116–122, 125, 129, 132, 136, 138–143, 145–148, 150, 152, 154–157, 159–162, 169–174)
<b>AoA</b>	Angle of Arrival. (p. 6, 7, 23, 29)
<b>BER</b>	Bit Error Rate. (p. 70–72, 74, 169)
<b>CDF</b>	Cumulative distribution fonction. (p. xiv, xv, 94, 95, 119–121, 130)
<b>CEPT</b>	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations. (p. 11)
<b>CGN</b>	Coordinated Groupe Navigation. (p. xiii, xiv, xix, 24–28, 30, 34, 39, 47, 55, 58, 92, 94, 123, 166, 167, 170)
<b>CRLB</b>	Cramér-Rao lower bound. (p. 29)
<b>CSMA</b>	Carrier sense multiple access. (p. 39, 50)
<b>DAA</b>	Detect and avoid. (p. 12)
<b>ECC</b>	Electronic Communications Committee. (p. 11)
<b>EIRP</b>	Equivalent isotropic radiated power. (p. 12)
<b>EKF</b>	Extended Kalman Filter. (p. vii, viii, xv, 14, 97, 98, 122, 124, 126, 127, 129–131)
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute. (p. 11)
<b>EWMA</b>	Exponentially Weighted Moving Average. (p. 135)
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission. (p. 10, 11)
<b>GCS</b>	Global coordinate system. (p. 25, 93, 115, 124, 125)
<b>GPS</b>	Global Positioning System. (p. 3, 56, 143)

<b>HBC</b>	Human Body Communications. (p. 5, 23)
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission. (p. 3)
<b>IHM</b>	Interaction homme-machine. (p. 18, 31)
<b>INS</b>	Inertial Navigation Systems. (p. 22)
<b>IoT</b>	Internet of Things. (p. 2)
<b>IPS</b>	Indoor positioning systems. (p. 3, 30)
<b>IR-UWB</b>	Impulse Radio Ultra Wideband. (p. vii–ix, xiii, 3, 9, 11, 12, 14, 17, 18, 29, 30, 34, 35, 38, 39, 41, 45, 47, 48, 54, 63, 72–75, 78, 79, 83, 91, 93, 99, 103, 105, 113, 123, 134, 136, 137, 142, 166, 169, 175)
<b>ISM</b>	Industrial, scientific, medical. (p. 10, 23, 46, 52, 139)
<b>ISO</b>	International Organisation for Standardization. (p. 3)
<b>LBS</b>	Location-based systems. (p. 2, 3)
<b>LCS</b>	Local coordinate system. (p. 24, 35, 64, 65, 115, 137)
<b>LDC</b>	Low duty cycle. (p. 11, 12)
<b>LDR</b>	Low data rate. (p. 3)
<b>LLS</b>	Linear least Square estimator. (p. 36, 122, 125, 137)
<b>LoS</b>	Line of sight. (p. 45, 54, 62, 66, 80, 105, 124)
<b>LQE</b>	Link Quality Estimator. (p. vii, viii, 134, 135, 146, 149, 161, 162, 173)
<b>LQI</b>	Link Quality Indicator. (p. 134)
<b>LSIMC</b>	Large-scale Individual motion capture. (p. xiii, xiv, xix, 24–30, 34, 39, 47, 55, 56, 79, 94, 99, 166, 167, 170)
<b>MAC</b>	Medium Access Control. (p. vii, viii, 9, 12, 14, 23, 30–32, 34, 39–41, 50, 70, 72, 76, 78–80, 84, 86, 89, 91–93, 95, 97–99, 102–105, 108, 112–114, 117, 122–124, 131, 132, 139, 141, 152, 155–157, 160–162, 167–171, 173–175)
<b>ML</b>	Maximum likelihood estimator. (p. 8, 123, 137)
<b>MMSE</b>	Minimum mean squared error. (p. 127, 128)
<b>MoCap</b>	Motion Capture. (p. 21, 23, 28)
<b>NB</b>	Narrowband. (p. xiii, 11, 29, 30, 33, 39, 45, 50–52, 54, 55, 62, 68, 74, 75, 123, 168, 175)
<b>NLLS</b>	Non-Linear least Square estimator. (p. 102, 123)
<b>NLoS</b>	Non line of sight. (p. 38, 45, 66, 78, 122, 124, 126, 128)
<b>NTIC</b>	Nouvelles technologies de l’information et de la communication. (p. 2)
<b>NWK</b>	Network. (p. 41)
<b>OOK</b>	On-Off keying. (p. 72, 75, 105, 139, 169)
<b>P2P</b>	Point to Point localisation. (p. xvi, 74, 76, 93–95, 104, 111–114, 120, 124, 136–141, 143–145, 147, 162, 169, 170, 172, 173)
<b>P2P-B</b>	Point to Point localisation with request paquets in Broadcast. (p. xiv–xvii, 85–95, 111–114, 116–122, 124, 132, 136–141, 143–145, 147, 148, 150–153, 155–158, 160–162, 172–174)

---

<b>PDR</b>	Pedestrian Dead Reckoning. (p. 22)
<b>PER</b>	Packet Error Rate. (p. 70–72)
<b>PHY</b>	Physical layer. (p. ix, 9, 12, 14, 17, 23, 30–34, 37, 39, 41, 49, 70, 73, 78, 85, 92, 105, 124, 134, 136, 139, 169, 175)
<b>PRR</b>	Packet Reception Rate. (p. 135, 147, 149–151)
<b>PSD</b>	Power spectral density. (p. 11)
<b>QoS</b>	Quality of Service. (p. 30, 102, 114, 115)
<b>RFID</b>	Radio frequency identification. (p. 3, 23)
<b>RMSE</b>	Root mean square error. (p. xiv, xv, 80, 81, 94, 95, 97, 105, 106, 108, 109, 117–121, 129–131)
<b>RNP</b>	Required Number of packet transmissions. (p. 135)
<b>RSS</b>	Receiver signal strength. (p. 7, 23, 29, 30, 32)
<b>RSSI</b>	Receiver signal strength indication. (p. xiii, xiv, 23, 29, 30, 34, 49, 52, 59–63, 66–69, 71, 72, 74, 75, 123, 134, 139, 168–170)
<b>RT</b>	Round trip. (p. 34, 35, 54, 167)
<b>RTLS</b>	Real-time location systems. (p. 3)
<b>SINR</b>	Signal-to-noise-plus-interference ratio. (p. 70)
<b>SNR</b>	Signal-to-noise ratio. (p. 29, 70–72, 74, 122, 134, 169)
<b>TDMA</b>	Time division multiple access. (p. 14, 39, 41, 50, 52, 54, 70, 72, 76, 78, 80, 84, 86, 93, 99, 102, 104, 114, 115, 137, 139, 168, 169, 175)
<b>TDOA</b>	Time Difference of Arrival. (p. xiii, xvi, xvii, 14, 15, 36, 37, 39, 72, 74, 76, 84, 91, 104, 122, 125, 137, 153, 154, 158, 159, 169, 171, 172)
<b>ToA</b>	Time of Arrival. (p. vii, viii, 6–9, 23, 29, 30, 34, 37, 38, 44, 47, 49, 54, 66, 71, 74, 85, 92, 93, 102, 105, 111, 123, 124, 126, 138, 167, 169, 175)
<b>ToF</b>	Time of flight. (p. 34, 35, 40, 54, 71, 72, 78, 80, 81, 130, 167)
<b>ULP</b>	Ultra low power. (p. 3)
<b>UWB</b>	Ultra Wideband. (p. xiii, xix, 10–14, 23, 29–34, 51, 53, 55, 62, 63, 71, 75, 102, 105, 130, 144, 145, 167, 174, 175)
<b>WBAN</b>	Wireless Body Area Networks. (p. vii–xv, xix, 3–15, 17–19, 21, 23–25, 29–35, 37–41, 43–51, 62, 63, 67, 69, 70, 73, 75, 78, 79, 82, 91–93, 95, 97–100, 102, 103, 107, 114, 115, 122–125, 131, 132, 134–137, 142, 143, 145, 146, 156, 162, 165–171, 173–176)
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Networks. (p. 12)
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Networks. (p. vii, viii, xiii, 4, 5, 23, 38, 39, 41, 49, 50, 78, 79, 102, 135)



# Publications

## Journaux

- [**Guizar 16a**] Arturo Guizar, Claire Goursaud & Jean-Marie Gorce. *Performance of IR-UWB cross-layer ranging protocols under on-body channel models with body area networks*. In Annals of Telecommunications Springer, 2016.

## Conférences internationales

- [**Guizar 15b**] A. Guizar, C. Goursaud, & J. Gorce. *Modeling the Impact of node speed on the ranging estimation with UWB Body Area Networks*. In 26th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC'26), Hong Kong, China, Sept, 2015.
- [**Ouni 15**] Anis Ouni, Jihad Hamie, Claude Chadet, Arturo M. Guizar & Claire Goursaud *From the Characterization of Ranging Error to the Enhancement of Nodes Localization For Group of Wireless Body Area Networks*. In the 7th International Conference on Ad Hoc Networks (AdhocNets'15), San Remo, Italy, Sept, 2015.
- [**Guizar 15a**] A. Guizar, A. Ouni, C. Goursaud, C. Chaudet & J. Gorce. *Quantifying the Impact of Scheduling and Mobility on IR-UWB Localization in Body Area Networks*. In 12th IEEE International Conference on Body Sensor Networks (BSN'12), MIT, Cambridge, USA, June, 2015.
- [**Denis 14**] B. Denis, N. Amiot, B. Uguen, A. Guizar, C. Goursaud, A. Ouni & C. Chaudet. *Qualitative Analysis of RSSI Behavior in Cooperative Wireless Body Area Networks for Mobility Detection and Navigation Applications*. In 21st IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS'21), Marseille, France, Dec. 2014.
- [**Guizar 14b**] A. Guizar, A. Ouni, C. Goursaud, N. Amiot & J. Gorce. *Impact of MAC scheduling on positioning accuracy for motion capture with UWB body area networks*. In 9th International Conference on Body Area Networks (BodyNets'9), London, Great Britain, October, 2014.
- [**Guizar 15d**] A. Guizar, C. Goursaud & B. Uguen. “ *Impact of On-Body Channel models on positioning success rate with UWB Wireless Body Area Networks*. In 10th International Conference on Body Area Networks (BodyNets'10), Sydney, Australia, September, 2015. (Soumise)
- [**Guizar 14a**] A. Guizar, A. Ouni & C. Goursaud. “ *Impact of mobility on ranging estimation using Ultra Wideband*. In Proceedings of the Fourth Networking Networking

Women Workshop, Chicago, USA, August, 2014

### Conférences nationales

- [**Guizar 16b**] A. Guizar, C. Goursaud & J.M. Gorce. *Stratégies de protocoles inter-couche pour la localisation coopérative améliorée avec WBAN avec prise en compte d'un canal réaliste*. In 18èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel), Bayonne, France, May, 2016.
- [**Guizar 15c**] A. Guizar, C. Goursaud & J.M. Gorce. *Modélisation de l'impact de la vitesse des nœuds sur l'estimation des distances dans les Réseaux Corporels sans fils avec ULB*. In XXVe colloque GretsI, Lyon, France, September, 2015.
- [**Guizar 15e**] A. Guizar, A. Ouni, C. Goursaud & J.M. Gorce. *Proposition d'ordonnement pour une meilleure localisation de nœuds mobiles dans les Réseaux Corporels sans fils avec ULB*. In 17èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel), Baune, France, June, 2015.

### Rapport de recherche - ANR, CORMORAN

- [**CORMORAN 16**] **Draft 1.1** Benoît Denis, Jihad Hamie, Raffaele d'Errico, Pierre Pasquero (CEA), Claire Goursaud, Arturo Guizar, Paul Ferrand, Jean-Marie Gorce (INSA), Claude Chaudet (TPT), Bernard Uguen, Stéphane Avrillon & Meriem Mhedhbi (UR1). *Application Scenarios, System Requirements and Prior Models*. Chapters (3, 7), July 2012.
- [**CORMORAN 16**] **Draft 2.3** Raffaele d'Errico, Pierre Pasquero (CEA), Claire Goursaud, Arturo Guizar, Paul Ferrand, Jean-Marie Gorce (INSA), Bernard Uguen, Stéphane Avrillon & Meriem Mhedhbi (UR1). *Final Channel Measurement Campaign* Chapters (4, 6), July 2012.
- [**CORMORAN 16**] **Draft 2.4** Raffaele d'Errico, Pierre Pasquero (CEA), Claire Goursaud, Arturo Guizar, Paul Ferrand, Jean-Marie Gorce (INSA), Bernard Uguen, Stéphane Avrillon & Meriem Mhedhbi (UR1). *Statistical and Deterministic Abstraction of the Dynamic Channel Variations* Chapters (6), March 2014.
- [**CORMORAN 16**] **Draft 2.5** Benoît Denis, Raffaele d'Errico, Pierre Pasquero (CEA), Claire Goursaud, Arturo Guizar, Paul Ferrand, Jean-Marie Gorce (INSA), Jihad Hamie (TPT), Bernard Uguen, Nicolas Amiot, Stéphane Avrillon & Meriem Mhedhbi (UR1). *First Mobility Enabled Physical Simulator and Coupling with Packet Oriented Simulator* Chapters (3-6), June 2014.
- [**CORMORAN 16**] **Draft 2.6** Benoît Denis, Raffaele d'Errico, Pierre Pasquero (CEA), Claire Goursaud, Arturo Guizar, Paul Ferrand, Jean-Marie Gorce (INSA), Jihad Hamie (TPT), Bernard Uguen, Nicolas Amiot, Stéphane Avrillon & Meriem Mhedhbi (UR1). *Final Simulation Tool* Chapters (2-5), November 2015.
- [**CORMORAN 16**] **Draft 3.1** Arturo Guizar, Claire Goursaud, Isabelle Augé-Blum (INSA), Claude Chaudet (TPT). *Enhanced WBAN Communications through Cooperation – Initial Document* Chapters (2-6), June 2014.
- [**CORMORAN 16**] **Draft 3.4** Arturo Guizar, Claire Goursaud (INSA), Anis Ouni, Claude Chaudet (TPT). *PHY/MAC Cross-layer Design for Enhanced WBAN*

*Communications through Cooperation – Final Document* Chapters (2-4), April 2015.

[**CORMORAN 16**] **Draft 3.6** Anis Ouni, Claude Chaudet (TPT), Arturo Guizar, Claire Goursaud (INSA). *MAC/NWK Cross-Layer Design for Inter-WBAN Networking – Final Document* . Chapters (2), June 2015.

[**CORMORAN 16**] **Draft 4.1** Benoît Denis, Lionel Biard (CEA), Arturo Guizar, Claire Goursaud (INSA), Jihad Hamie, Claude Chaudet (TPT), Bernard Uguen, Nicolas Amiot, Stéphane Avrillon & Meriem Mhedhbi (UR1). *Demonstration Scenarios and Interfaces between Algorithms and Platforms* . Chapters (2-4), September 2014.

[**CORMORAN 16**] **Draft 4.2** Benoît Denis (CEA), Arturo Guizar, Claire Goursaud (INSA), Anis Ouni, Claude Chaudet (TPT), Bernard Uguen & Nicolas Amiot (UR1). *Final Demonstrator Test Report* . Chapters (1, 3), July 2015.



# 1 Introduction

*"Como no estas experimentado en las cosas del mundo, todas las cosas que tienen algo de dificultad te parecen imposibles, confía en el tiempo, que suele dar dulces salidas a muchas amargas dificultades"*

*Don Quijote de la Mancha*  
— Miguel de Cervantes Saavedra, *novelista, poeta y dramaturgo español*

## Sommaire du chapitre

---

1.1	Applications et enjeux des services basés sur la localisation (LBS) . . . . .	2
1.2	Les réseaux corporels sans fil (WBAN) . . . . .	4
1.2.1	Spécificités entre WBAN et WSN . . . . .	4
1.2.2	Architecture du WBAN . . . . .	5
1.2.3	La localisation avec les WBAN . . . . .	6
1.2.4	La radio impulsionnelle UWB pour les WBAN . . . . .	10
1.3	Positionnement du problème . . . . .	12
1.3.1	Partis pris, motivations et objectifs . . . . .	12
1.4	Contributions et plan du manuscrit . . . . .	14

---

### 1.1 Applications et enjeux des services basés sur la localisation (LBS)

Avec la constante évolution des *nouvelles technologies de l'information et de la communication* (NTIC), nous sommes en train d'assister à une évolution où les capteurs, les personnes et les machines sont de plus en plus connectés dans un écosystème croissant d'objets connectés (IoT). En termes de chiffres, on estime atteindre entre 10 à 34 milliards d'appareils reliés à l'Internet de 2015 à 2020 et 6 billions de dollars investis au cours des ces cinq années pour générer 13 billions de dollars en 2025 [BusinessInsider 15]. Dans cette nouvelle révolution industrielle, les machines ne vont plus être des répondeurs passifs aux requêtes des personnes, mais ils vont plutôt offrir proactivement des services de haute valeur ajoutée qui vont dépendre du contexte de l'utilisateur (en anglais *context-awareness services*) [BUTLER 14]. A partir de ce concept, il y a une grande attente pour que les machines participent à l'expérience utilisateur, tout simplement parce que nous utilisons de plus en plus les ressources disponibles de notre entourage pour augmenter les interactions numériques (informatique ubiquitaire [BUTLER 14] [Hightower 01]). Dans le contexte humain, il faut considérer que les informations telles que l'identité, le mouvement, les données de santé ou encore la localisation, sont des données précieuses qui peuvent être réutilisées et insérées dans les services numériques pour améliorer l'expérience utilisateur [Idtechex 15].

La connaissance de l'emplacement (en anglais *location-awareness*) ou la capacité de réagir selon sa position, peut être considérée comme une forme particulière de la sensibilité au contexte où l'on exploite la localisation géographique de l'utilisateur pour offrir des nouvelles applications [Vaughan-Nichols 09], appelées également services basés sur la localisation (en anglais *location-based services* LBS) [Muthukrishnan 05] [Rappaport 96]. Les gains technologiques, sociologiques et financiers résultants de cette innovation sont importants selon le contexte d'application [BusinessInsider 15]. Dans le contexte industriel, nous pouvons imaginer qu'en fonction de leur activité principale et de leur marché ciblé, les grandes industries pourront obtenir des améliorations significatives en termes de compétitivité et de productivité (par exemple une meilleure ergonomie de travail avec des capteurs de détection de posture ou encore un gain en temps, énergie et produits avec un réseau dédié à la logistique des entreprises pour suivre le déplacement et le déploiement de ses ressources) ou alors fournir des nouveaux services à leurs clients et aux utilisateurs finaux en fonction de leur localisation (par exemple avec une proposition d'offres en fonction de sa géolocalisation). Dans le contexte politique, les principales administrations et organisations publiques pourraient avoir une meilleure gestion de leurs ressources et faire des économies considérables, spécialement lorsqu'ils sont soumis à des restrictions financières strictes (par exemple la rééducation à distance avec des capteurs pourrait réduire les coûts pour la santé, la navigation en groupe augmenté permettrait de suivre les agents de la sécurité civil (pompiers, police ou soldats) pour garantir leur survie et réduire les coûts de déploiement de la défense, ou encore le suivi des transports publics pourrait aider à mieux planifier le développement des villes). Enfin, dans un contexte plus social, ces services pourraient être destinés et mis à la disposition des citoyens pour leur usage personnel, tels que dans la santé (rééducation à la maison, assistance préventive à distance), le divertissement (capture du mouvement pour les jeux avec réalité augmentée, analyse sportive, navigation en groupe pour les réseaux sociaux nomades) ou bien dans les communications multimédia (terminaux distribués pour la diffusion d'information en

## 1.1. Applications et enjeux des services basés sur la localisation (LBS)

---

fonction de l'emplacement, telles que les événements à proximité ou l'évolution du trafic routier).

Cependant pour que toutes ces applications LBS voient un jour leur sortie dans le marché, il y a des verrous importants à lever, notamment sur un plan technologique et d'acceptation de l'utilisateur. Du point de vue technologique, les nouveaux systèmes doivent prendre en compte principalement la gestion intelligente de ressources et la sécurité des données numériques tout en gardant un coût abordable. Alors que d'une perspective utilisateur, il faut considérer le niveau d'omniprésence (*pervasiveness*) et de sensibilisation (*awareness*) souhaités et acceptables pour être géolocalisé à tout moment et n'importe où. Une première classification de systèmes qui prend en compte ces aspects (technologique et centré sur l'utilisateur) peut être trouvée dans [Idtechex 15] : les systèmes de localisation en temps réel RTLS (en anglais *real time location systems*) et les systèmes de positionnement à l'intérieur IPS (en anglais *indoor positioning systems*). Les RTLS ont été proposés pour permettre aux entreprises de faire un suivi de leurs ressources (par exemple avec la radio-identification RFID) et des personnes, ainsi que pour avoir un historique sur la localisation des ses produits. Par conséquent, cela sert principalement les intérêts des entreprises qui définissent le niveau d'omniprésence aux limites technologiques du système. D'autre part, les IPS sont destinés à servir le client et principalement dans les zones où les systèmes de géolocalisation (GPS) ne peuvent pas fonctionner, par exemple pour les utilisateurs des smartphones et tablettes qui ont besoin de trouver quelque chose ou de naviguer à l'intérieur d'un bâtiment. Dans ce cas, l'utilisateur peut contrôler le niveau d'omniprésence et de sensibilisation pour se localiser. Enfin, une dernière différence entre ces systèmes est que le fonctionnement des RTLS est régulé par l'ISO (*International Organisation for Standardization*) et l'IEC (*International Electrotechnical Commission*), en vertu de la série ISO/IEC 24730, alors qu'il n'existe pas de définition standard accordée aux IPS. Ainsi, les solutions RTLS sont souvent basées sur la radio-identification RFID pour calculer et transmettre une position relativement précise, tandis que les IPS utilisent d'autres technologies de localisation qui permettent un niveau supérieur d'ubiquité avec moins de précision, par exemple avec des systèmes inertiels ou des systèmes radio à courte portée, tels que Bluetooth ou WiFi.

Si l'on prend en compte les différentes nécessités citées au départ (centrées sur l'utilisateur et qui puissent être utilisées dans différents contextes avec une bonne précision), les solutions RTLS manquent de transparence vis-à-vis des utilisateurs, alors que les solutions IPS manquent d'une régulation et de précision. Par conséquent, nous avons besoin d'une technologie capable de jouer entre le niveau d'ubiquité souhaité et la précision requise pour une application (ou un contexte). Pour cela, l'information sur la position des utilisateurs doit pouvoir être collectée avec des ressources décentralisées (par exemple au sein des groupes de dispositifs mobiles sur les personnes) et un accès limité aux infrastructures (ou même sans) pour réduire les coûts de déploiement et la consommation d'énergie. Parmi les solutions techniques existantes qui peuvent fournir un tel service de localisation avec ces capacités de suivi, nous pouvons considérer les réseaux corporels sans fil (WBAN) communiquant avec des technologies radio à faible débit de données (LDR) et à basse consommation d'énergie (ULP), tel que les impulsions radio (IR-UWB).

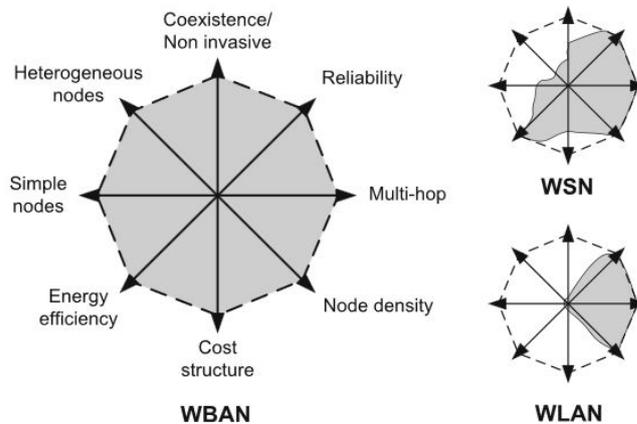


FIGURE 1.1 – Caractéristiques des WBANs comparées avec les WSN [Latré 11]

## 1.2 Les réseaux corporels sans fil (WBAN)

Les réseaux corporels sans fil WBAN [Hanson 09] [Chen 11] [Latré 11] [Ullah 12] [Movassaghi 14] [Cavallari 14] font partie de cette grande famille des réseaux capteurs (en anglais *wireless sensor networks* (WSN)) [Akyildiz 02] [Vieira 03] [Aldeer 13] dédiés à des solutions centrées sur la personne. Ces réseaux sont composés d’un ensemble de dispositifs, portés sur un ou plusieurs corps, capables de mesurer, collecter et traiter différents types d’information physiologique de la personne (par exemple la température, le rythme cardiaque ou sa position). Entre autres, ils ont l’avantage d’être légers et de petite taille, de fonctionner à ultra-faible puissance et d’être portables ou implantables.

### 1.2.1 Spécificités entre WBAN et WSN

Bien que les WBAN partagent de nombreux défis et opportunités avec les WSN, la plupart des protocoles et algorithmes proposés pour les WSN ne sont pas adaptés aux exigences spécifiques des WBAN [Hanson 09] [Ullah 12]. Pour illustrer ce point, voici les principales spécificités des WBAN (Figure 1.1) :

- **Déploiement et densité** : En opposition, dans un WBAN, les nœuds doivent être placés stratégiquement sur ou dans le corps et l’accessibilité physique du nœud doit être la plus facile possible (notamment pour les implants). En outre, les WBANs peuvent être composés par des capteurs hétérogènes selon les contraintes et exigences des applications.
- **Topologie** : Les WBAN ont pour rôle de suivre une information potentiellement vitale pour l’utilisateur, par exemple pour faire une prescription ou un diagnostic. Dans ce cas, l’architecture la plus commune est le mode étoile où les nœuds transfèrent les données vers un coordinateur central. Cependant, pour d’autres applications du type capture de mouvement ou multimédia, il y a une tendance à utiliser des architectures maillées.
- **Communication** : Les WBANs doivent faire face aux pertes provoquées par l’obstruction du corps. En effet, le canal WBAN peut être très instable à cause du masquage et le mouvement du corps. Pour résoudre ce problème, il est envisagé d’implémenter des techniques de coopération et de relayage pour augmenter la

fiabilité, par exemple le relayage opportuniste, pour éviter les longues périodes d'obstruction du canal.

- **Qualité de Service** : La coordination du réseau et la prévention des collisions sont essentiels pour maintenir la performance des réseaux WSN. Cependant, la plupart des WSN a été créée pour travailler à bas débit, alors que les WBAN peuvent demander différents débits à cause de l'hétérogénéité de ses capteurs. De plus, pour une application de type médicale, la fiabilité devient un critère primordial du fait que si un des capteurs tombe en panne, la vie d'une personne pourrait être en jeu. Pour cette raison, les WBAN doivent être capables de contrôler le trafic de données avec des priorités selon l'application et mettre en place des algorithmes pour gérer la perte d'un capteur (quelle qu'en soit la cause : communication, batterie ou panne matérielle).
- **Sécurité et vie privée** : Les WBANs traitent régulièrement des données privées sur l'utilisateur, telles que les données de santé ou sa localisation. Ainsi, il y a un enjeu majeur pour que ces types de données soient cryptées dans les serveurs pour rester privées et confidentielles. En revanche, ces données doivent être également accessibles uniquement par le personnel autorisé, tels que les médecins ou les paramédicaux, avec la création de procédures d'authentification et autorisation.

### 1.2.2 Architecture du WBAN

On distingue trois catégories de position pour les nœuds : à l'intérieur du corps (nœuds in-body), sur le corps (nœuds on-body) ou dans l'infrastructure (nœuds off-body). Ainsi, ces différents nœuds peuvent transmettre à travers quatre types de liens de communication (Figure 1.2) [Chen 11] :

- **à l'intérieur du corps (in-body)** où les nœuds sont des implants qui communiquent la plupart du temps en point à point (par exemple avec le protocole HBC [IEEEStd802.15.6 12]). Dans ce cas, les enjeux principaux sont liés à la propagation physique à travers le corps et le design des dispositifs fiables avec une grande durabilité.
- **autour du corps (on-body)** où les nœuds peuvent être connectés en mode étoile ou maillé sur une même personne. Cependant, la transmission peut être perturbée principalement par la mobilité et les effets de masquage liés au corps. En outre, selon la technique radio utilisée, l'interférence avec d'autres technologies peut aussi être un problème à gérer.
- **entre les corps (body-to-body)** où différents WBANs sont interconnectés à travers des coordinateurs définis par chaque WBAN. Ainsi, ces coordinateurs ont le défi de se coordonner et d'éviter les interférences entre leurs réseaux.
- **hors-corps (off-body)** où les WBANs peuvent se connecter avec différents points d'accès mobiles ou placés dans l'infrastructure. Ceux-ci peuvent être gérés de manière centralisée ou distribuée. De plus, chaque point d'accès doit être capable de gérer la connectivité avec les WBANs, ainsi que la mobilité avec des procédures d'association et de roaming.

Dans ce travail de thèse, nous allons considérer l'utilisation des nœuds on-body et off-body qui communiquent avec les liens on-body, body-to-body et off-body.

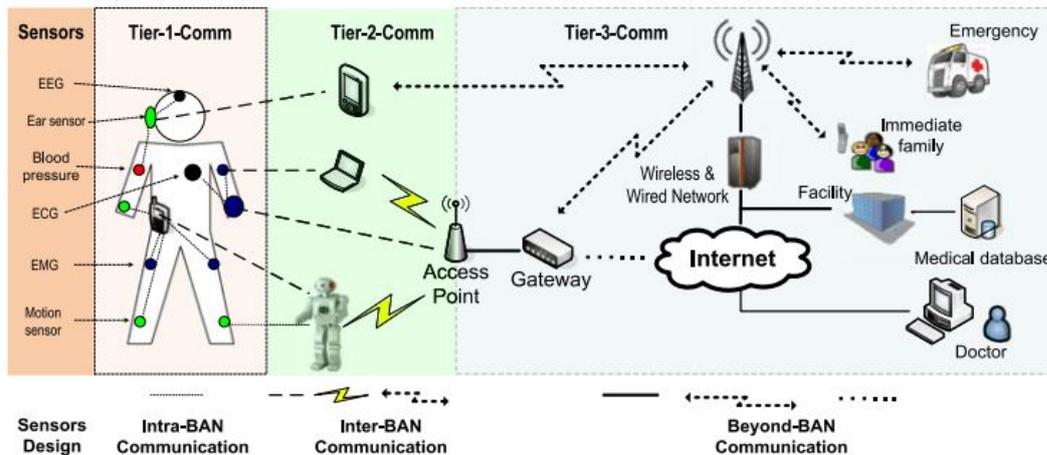


FIGURE 1.2 – Architecture à trois niveaux basée sur un système de communication WBAN [Chen 11]

### 1.2.3 La localisation avec les WBAN

Par rapport à notre contexte de localisation, pour pouvoir réaliser des applications de suivi sur l'activité d'une personne ou d'un groupe, il est nécessaire de concevoir et d'évaluer de nouveaux protocoles de communication adaptés aux besoins spécifiques des WBAN. Pour cela, tout système qui souhaite être utilisé dans une application de localisation avec les WBANs doit prendre en compte les aspects suivants :

- **Résolution et précision.** La résolution représente le niveau de détail sur la position que l'on peut atteindre avec un certain système à une certaine portée, par exemple 1m, 1cm ou 1mm. Alors que la précision (ou dispersion statistique) permet d'évaluer la probabilité d'avoir une résolution donnée. Ainsi le niveau de résolution et précision souhaités sont importants à définir dès le départ, car ce choix peut entraîner un impact sur le coût du système et la limiter les applications possibles.
- **Système de signalisation.** Il s'agit de la technologie de capture qui va être choisie pour une application. Évaluer cet aspect est primordial et doit être basé sur une étude des besoins, tels que la résolution, la portée, le coût et la fiabilité. Parmi les systèmes les plus utilisés (voir Section 2.2.2), nous pouvons trouver des technologies basées sur des signaux radio et des signaux optiques, cependant, chacune a ses avantages et inconvénients selon l'application souhaitée. Par exemple, les systèmes optiques sont connus pour être plus précis mais ils sont très coûteux et ils sont dépendants de la visibilité avec l'objectif. D'autre part, les systèmes radio proposent une précision plus faible mais sont plus robustes aux obstacles et on peut les trouver avec un prix abordable.
- **Grandeur estimée.** Selon le type de signalisation, un système peut localiser un objet à partir de l'estimation de différents paramètres, tels que la distance ou l'angle de direction. L'angle peut être obtenu avec l'estimation de la direction d'arrivée (en anglais *angle of arrival* (AoA)) d'un signal reçu, tandis que l'estimation de la distance est possible avec la détection du temps d'arrivée (en anglais *time of arrival* ToA) ou du niveau de puissance du signal reçu (en anglais *received signal*

*strength* RSS) entre un émetteur et un récepteur. Le niveau de résolution et de précision vont dépendre de la technique d'estimation utilisée (voir Section 2.2.3). Ces données sont mesurés avec des nœuds de référence qui connaissent

- **Algorithmes de localisation.** Une position peut être calculée de plusieurs manières à partir des paramètres estimés entre deux types de nœuds : les nœuds de référence qui connaissent sa position à tout moment et les nœuds cibles qui ne connaissent pas sa position et qui doivent communiquer avec les nœuds de référence pour se localiser. Pour cela, nous pouvons classer les algorithmes d'estimation en deux catégories [Sahinoglu 11] : géométriques et statistiques.

Dans le cas des méthodes géométriques, la position est évaluée à partir de l'intersection linéaire calculée avec les mesures estimées (AoA, ToA ou RSS) avec les nœuds de référence. La méthode plus simple est par la *détection de proximité ou d'une zone* où les nœuds sont localisés avec l'analyse du RSS estimé avec un nœud de référence fixe. Par contre, cette technique est limitée par la portée du nœud de référence et les obstacles qui peuvent gêner l'estimation du RSS. Pour plus de précision, une position peut être calculée avec l'estimation des angles (*angulation*) ou des distances (*latération*). Dans le premier cas, la méthode de *triangulation* utilise les AoA estimés à partir de l'intersection géométrique entre le nœud à localiser et les nœuds de référence. Cependant, l'estimation des angles est très difficile dans le cas du WBAN à cause du shadowing du corps et des environnements à l'intérieur. En effet, les estimations des angles peuvent être affectées par les différents multi-trajets créés par les objets dans l'espace. Dans le cas de la *trilatération* (ou *positionnement sphérique*), les distances sont estimées (avec le ToA ou le RSS) entre le nœud à localiser et au moins trois (resp. quatre) nœuds de référence pour un positionnement à deux (resp. trois) dimensions. Par contre, pour que ces estimations soient fiables, il faut que tous les nœuds soient synchronisés (les références et les cibles). Pour réduire le problème de synchronisation, la *multilatération* (ou *positionnement hyperbolique*) est une technique où l'on calcule la position d'un nœud avec l'intersection des hyperboles centrées sur les nœuds de références. Autrement dit, on calcule la différence entre les distances des différents nœuds de référence et le nœud à localiser. La différence avec le trilatération est que dans la multilatération il suffit que les nœuds de référence soient synchronisés par le même le temps de référence. Ceci permet de compenser les dérives d'horloge avec les nœuds cibles au moment du calcul de sa position. En général, cette première classification de méthodes a l'avantage d'être facile à implémenter et le temps de calcul reste abordable pour les WBAN. Cependant, ces méthodes supposent que les estimations n'ont pas d'erreurs. Dans la pratique, les variations physiques du canal WBAN, liés à l'environnement, la mobilité du corps et les obstructions, peuvent ajouter des erreurs considérables sur l'estimation des positions avec ces algorithmes.

Les estimateurs statistiques ont été créés pour compenser les limitations des méthodes géométriques et pour prendre en compte le bruit qui peut exister dans les mesures estimées. Ainsi, ces techniques modélisent une mesure ( $z_i$ ) tel que :  $z_m = f_m(x, y) + \eta_m, m = 1, \dots, N_m$ , où  $N_m$  représente le nombre de mesures,  $\eta_m$  est le bruit de la  $m$ -ième mesure et  $f_m(x, y)$  représente la valeur réel de la mesure estimée en fonction de la position de la cible. Notez que le nombre de mesures dépend du nombre de nœuds de référence pour chaque nœud cible. Si l'on considère

ce modèle au niveau d'un réseau WBAN, nous pouvons trouver une fonction sur la densité de probabilité du bruit qui peut être connu totalement ou partiellement pour chaque nœud  $i$ . Ainsi, on peut définir le vecteur des paramètres inconnus  $\theta_i = [x_i \ y_i \ z_i \ \lambda^T]^T$  composé par la position inconnue du nœud cible  $(x, y, z)_i$  et les paramètres inconnus de la distribution du bruit ( $\lambda^T$ ) des mesures estimées. Par conséquent, le choix sur la technique d'estimation statistique à utiliser dépendra de l'information disponible sur  $\theta$  préalable au calcul de la position. Dans le cas où nous avons une information préalable sur  $\theta$ , il est possible d'utiliser des approches bayésiennes pour estimer la position (où les positions sont considérées comme des variables aléatoires avec des distributions connues, tel que le filtre de Kalman). Sinon, lorsque les paramètres de  $\theta$  sont complètement inconnus, il faut plutôt utiliser des estimateurs de vraisemblance (où les positions sont traitées comme des paramètres déterministes inconnus) pour trouver les valeurs de  $\theta$  qui maximisent la fonction de vraisemblance (ML).

- **Fusion de données centralisée ou décentralisée.** Cet aspect permet de définir la façon dont les données estimées vont transiter dans le réseau. Dans une approche centralisée, l'information estimée (par exemple le ToA, les distances, etc) est envoyée vers un coordinateur central qui utilise l'algorithme de localisation approprié pour calculer l'ensemble des positions et éventuellement les transmettre aux nœuds après le calcul. L'inconvénient de cette approche est que le calcul dépend d'un seul capteur, le nœud coordinateur qui doit à la fois avoir une bonne autonomie d'énergie et une capacité de calcul importante. De plus, la latence pour recevoir toutes les données nécessaires peut être grande, ce qui peut entraîner des pertes de paquets mais aussi une mauvaise détection du mouvement lorsque les mouvements du corps sont plus rapides que le temps pour calculer les positions. Dans le cas contraire, dans une approche décentralisée, tous les nœuds communiquent entre eux pour déterminer indépendamment leur position. Dans ce cas, la complexité de calcul est distribuée entre les nœuds, ce qui peut réduire le temps de convergence et par conséquent, le délai de calcul des positions. En revanche, lorsque le canal entre les nœuds est très dynamique, les paquets affectés peuvent provoquer des erreurs de calcul sur la position.
- **Localisation à l'intérieur ou à l'extérieur.** Cette classification existe car les caractéristiques de propagation de ces deux environnements sont très différentes. La localisation à l'extérieur est la capacité d'un système pour positionner un objet dans un environnement ouvert. Dans ce cas, il y a plusieurs facteurs qui peuvent influencer la précision, tels que la météo, la densité des bâtiments, ou encore l'alternance entre le jour et la nuit. Alors que la localisation à l'intérieur fait référence au positionnement à l'intérieur des bâtiments ou des zones fermés. Dans ce cas, la précision peut être impacté notamment par le type de bâtiment, le plan et les matériaux de construction.
- **Système de coordonnées absolu ou relatif.** Tout système de localisation calcule les positions par rapport à un repère de coordonnées mobile ou fixe. Ainsi, une localisation absolue permet de situer un objet par rapport à une référence globale, par exemple les coordonnées géographiques du globe terrestre. A l'inverse, une localisation relative permet de se positionner par rapport à une référence locale définie par le réseau, par exemple par rapport au coordinateur du WBAN. Il faut

savoir que la localisation absolue est nécessaire pour avoir une idée de la navigation d'une personne, par contre, il ne sera pas suffisamment fin pour la capture du mouvement d'une personne. Pour cela, la localisation relative est nécessaire pour avoir un détail sur les gestes réalisés.

- **Protocoles coopératifs ou non-coopératifs.** Dans le cas non-coopératif, la localisation des nœuds d'un WBAN se réalise avec des transmissions pair à pair avec les ancres. Cependant, dans ce contexte, le nombre d'ancres est limité et la communication avec les nœuds peut être affectée en fonction de leur emplacement sur le corps. En effet, la forte instabilité du canal radio WBAN (créée par la proximité avec le corps) peut entraîner à de pertes d'information. De plus, ces réseaux sont limités par une faible puissance d'émission nécessaire pour des raisons de durée de la batterie et de protection de la santé liée par rapport au rayonnement. Pour ces raisons, les techniques de coopération [Kramer 06] [Dohler 10] [Gorce 09] [Chen 09] peuvent être d'un grand intérêt pour le cas WBAN et assurer la fiabilité de la communication. Avec cette approche, les nœuds peuvent coopérer entre eux pour calculer leur position, lorsque les ancres ne sont pas atteignables. Il existe trois niveaux principaux de coopération [Zhuang 12]. Dans le premier cas, la coopération entre les nœuds est utilisée pour améliorer la fiabilité du canal sans fil à travers la diversité spatiale [Nosratinia 04] [Laneman 04]. Dans le deuxième cas, la latence du système est améliorée via l'agrégation de ressources partagées par les nœuds coopératifs [Macagnano 07] [Wang 13] [Dong 12b]. Enfin, un troisième niveau de coopération peut être utile pour réaliser la prestation de services à niveau applicatif et distribuer la complexité des calculs de localisation [Song 09] [Hamie 14c]. Dans la littérature, les premières recherches sur la coopération WBAN se sont concentrées sur l'élaboration des stratégies au niveau de la couche physique PHY et la conception des algorithmes de localisation au niveau applicatif. Cependant, sans une modification appropriée des protocoles au niveau des couches intermédiaires (MAC et réseau), le gain de coopération atteint ne va pas être significatif. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser une étude à différents niveaux pour une conception des protocoles coopératifs efficaces, ce qui est un grand défi, surtout dans le contexte WBAN.

Dans cette thèse, nous évaluons tous ces aspects en fonction des scénarios d'études définis au début du projet et que nous allons détailler dans le chapitre 2. En particulier, nous souhaitons explorer les possibilités du positionnement au niveau du corps (localisation relative) pour faire la capture du mouvement, ainsi que la localisation d'une personne ou d'un groupe de personnes sur un plan (localisation absolue) à l'intérieur ou à l'extérieur. Pour cela, il faut considérer une technologie précise et flexible, telle que proposée par les systèmes radio IR-UWB qui permettent de faire l'estimation de distance avec le ToA. En ce qui concerne l'algorithme de localisation, nous allons considérer les estimateurs géométriques (tels que la multilatération) et les estimateurs statistiques (tels que le filtre de Kalman) en considérant une approche de localisation distribuée et décentralisée. Enfin, nous allons étudier les possibilités de la localisation non-coopérative et coopérative pour améliorer la gestion de ressources au niveau de la couche MAC et pour garantir une latence acceptable.

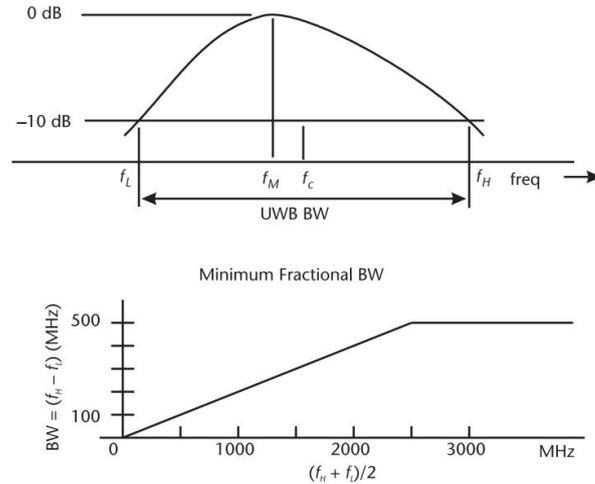


FIGURE 1.3 – Définition du UWB [Bensky 07]

#### 1.2.4 La radio impulsionnelle UWB pour les WBAN

Plusieurs systèmes sans fil à courte portée peuvent être trouvés dans la littérature pour des applications de localisation [Krizman 97] [Chong 06] [Bensky 07]. La plupart de ces systèmes ont été conçus pour fonctionner dans la bande ISM 2,4 GHz qui est disponible pour une utilisation sans licence pratiquement dans toutes les régions du monde. Cependant, même si la plupart de ces systèmes ont été créés avec des algorithmes pour traiter les erreurs liées aux interférences, lorsque la densité des dispositifs dans un scénario dynamique augmente, certaines des fonctionnalités, telles que le débit, la réception d'information ou la qualité du service, deviennent fortement dégradées. Ainsi, une approche relativement nouvelle pour les communications à courte portée en WBAN avec des caractéristiques technologiques uniques est l'utilisation des signaux en ultra-large bande (UWB). Contrairement à d'autres technologies radio, UWB promet d'ajouter des applications et des utilisateurs à la communication à courte portée sans gêner l'utilisation du spectre actuelle. Par la suite, nous allons présenter les principales caractéristiques de la communication avec UWB et une introduction sur la façon dont cela est utilisé pour la localisation dans le contexte WBAN.

- **Définition.** D'après la définition donnée par la Commission fédérale des communications américaine (en anglais *Federal Communication Commission* (FCC)), un signal est considéré comme étant UWB lorsqu'il a une bande passante (absolue) égale ou supérieure à 500 MHz, ou une bande passante fractionnelle (relative) supérieure ou égale à 0,2 (soit 20% de la fréquence centrale) [Bensky 07] [Sahinoglu 11]. La bande passante en UWB est calculée à partir de la bande de fréquence bornée par les points qui délimitent le point où le signal est à 10 dB au dessous de la puissance d'émission maximale (Figure 1.3). Soit  $f_H$  la borne supérieure et  $f_L$  la borne inférieure de fréquence qui délimitent la bande de fréquence à -10 dB, telles que  $B = f_H - f_L$ , la bande de fréquence fractionnelle est définie telle que :

$$B_{frac} = \frac{B}{f_c}$$

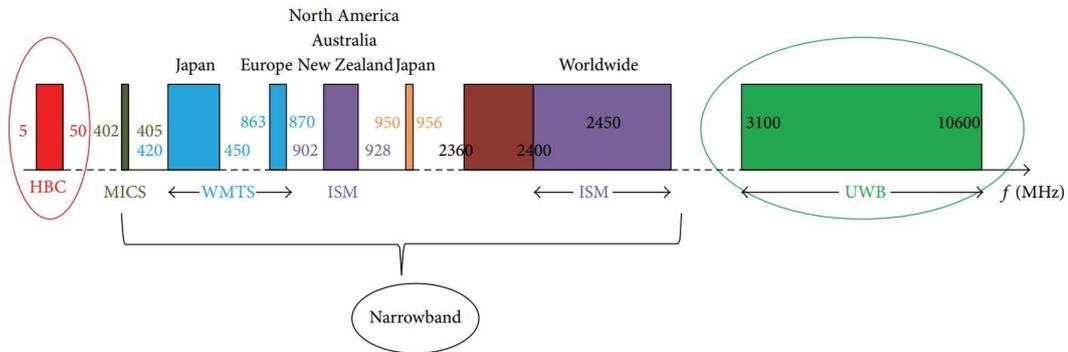


FIGURE 1.4 – Bandes de fréquence disponibles pour les WBANs [Cavallari 14]

où  $f_c$  représente la fréquence centrale donnée par  $f_c = \frac{f_H + f_L}{2}$ . Or, ces conditions peuvent être remplies par plusieurs technologies (telles que l'étalement de spectre à séquence directe (DS-SS) ou avec un multiplexage en OFDM en multibande (MB-OFDM)). La radio impulsionnelle (en anglais *impulse-radio ultra wideband* (IR-UWB)) est composée d'une séquence de pulses de très courte durée avec un rapport cyclique faible (LDC) [Win 98]. Par conséquent, cette technique permet d'avoir une transmission d'impulsions de l'ordre de la nanoseconde, ce qui permet d'atteindre une résolution de l'ordre de quelques centimètres (approprié pour des applications de localisation à l'échelle du corps). En outre, ces impulsions ont l'avantage d'être robustes contre les effets des multi-trajets et d'avoir une grande capacité sur faibles distances. En revanche, elles peuvent interférer avec d'autres systèmes en bande étroite NB et ont besoin d'une synchronisation très fine. Pour ces raisons, l'allocation du spectre pour les signaux UWB est régulée différemment selon les pays.

- **Régulation du spectre.** Aux USA, la régulation donnée par la FCC (2001) permet l'utilisation de l'UWB sans avoir besoin de licences sous réserve d'éviter l'interférence avec d'autres systèmes, par exemple avec la réduction de la densité spectrale de puissance (PSD). Pour les communications à l'intérieur, la PSD doit être limitée à  $-41,3$  dBm/MHz dans la bande de fréquences entre 3,1 et 10,6 GHz. De même, les communications à l'extérieur sont autorisées dans la même bande avec une contrainte plus stricte sur les émissions hors-bande.

En Europe, l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) est responsable de produire les standards pour l'utilisation de l'UWB et le Comité des communications électroniques (ECC) de la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications (CEPT) est en charge de la régulation sur l'allocation de fréquences pour UWB. Ces organismes coopèrent pour réaliser les études qui permettent à la Commission Européenne (EC) de prendre une décision finale. Dans le tableau 1.1, on peut observer les masques d'émission autorisés à partir de 2007 par l'EC. En Europe, nous pouvons noter que les règles d'utilisation UWB sont plus strictes, car il est imposé d'implémenter des techniques d'atténuation pour éviter les interférences avec d'autres technologies hors-bande.

- **Standardisation.** Aujourd'hui, nous pouvons trouver plusieurs standards qui

TABLE 1.1 – Régulation pour les masques d'émission en UWB à travers le monde

	Band	EIRP	Mitigation factor
Europe	3,1-4,8 GHz	-41.3dBm/MHz	LDC <sup>1</sup> or DAA <sup>2</sup> are applied
	2.7 - 3.4 GHz	-70 dBm/MHz	No mitigation
	3.4 - 3.8 GHz	-80 dBm/MHz	No mitigation
	3.4 - 6 GHz	-70 dBm/MHz	No mitigation
	6-8,5 GHz	-41.3dBm/MHz	No mitigation
	8,5-9 GHz	-41.3dBm/MHz	DAA is applied
Japan	3.4 - 4.8 GHz	-41.3dBm/MHz	DAA is applied
	3.4 - 4.2 GHz	-70 dBm/MHz	No mitigation
	4.2 - 4.8 GHz	-41.3dBm/MHz	No mitigation
	4,8 -7,25 GHz	-70 dBm/MHz	No mitigation
Korea	7.25 - 10.25 GHz	-41.3dBm/MHz	No mitigation
	3.1 - 4.8 GHz	-41.3dBm/MHz	LDC or DAA are applied
	7.2 -10.2 GHz	-41.3dBm/MHz	DAA is applied
USA	3.1 -10.6 GHz	-41.3dBm/MHz	No mitigation

<sup>1</sup> Low duty cycle est une technique pour réduire le temps de transmission avec une mise en veille périodique de la radio.

<sup>2</sup> Detect and avoid est un algorithme utilisé dans les radars et qui permet d'écouter le canal avant de transmettre pour éviter les interférence avec autres technologies.

respectent cette régulation. Chaque standard propose une série des protocoles à différents niveaux (couches PHY et MAC principalement), ainsi que la modélisation du canal WBAN selon la couche physique utilisé. En ce qui concerne l'utilisation d'IR-UWB, les standards changent par rapport aux caractéristiques radio pour générer des impulsions, tels que la forme d'impulsion, la modulation et les techniques de transmission et réception. Parmi ces standards, il y en a deux qui peuvent être intéressants pour le cas d'application sur la localisation avec les WBAN : le standard [IEEEStd802.15.4a 07] créé pour les réseaux personnels (en anglais wireless personal area networks (WPAN)) pour des applications à courte portée à bas débit et le standard [IEEEStd802.15.6 12] créé pour remplir les spécificités des WBANs.

### 1.3 Positionnement du problème

Le travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR-CORMORAN qui a pour but de concevoir de nouvelles fonctionnalités de coopération et de localisation dans le contexte WBAN. Ce nouveau contexte exige non seulement une compréhension plus profonde et raffinée des phénomènes physiques impliqués, (par exemple, la modélisation des liens inter-WBAN et intra-WBAN synchronisés avec des modèles de mobilité réalistes avec des variations de canal), mais proposer également des algorithmes et des protocoles innovantes en inter-couche, c'est à dire, prendre en compte tous les niveaux de la couche PHY à la couche application pour la localisation.

#### 1.3.1 Partis pris, motivations et objectifs

L'originalité de ce travail de thèse est que l'on recherche des mécanismes coopératifs inter-couche focalisés sur l'optimisation de l'allocation de ressources pour permettre

d'assurer à la fois la réduction des erreurs d'estimation et la détection des données physiques nécessaires pour la localisation. Pour cela, nous exploitons les avantages du WBAN utilisant une radio UWB impulsionnelle. Dans ce contexte, nous considérons deux scénarios principaux : la capture de mouvement individuelle avec un WBAN et la navigation en groupe avec plusieurs WBANs qui communiquent de manière distribuée. Pour cela, nous considérons que chaque réseau WBAN est limité par un certain nombre de capteurs qui peuvent communiquer pair à pair dans un réseau maillé au sein d'un WBAN ou par consensus avec les autres WBAN.

Dans l'ensemble, l'intérêt applicatif est clair mais porte également un certain nombre de questions de recherche ouvertes :

- La mobilité du corps et le canal sont essentiels dans nos études puisque c'est ce qui permet d'évaluer la performance de nos algorithmes dans un contexte réaliste. En effet, dans les WBAN, c'est la mobilité qui génère les variations du canal (et en particulier le shadowing) et donc, la plupart des pertes dans le réseau. Cependant, la modélisation de la mobilité et du canal reste un problème car il faut qu'ils soient réalistes et qu'il soient couplés et synchronisés mutuellement.
- La conception des mécanismes coopératifs inter-couche est importante pour améliorer la fiabilité du réseau. Dans notre contexte, il faut que ces mécanismes considèrent également les spécificités de l'application (section 1.2.2) et les contraintes au niveau de la radio (en considérant l'environnement d'application et la mobilité du corps), pour réduire les erreurs de localisation et la perte des paquets.
- Enfin, l'évaluation de la performance du réseau est un autre point critique, ainsi que l'approche utilisée. Dans notre contexte, on est limité en termes d'outils si l'on veut prendre en compte la totalité des contraintes du WBAN (au niveau couche physique, communication et application). Une approche mathématique peut devenir très complexe et sans prendre en compte la réalité, alors qu'une approche expérimentale est difficile à implémenter en termes de coût de déploiement et de temps pour l'exploitation des données. C'est pour cela que nous allons utiliser la simulation, car cela permet d'évaluer le réseau avec des outils analytiques et des données expérimentales. Cependant, il y a peu de simulateurs qui prennent en compte toutes les spécificités des WBAN pour toutes couches et en particulier, pour la localisation.

Les points mentionnés ci-dessus sont très liés pour la conception et l'évaluation des algorithmes coopératives. D'une part, les modèles de mobilité et de canal doivent être le plus proches de la réalité et en accord avec nos scénarios d'application. Pour cela, nous allons créer nos propres modèles avec une plateforme de capture optique pour la mobilité et différentes plateformes radio pour le canal. De plus, nous allons considérer quelques modèles statistiques de canal standard pour comparer avec nos données expérimentales. En ce qui concerne aux mécanismes coopératifs, nous allons nous concentrer sur la conception de stratégies d'allocation de ressources au niveau MAC pour réduire les erreurs d'estimation des distances et de la position, ainsi que pour augmenter le nombre des positions estimées. Pour cela, nous allons étudier la problématique de mobilité des nœuds dans le contexte WBAN avec une approche de simulation à événements discrets (que nous allons développer), à partir de nos données expérimentales et des outils analytiques standardisés [Yazdandoost 09] [D'Errico 09]. En termes d'algorithmes de localisation,

nous allons utiliser des modèles proposés dans la littérature [Macagnano 07] [Denis 09] [Hamie 13b] et nous allons évaluer nos mécanismes coopératifs pour garantir le meilleur compromis entre latence et précision de localisation.

### 1.4 Contributions et plan du manuscrit

Ce manuscrit se décompose en 6 chapitres et une conclusion comme suit :

Le chapitre 2 introduit l'état de l'art sur les techniques de localisation avec du WBAN. Nous allons présenter d'abord l'histoire sur l'étude de mouvement, ainsi que les différentes technologies et projets qui traitent la capture de mouvement. Ensuite, nous présenterons une étude réalisée pour identifier les scénarios pour la capture du mouvement et la navigation de groupe, ainsi que les différentes spécificités techniques et contraintes. Avec cette étude, nous allons analyser les avantages et inconvénients des différentes technologies de capture et en particulier, nous allons montrer l'intérêt des techniques radio UWB dans notre contexte. Pour finir, nous détaillons les différents problèmes spécifiques pour la conception des algorithmes coopératifs avec une radio IR-UWB, ainsi que les aspects techniques à considérer au niveau de la couche PHY et MAC pour la localisation avec les WBAN.

Le chapitre 3 va présenter le travail réalisé pour la conception des outils dédiés pour les WBAN. Dans un premier temps, nous allons présenter les différentes plateformes de simulation développées pour le contexte WBAN, ainsi que les modèles de canal et mobilité proposés dans la littérature. Ensuite, nous allons montrer la méthodologie d'expérimentation et post-traitement qui nous a permis de créer notre base de données expérimentales. Puis, nous allons détailler le fonctionnement du co-simulateur dédié WBAN développé pour prendre en compte les spécificités du canal radio (avec PyLayers créé par l'Université de Rennes) et évaluer les performances du réseau et de la localisation (avec WSNNet). En particulier, nous allons détailler les différentes implémentations réalisées pour les modules de la couche PHY, MAC et application.

Le chapitre 4 présentera notre étude pour caractériser l'erreur sur l'estimation de la distance avec nos scénarios de capture de mouvement individuelle et de navigation en groupe, en utilisant nos modèles de mobilité obtenus par mesure. Pour cela, nous analysons l'impact de la mobilité des nœuds et les variations du canal WBAN en utilisant le protocole 3-WR pour l'estimation de distances. En particulier, nous exposons l'erreur générée par la vitesse de nœuds avec une approche par simulation et théorique. Puis, on évalue l'impact du retard de paquets sur l'estimation de distances avec différentes stratégies d'ordonnancement et on introduit son impact pour le positionnement. Dans ce travail, on considère un protocole MAC basé sur le TDMA et on suppose que la trame est synchronisée par paquets balise. Enfin, nous quantifions et comparons l'impact de la mobilité et les variations du canal WBAN en considérant les différents types de liens on-body, body-to-body et off-body.

Le chapitre 5 portera sur la conception et l'analyse de stratégies de gestion de ressources au niveau MAC (avec l'ordonnancement et l'allocation de slots) pour réduire l'erreur de positionnement en utilisant deux algorithmes de localisation : géométrique (basé sur le TDOA) et statistique (basé sur un filtre de Kalman étendu EKF). Dans un premier temps, nous investiguons et évaluons l'impact de la mobilité sur l'estimation de positions (avec TDOA) avec différentes stratégies d'ordonnancement qui réduisent les délais des paquets 3-WR. Pour cela, on considère un scénario de mobilité linéaire et un

autre de Yoga basé sur nos mesures expérimentales. Puis, nous proposons et évaluons l'erreur de positionnement (avec TDOA) en utilisant une nouvelle politique d'allocation de slots en fonction du niveau de mobilité des nœuds. Pour cela, nous considérons deux scénarios de mobilité individuelle, basés sur le yoga et la marche d'un piéton. Nous étendons ensuite cette étude au niveau de l'application avec un filtre de Kalman étendu qui prend l'erreur générée par la mobilité et le canal (caractérisées dans le Chapitre précédent) pour améliorer la prédiction des positions estimées et réduire l'erreur.

Le chapitre 6 a pour objectif de compléter nos études précédentes avec la prise en compte de la perte de paquets générées par le canal WBAN. Pour cela, nous quantifions le taux de succès de positionnement des nœuds en considérant un modèle de mobilité réaliste (marche d'un piéton) et trois modèles de canal : i) un modèle empirique basé sur le standard [Yazdandoost 09], ii) un modèle générée par simulation avec PyLayers et iii) un modèle expérimental basé sur notre base de données de mesures. Ensuite, nous proposons un algorithme coopératif distribué pour augmenter le taux de succès de positionnement avec l'analyse de différents estimateurs de qualité de lien à long et court termes. Ainsi, nous sommes capables d'identifier pour chaque nœud, les ancrs ayant le pire performance pour l'estimation de distance et les nœuds mobiles qui peuvent les remplacer en agissant comme ancrs virtuelles. Pour cela, nous proposons un mécanisme de permutation basé sur la théorie des jeux pour améliorer le positionnement des nœuds ayant le pire taux de positionnement.

Enfin, le chapitre 7 conclura cette thèse avec une synthèse des conclusions tirées sur les contributions présentées, ainsi qu'une ouverture sur les perspectives pour les travaux futures. En particulier, sur la prise en compte d'un modèle sur l'estimation du temps d'arrivée des impulsions et l'implémentation de nos algorithmes coopératives pour augmenter le taux de succès de positionnement.



## 2 Capture du mouvement avec les réseaux corporels

*"In all affairs it's a healthy thing now and then,  
to hang a question mark on the things  
you have long taken for granted"*

— Bertrand Russell, *British philosopher, mathematician,  
logician and historian. Nobel Prize in Literature*

<b>Sommaire du chapitre</b>	
2.1	Introduction . . . . . 18
2.2	Localisation et capture du mouvement . . . . . 18
2.2.1	Historique sur l'étude du mouvement . . . . . 19
2.2.2	Types de technologies pour la capture du mouvement . . . . . 21
2.2.3	Intérêt des WBANs pour la capture du mouvement et la navigation de groupe . . . . . 23
2.2.4	Projets existants sur les WBANs . . . . . 30
2.3	Problèmes spécifiques et aspects techniques . . . . . 34
2.3.1	Principe de localisation avec IR-UWB . . . . . 34
2.3.2	Contraintes à considérer au niveau de la couche PHY . . . . . 37
2.3.3	Challenges au niveau MAC . . . . . 38
2.4	Discussion sur le design d'un protocole inter-couche pour la localisation . 41

### 2.1 Introduction

La capture du mouvement est une technique utilisée par de nombreuses applications, telles que la surveillance, l'interaction homme-machine (IHM), les jeux vidéos, l'analyse sportive ou la médecine [Liu 15]. Cependant chacune de ces applications doit répondre à des contraintes différentes. Ainsi, la technologie la mieux adaptée à une application dépend de la problématique qui va autour.

Pour illustrer ceci, prenons comme exemple une étude sur la personne la plus rapide jusque là : Usain Bolt (1986 - présent). D'abord, on pourrait vouloir mesurer la vitesse maximale que Usain Bolt peut atteindre dans une course de 100m. Nous pouvons répondre à cette question facilement et de manière précise avec une étude biomécanique et le déploiement d'un système non invasif. En conséquence, il faudrait placer quelques dizaines de marqueurs sur Bolt. Avec un système optique de capture à haute vitesse, nous allons être en mesure de localiser les marqueurs en temps réels pendant une course. Ainsi, nous sommes capable de calculer la trajectoire du centre de masse des marqueurs ainsi que sa vitesse instantanée pendant la course.

Si dans une deuxième étude, on s'intéresse à comprendre pourquoi Usain Bolt court plus vite que les autres coureurs de sa catégorie, nous aurons besoin de faire une étude plus complète avec un système capable des comparer les aspects physiologiques et mécaniques de chaque coureur en temps réel. Pour cela, nous pouvons imaginer l'utilisation d'un réseau de capteurs pour mesurer les données physiologiques. Dans ce cas, il faudrait que notre plateforme contienne un modèle du système musculo-squelettique (les muscles, l'os, les ligaments et les articulations) permettant de comprendre les forces agissant sur les muscles de plusieurs coureurs et les comparer avec celles de Bolt. Pour cela, la méthode de la dynamique inverse pourrait être utilisée [Knudson 07]. Cependant, cette dernière approche peut être difficile et très coûteuse à mettre en place. Par conséquent, son application n'est pas réaliste dans d'autres contextes. Par exemple, si l'on veut équiper cette technologie sur un amateur pendant son jogging, il faut maintenant une infrastructure plus abordable.

Ce premier chapitre présente l'état de l'art sur la capture du mouvement avec la radio-localisation et les réseaux corporels. Dans un premier temps, la Section 2.2 fait un descriptif de l'évolution des technologies pour la capture du mouvement et propose une comparaison des fonctionnalités pour différentes applications. Dans ce contexte, nous considérons les éléments importants à considérer dans les WBAN (présentés dans le Chapitre 1), afin d'exploiter les propriétés des ondes radio pour la localisation. Dans la Section 2.3, nous identifions les challenges à relever pour utiliser la technologie IR-UWB, ainsi, que les enjeux pour proposer un protocole de communication multi-couches dédié pour la capture du mouvement. Chacune de ces sections contient une discussion sur les éléments utilisés dans le cadre de cette thèse.

### 2.2 Localisation et capture du mouvement

Vous êtes-vous déjà demandé pourquoi notre corps est capable de faire des mouvements? Pourquoi chaque espèce animale peut réaliser des mouvements aussi différents les uns des autres? Est-ce qu'une autruche et un homme marchent comme un cheval? Qu'est-ce qui fait que certains individus sont plus performants en sport que d'autres? Si ces questions peuvent être qualifiées comme philosophiques, elles ont fait l'objet des plusieurs recherches dans l'histoire [Klette 08]. Néanmoins, avant de pouvoir répondre à

ces questions avec une analyse quantitative du mouvement, la question a d'abord été posée différemment avec une description plus précise et scientifique, comme par exemple : quelles sont les forces qui agissent sur nous et qui produisent ces mouvements ? Pour arriver à cette dernière question, il a fallu des siècles d'observation et d'étude pour comprendre que la nature de ce phénomène était liée aux forces mécaniques. Ainsi, le mouvement n'a pas vraiment été inventé ou découvert, le mouvement a été défini par plusieurs études et théories de plusieurs scientifiques de domaines différents. Chacune de ces théories était complémentaire pour comprendre le phénomène physique du mouvement. Ce qui est étonnant est que l'étude du mouvement a été abordée par la philosophie, la peinture, les arts, la photographie et la science avec différentes contributions, avant même la première étude basée sur la capture des données physiologiques par le calcul et la simulation avec la détection par des images ou des capteurs.

### 2.2.1 Historique sur l'étude du mouvement

**Époque classique.** Les questions sur les causes du mouvement ont été soulevées dans l'esprit de l'homme il y a plus de 25 siècles. Les premiers à définir les bases de la physique ont été les Grecs considérés comme les premiers scientifiques de l'histoire [Aggarwal 11] [XSens 15], par exemple les bases de la géométrie en trois dimensions, indispensables pour la modélisation du corps, ont été également proposées par les Grecs. Une des premières contributions sur l'étude du mouvement se trouve dans "*le Parménide*", un des dialogues écrit par Platon (428 av. J.-C. - 348 av. J.-C.) où il décrit une discussion philosophique entre Socrate et deux philosophes éléatiques (Parménide et Zénon) sur l'unité et pluralité de l'Être. Parménide (515 av. J.-C. - 460 av. J.-C.), considéré comme le père de la métaphysique, soutenait que l'univers est littéralement singulier et immuable, ce qui veut dire que le changement et le mouvement étaient impossibles. Pour défendre cet argument, son disciple Zénon d'Élée (490 av. J.-C. - 430 av. J.-C.) avait créé quatre paradoxes pour rejeter l'idée de la pluralité où le temps et l'espace pourraient être considérés de nature continue et atomique [Aggarwal 11]. En particulier, Zénon questionne la nature du mouvement avec "Le paradoxe de la flèche" comme un phénomène discret ou continu, mais pas les deux en même temps. En effet, si l'on décompose le mouvement dans le temps et l'espace à des instants précis, la flèche peut être considérée en constant repos si l'intervalle entre ces instants est trop petit. Par conséquent, si le temps était composé d'instantanés, le fait que le mouvement ne se fasse pas en un instant particulier signifierait que le mouvement ne se produit pas. Ce passage de l'histoire marque une contribution de caractère philosophique qui aidera à définir les bases du mouvement comme un phénomène physique, abordé par Aristote (384 av. J.-C. - 322 av. J.-C.) dans son ouvrage *la Physique*. Cependant, l'étude de ces paradoxes a été étendue jusqu'au XX siècle par de nombreux scientifiques modernes, tels que Augustin-Louis Cauchy (1789-1857), Karl Weierstrass (1815 - 1897) et Bertrand Russell (1872 - 1970) [Aggarwal 11]. Aujourd'hui, ce paradoxe de la flèche reste intéressant à analyser car il fait allusion à la notion de la vitesse invariante de la mécanique quantique [Brown 99]. Dans le contexte de la relativité restreinte, un objet en mouvement est différent d'un objet au repos. Ainsi, les objets qui se déplacent à des vitesses différentes seront perçus différemment par les observateurs extérieurs et ils auront eux-mêmes des perceptions différentes du monde autour d'eux. Ceci est pertinent dans notre contexte de radio-localisation avec le WBAN, puisque les nœuds sur le corps communiquent avec des signaux qui se propagent à la vitesse de la

lumière. En conséquence, lors de la transmission d'un signal, nous pouvons considérer que le corps est en repos à chaque transmission (voir Chapitre 4). Mais si l'on fait une intégration des positions estimées avec ces signaux à différents instants, nous allons pouvoir reproduire le mouvement du corps.

Une autre contribution majeure des Grecs dans l'étude du mouvement a été apportée par Aristote avec son ouvrage *De Motu Animalium* (*On the Movement of Animals*) où il dessine les corps des animaux comme des systèmes mécaniques. Pour cette raison, Aristote a été considéré comme le premier biomécanicien [Klette 08].

**Époque moderne.** Le questionnement sur le mouvement n'a pas été très révolutionnaire pendant près de 20 siècles jusqu'à la Renaissance en Europe. Leonardo Da Vinci (1452-1519), Galileo Galilei (1564-1642) et Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) ont été les pionniers de la biomécanique moderne [Klette 08]. La contribution de Da Vinci a été double. D'une part, il avait réussi à se familiariser avec l'anatomie du corps à travers ses nombreux dessins, traduits plus tard dans ses peintures. D'autre part, il avait compris des concepts tels que la nature des vecteurs de forces, les frictions et l'accélération d'un objet en chute libre. En combinant ces deux éléments sur l'anatomie et la mécanique, Da Vinci a pu analyser les forces musculaires qui agissent sur les parties du corps avec un détail impressionnant. Un siècle plus tard, Galileo a pu créer des modèles mécaniques basés sur la théorie et l'expérimentation. Ses méthodes analytiques et géométriques ont inspiré Borelli pour les appliquer dans la biologie. Ainsi, il a pu estimer la position du centre de gravité du corps humain et surtout il a été le premier à comprendre comment l'appareil locomoteur produisait le mouvement. Les os servent de leviers et les muscles doivent générer des forces plus importantes pour résister aux forces externes [Knudson 07].

Entre le XVIIe et le début du XIXe siècle, René Descartes (1596-1650), Isaac Newton (1642-1727), Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonhard Euler (1707-1783) et d'autres scientifiques célèbres ont contribué à la création et la formalisation des mathématiques et physiques modernes pour l'étude du mouvement du corps [XSens 15]. C'est ainsi que la science de l'analyse du mouvement du corps est née. Mais il a fallu attendre jusqu'à la fin du XIXe siècle pour avoir de nouveaux outils et mieux comprendre le mouvement.

**Époque contemporaine.** Dans le XIXe, le XXe et le début du XXIe siècle, nous pouvons trouver un nombre important de contributions par des artistes, des chercheurs et des ingénieurs dans le biomédical. Elles ont enrichi la connaissance de la cinématique et cinétique du corps humain. Étienne-Jules Marey (1830 - 1904) a été le premier à filmer les personnes en mouvement [Klette 08] [Kitagawa 08]. Puis, dans un contexte médico-scientifique, il a trouvé une explication au rapport des forces de réaction au sol avec le mouvement. Pour cela, il avait construit une caméra (*le sphygmographe*) capable de capturer des images multiples du même objet à différents instants dans la même photographie. Il faut noter également que cette technique, connue comme la chronophotographie, a été une base pour l'art de la cinématographie. En outre, Eadweard Muybridge (1830 - 1904) a été un photographe connu pour sa technique de dissection du mouvement humain et animal avec son invention "*le zoopraxiscope*". Ces contributions peuvent être observées dans son ouvrage *l'Animal Locomotion* publié en 1887 et qui montrait une séquence d'analyses photographiques sur la marche des animaux et des personnes. C'est ainsi que Marey et son collègue Muybridge sont considérés comme

les premiers à utiliser l'enregistrement des images à haute vitesse pour l'analyse du mouvement.

Une avancée importante dans un contexte non-médical a été la création de *la rotoscopie*, inventée par Max Fleischer (1889-1972) en 1915 [Kitagawa 08]. Cette technique permet de transférer une image de film d'action dans une séquence de film. Pour cela, l'objet filmé est dessiné pour chaque image du film en suivant la séquence des mouvements. Ainsi, il est possible de reproduire la dynamique des mouvements avec naturalité et précision. Au delà de son application dans les séries d'animations (Betty Boop, Popeye et Blanche-Neige et les sept nains), cette technique a été généralisée jusqu'aujourd'hui dans le numérique pour la création des animations par ordinateur (dans les jeux vidéos, la réalité augmentée et l'audiovisuel). Avec l'apparition du numérique, les techniques de capture ont révolutionné. En particulier, de nouveaux systèmes pour la capture du mouvement (MoCap) ont été créés d'abord dans un contexte militaire et médical. Cependant, l'utilisation de la capture du mouvement pour des applications d'intérêt public est relativement récente [Menache 99] [Sturman 15] [Kitagawa 08] [Yang 10] [Liu 15].

### 2.2.2 Types de technologies pour la capture du mouvement

A partir des années 80's, la possibilité de localiser des objets et des personnes à l'intérieur (où la localisation à courte portée et le positionnement précis par satellite était difficile) était devenu un grand challenge et le principal obstacle pour faire du positionnement précis dans tous les environnements. Dans certains domaines tels que le sport, la MoCap permettait de mieux analyser et améliorer la performance des athlètes pour éviter les blessures. Dans l'ingénierie, l'intérêt de la MoCap était dans la modélisation du corps humain pour créer des avatars numériques ou des robots capables de reproduire nos mouvements. Dans les affaires et le commerce, la MoCap devenait importante pour offrir des produits mieux adaptés aux besoins des consommateurs. Par la suite, nous présentons six techniques de base permettant de réaliser la MoCap avec leurs avantages et inconvénients selon leur objectif d'utilisation : optiques, magnétiques, mécaniques, ultrasons, inertiels et radio.

**Systèmes Optiques** Au départ, ce système, basé sur la technique de suivi de poses (pose tracking) [Moeslund 06] [Poppe 07], a été proposé pour des applications médicales, où la localisation est faite avec des caméras très rapides capables d'enregistrer des images avec une vitesse supérieure aux 100 Hz. Ces caméras forment un système de coordonnées avec des positions connues pour détecter un objet embarqué avec une dizaine des marqueurs [Cappozzo 05]. Ainsi deux techniques sont possibles, l'optique-passive où les marqueurs sont composés d'une matière rétro-réfléchissante pour être illuminés [Vicon 15] et l'optique-active où les marqueurs peuvent être des LED connectées au costume de capture [Johansson 73]. Dans les deux cas, la taille des marqueurs joue un rôle important. Des marqueurs très petits vont être utilisés sur le visage et les mains pour la capture précise des gestes. Alors que des marqueurs de plus grande taille vont permettre la capture des grands animaux. Le grand avantage de ces systèmes optiques est leur grande précision et résolution de capture dans différents types de scénarios. Pour cette raison, ce système est très utilisé dans l'industrie de l'animation et du film. Cependant, le coût de l'infrastructure est très cher comparé aux autres systèmes MoCap. En outre, les systèmes optiques ont été également proposés avec les WBANs pour faire

du monitoring des patients dans le milieu hospitalier [Torkestani 12] [Chevalier 15]. Dans ces études, les auteurs considèrent une communication par infrarouge pour récupérer l'information du patient en considérant la mobilité du corps et la position des patients à l'intérieur mais sans parler de la capture de mouvement.

**Systèmes Magnétiques** Cette technique a été inspirée d'une application militaire où les capteurs étaient placés sur le casque du pilote d'avion pour suivre la position et l'orientation de la tête [Blankenbach 10] [Raab 79]. La localisation est réalisée avec des dispositifs placés sur le corps qui mesurent le champ magnétique généré par les sources placées dans des positions connues dans l'espace de capture [O'Brien 00]. Puis, les dispositifs et la source sont connectés vers un contrôleur central (avec des fils) qui récupère les positions estimées à la portée du champ magnétique. Ces champs magnétiques peuvent être générés par des aimants permanents ou des bobines à l'aide de courant alternatif (AC) [Polhemus 15] ou courant direct (DC) [Ascension 15].

**Systèmes Mécaniques** La localisation avec cette solution est réalisée avec un modèle électro-mécanique constitué par un exosquelette fait de tiges d'aluminium léger qui suivent le mouvement des os du porteur. Ainsi, les angles des articulations sont mesurés avec des potentiomètres (résistances variables) dont la tension évolue en fonction de la rotation angulaire des tiges [Kitagawa 08]. Parfois, ce système s'appuie sur des gants et des gyroscopes [Walters 89], par exemple pour la capture de la rotation des hanches. Ils ont l'avantage d'être à bas coût et à faible complexité. Par contre, l'exosquelette peut perturber les mouvements de la personne et biaiser le mouvement observé.

**Systèmes Ultrasons** Une autre technique de positionnement est possible en utilisant des ondes sonores pour calculer la position par multilatération. Pour cela, la distance est évaluée avec l'estimation du temps de vol (ToF) des signaux ultrasonores envoyés par les émetteurs placés sur le corps et reçus par des microphones fixes dans l'environnement [Kiss 04] [Sato 11]. Il faut savoir que cette technique a été proposée pour certains scénarios comme la capture du mouvement avec des émetteurs placés sur le corps [Santagati 14] dans l'eau où le déploiement d'autres systèmes est difficile [Jurdak 07] [Martins 14]. Une autre application à l'intérieur avec ces ondes est l'utilisation des capteurs sismiques placés dans le béton pour détecter les ondes générées par les pas d'une personne [Rim 13].

**Systèmes Inertiels** Cette approche utilise la méthode de la navigation à l'estime (Pedestrian Dead Reckoning PDR) [Fang 05] pour déduire sa position à partir des données estimées précédemment. Cette technique est basée sur l'estimation de la vitesse et l'orientation avec des capteurs inertiels (INS), tels que les accéléromètres, les gyroscopes et les magnétomètres [Morris 73] [Sakaguchi 96] [Tan 05]. L'avantage principal de l'utilisation des INS pour la navigation pédestre est son opérabilité indépendante de toute infrastructure, ce qui réduit considérablement les coûts de déploiement [Aloui 11]. Un exemple d'application est celui proposé par XSens [Roetenberg 09] qui est très utilisé dans l'industrie de l'animation grâce à sa bonne précision et à un coût plus bas que celle des systèmes optiques. Dans la même idée, cette technique a été proposée dans le divertissement pour augmenter le contenu artistique avec un mélange entre technologie et art des spectacles de danse [Andreadis 10]. D'autre part, il est aussi intéressant dans

le contexte médical et les scénarios en cas d'urgence, de mettre des capteurs sur les pieds [Foxlin 05] et le corps, afin de suivre le déplacement d'une personne et d'agir en cas de chute [Bloch 11].

**Systèmes Radio** Pour ces systèmes, la localisation est effectuée avec l'analyse des signaux radio transmis entre des émetteurs mobiles et des ancres ayant une position connue [Bensky 00]. La localisation peut se faire à l'aide de plusieurs caractéristiques du signal radio : 1) la puissance du signal reçu (RSS) où les nœuds mesurent le niveau d'énergie reçue pour estimer la distance avec le nœud émetteur, 2) la direction d'arrivée (AoA) où le nœud cible utilise un réseau d'antennes pour mesurer l'angle de propagation radio avec les nœuds de référence ou c) le temps d'arrivée (ToA) où les distances sont estimées à partir de la mesure du temps mis par le signal pour être transmis d'un nœud à un autre. D'autre part, la conception de ces systèmes a des restrictions sur le coût, la taille et la consommation d'énergie, ce qui empêche d'atteindre une haute précision avec des taux d'horloge rapides, des estimations de RSSI précis, ou des algorithmes de traitement sophistiqués et robustes aux pertes liées aux effets de masque. De plus, il faut noter que ces systèmes sont sensibles aux interférences générées par les multi-trajets ou par d'autres signaux radio utilisant la même bande de fréquence. Dans la littérature, nous pouvons trouver principalement deux classes de plateformes qui exploitent la radio-localisation à courte portée [Bensky 07] : une basée sur des protocoles de couche inférieure (PHY / MAC) qui n'ont pas été conçus au départ spécifiquement pour le positionnement, tels que le Wi-Fi [IEEEStd802.11 07], Bluetooth [IEEEStd802.15.1 05] et ZigBee [IEEEStd802.15.4 06]; et l'autre classe qui est définie avec des protocoles propriétaires créés pour la localisation, par exemple RFID [IEEEStd802.15.4f 12] ou UWB [IEEEStd802.15.4a 07] [IEEEStd802.15.6 12].

Le dernier standard [IEEEStd802.15.6 12] dédié aux WBAN a été créé pour des réseaux autour ou à l'intérieur du corps, et orientés à des fins médicales dans les bandes ISM, UWB et HBC. Dans notre contexte, le suivi de cibles mobiles devient également un grand challenge pour ces systèmes car la plupart des algorithmes utilisés ont été proposés pour les réseaux capteurs (WSN) à mouvement réduit. Pour ces raisons, les technologies basées sur UWB deviennent intéressantes pour traiter les problèmes de consommation d'énergie et de précision de localisation [Sahinoglu 11]. Cependant, selon les différents besoins en termes de portée et précision, une version couplée avec d'autres technologies radios pourrait être envisageable.

Pour résumer ce rapide tour sur les principales technologies de MoCap, il faut retenir que chacune de ces techniques ont ses avantages et inconvénients selon le contexte d'application. Dans cette thèse, nous avons pris en compte des toutes ces possibilités et pour faire un choix, nous avons consulté différents utilisateurs potentiels du domaine. Ainsi, nous avons identifié les principales scénarios d'intérêt et les différentes spécificités techniques à considérer pour la localisation.

### 2.2.3 Intérêt des WBANs pour la capture du mouvement et la navigation de groupe

Au début du projet, nous avons identifié plusieurs domaines d'application (par exemple la navigation de groupe augmentée, l'optimisation des WSN, la télé-médecine, la surveillance assistée ou les systèmes de secours) qui pourraient intéresser les différents

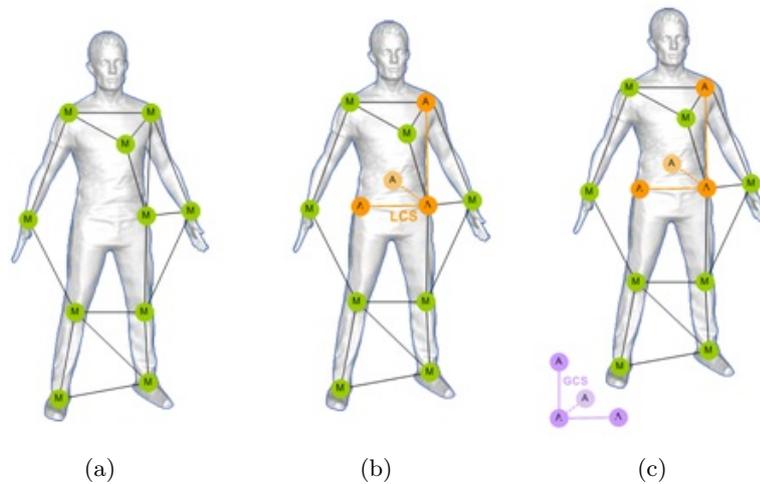


FIGURE 2.1 – Scénarios pour la capture du mouvement individuel à grande échelle (LSIMC)

acteurs industriels ou institutionnels. Toutefois, afin de se concentrer sur les besoins réels des potentiels utilisateurs de la technologie CORMORAN, il a été réalisé et diffusé un questionnaire à diverses entités professionnelles qui étaient partenaires du projet ([CORMORAN-Draft1.1]). Les résultats de cette étude ont montré que les utilisateurs intéressés se classaient en deux groupes : la *capture du mouvement individuel à grande échelle (LSIMC)* et la *navigation de groupe coordonné (CGN)*.

Le groupe intéressé par LSIMC cherche des solutions alternatives pour atteindre la capture du mouvement de manière autonome sur une grande échelle de points sur le corps et avec un accès limité à des éléments placés dans l'infrastructure qui souvent sont coûteux (par exemple les points d'accès fixes, les stations de base ou des ancrs sans fil). Pour cette application, nous avons identifié également trois sous-scénarios :

- a) **Estimation des distances relatives entre les nœuds on-body.** Dans ce premier cas, on considère un réseau de capteurs sans fil mobiles placés sur le corps et avec des positions inconnues. Le seul objectif est d'estimer les distances euclidiennes relatives entre ces nœuds. *Cas d'utilisation* : l'optimisation du WBAN avec un routage des paquets basés sur la distance.
- b) **Positionnement relatif des nœuds on-body.** Dans ce deuxième scénario, nous considérons deux types de nœuds placés sur un corps : les nœuds mobiles simples avec des positions inconnues, et les nœuds ancrs placés sur des endroits fixes sur le corps (par exemple sur le torse ou le dos). Ainsi, les nœuds mobiles doivent estimer leur position relative par rapport aux nœuds ancrs du corps, qui définissent un système cartésien de coordonnées locales (LCS). *Cas d'utilisation* : Détection des gestes ou de la posture pour l'animation (intégration en jeux vidéos ou en réalité augmentée), les alertes d'urgence (surveillance des personnes âgées) et de sauvetage (suivi de l'état des pompiers).
- c) **Positionnement absolu des nœuds on-body.** Ce dernier cas est une extension du scénario précédent, où les nœuds sont localisés par rapport à un système de

coordonnées externe au corps. Ainsi, on identifie un troisième type de nœuds, les points d'accès placés dans des endroits connus et fixes de l'environnement. Ces nœuds ancrés externes définissent un système de coordonnées global GCS qui permettra de détecter l'attitude, la direction et la vitesse du corps. *Cas d'utilisation* : la capture et l'analyse de gestes en temps réel (en sport) et le suivi de l'activité physique à la maison avec des capteurs non-invasifs (pour la rééducation).

Le deuxième groupe intéressé par l'application CGN cherche à obtenir des solutions pour améliorer la disponibilité et la précision sur la navigation de groupe avec des WBANs portés par chaque agent mobile. Ainsi, il a été identifié deux sous-scénarios pour ce groupe :

- a) **Estimation des distances relatives des liens body-to-body d'un groupe.** Dans ce scénario, les personnes portent plusieurs capteurs sur leurs corps pour former un groupe d'utilisateurs mobiles qui doivent se repérer les uns par rapport aux autres. Pour cela, chaque agent estime sa distance relative inter-body avec les autres. En conséquence, la localisation relative du groupe est indépendante et aucun point d'accès externe n'intervient. *Cas d'utilisation* : Localisation des personnes dans les réseaux sociaux nomades, déploiement relatif des agents publiques (pompiers ou soldats), détection de proximité pour éviter les collisions dans les environnements dangereux, confinés et avec peu de lumière (par exemple dans les jeux collectifs ou les parcs naturels).
- b) **Positionnement absolu des agents d'un groupe.** Dans ce dernier scénario, chaque agent doit être capable de récupérer les coordonnées absolues de plusieurs utilisateurs du groupe par rapport au GCS externe. Pour cela, il faut prendre en compte le déploiement de points d'accès fixes et connus dans l'infrastructure. Ainsi, il est possible d'intégrer des mécanismes de coopération pour bénéficier de la diversité spatiale et améliorer la performance de la navigation. *Cas d'utilisation* : Analyse des tendances de l'utilisateur par rapport à sa mobilité et les habitudes dans les centres commerciaux, la navigation augmentée et personnalisée des piétons ou encore le déploiement absolu des agents publics.

Avec le même questionnaire utilisé pour définir ces scénarios, nous avons identifié les besoins et les attentes en terme de réalisation technique. Le Tableau 2.1 résume les spécifications techniques attendues (Section 1.2), tels que le niveau de précision et résolution, le taux de rafraîchissement, les environnements d'exploitation, le type de mobilité et les besoins de calibration acceptables (Section 1.2.3).

En termes de précision pour la localisation (relative) des nœuds sur le corps, nous avons remarqué deux niveaux différents pour l'application LSIMC : a) en haute résolution, il faut garantir un taux de rafraîchissement de 10 ms et une résolution entre 1 cm (pour une précision de 50%) et 5 cm (pour une précision de 90%) et b) en basse résolution, le système doit pouvoir offrir un taux de rafraîchissement de 100 ms et une résolution entre 5 cm (pour une précision de 50%) et 10 cm (pour une précision de 90%). Dans le cas du CGN, la précision au niveau du corps n'est pas très importante mais plutôt la localisation absolue du corps. Pour les deux scénarios, nous avons identifié que la précision pour la localisation absolue doit être inférieure à 1 m avec une tolérance de 3 m et un taux de rafraîchissement d'une seconde.

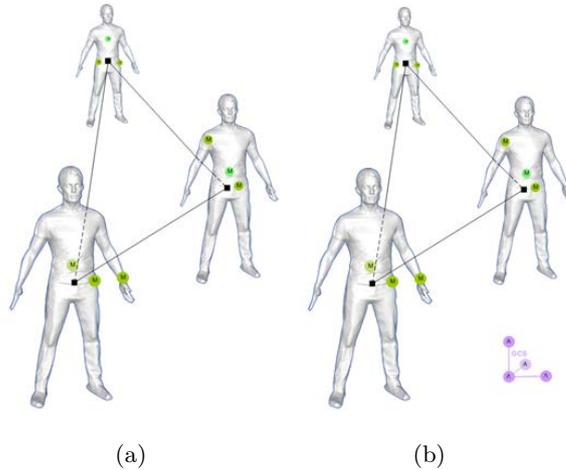


FIGURE 2.2 – Scénarios pour la navigation en groupe coordonné (CGN)

En termes de densité, le nombre de nœuds embarqués sur le corps nécessaire pour le LSIMC (resp. CGN) a été évalué entre 5 à 20 nœuds (resp. 2 à 5 nœuds). De plus, ces nœuds doivent pouvoir être placés dans les zones les plus stables du corps (épaules, torse, dos et anche) pour les deux scénarios pour pouvoir garantir une connectivité fiable avec les ancres de l'infrastructure. Les zones plus dynamiques (pieds, tête, jambes, genoux et poignets) doivent aussi être équipées pour le cas du LSIMC (éventuellement le poignet pour le CGN). En outre, dans le cas du CGN, le système devrait être capable de supporter un groupe de 5 à 10 personnes séparées de 1 à 50 m.

En ce qui concerne la mobilité, dans les deux cas (LSIMC et CGN), notre système doit pouvoir fonctionner dans des conditions où la vitesse du corps est entre 5 à 15 km/h, notamment lors de la marche ou d'une course. De plus, l'environnement d'application souhaité est principalement en indoor et outdoor (resp. indoor) pour le cas du LSIMC (resp. CGN) avec une densité de 5 ancres pour 100  $m^2$  (resp. 1 ancre pour 100  $m^2$ ). Dans ces conditions, l'information doit pouvoir être diffusée et enregistrée au niveau de l'utilisateur pour les deux scénarios. Cependant, dans le cas du LSIMC, cette information devrait être également partagée avec un serveur externe pour analyser la capture du mouvement. Enfin, la calibration doit être la plus simple possible.

Ainsi, par rapport à ces contraintes (Tableau 2.1), nous souhaitons comparer les différentes technologies de signalisation pour faire le choix le plus adapté pour nos scénarios. L'analyse détaillée ci-après est résumée dans le Tableau 2.2.

Dans le cas des systèmes optiques, il est tout à fait possible d'atteindre le haut niveau de résolution cherché. Cependant ils ne permettent pas de fonctionner à l'extérieur et sans points d'accès, comme demandé dans le cas LSIMC car il faut une infrastructure de caméras de base à proximité en visibilité directe de la personne suivie. Dans le cas du scénario CGN, ce système pourrait être intéressant car l'application est envisagée dans un environnement intérieur. Cependant, la visibilité entre l'infrastructure et les marqueurs risque d'être perturbée par les différentes personnes du groupe en constante mobilité. Un autre problème pour ces systèmes est la calibration et le temps de traitement des données de localisation. En effet, ces systèmes ont besoin d'un temps important pour traiter les

## 2.2. Localisation et capture du mouvement

TABLE 2.1 – Récapitulatif des besoins pour les applications LSIMC et CGN

	LSIMC		CGN
	Faible résolution	Haute résolution	
Précision sur la localisation (relative) des noeuds on-body	$\varepsilon < 25$ cm (CDF à 90%) $\varepsilon < 5$ cm (CDF à 50%)	$\varepsilon < 5$ cm (CDF à 90%) $\varepsilon < 1$ cm (CDF à 50%)	N/A
Précision moyenne sur la localisation (absolue) du corps	$\varepsilon < 1$ m, (CDF à 90%) $\varepsilon < 0,3$ m (CDF à 50%)		
Taux de rafraîchissement sur la localisation des noeuds	100 ms	10 ms	1 s
Vitesse maximale	(5 à 15) km/h		
Densité des ancrés	$< 0,05$ ancrés / $m^2$		$< 0,01$ ancrés / $m^2$
Nb de personnes par groupe	N/A		5 à 10
Distances maximum en Inter-body	N/A		{1, 5, 10, 50} m
Nb des noeuds sur le corps	{5, 10, 20}		{2 à 5}
Emplacement des noeuds sur le corps par ordre de préférence	Pied-Tête-Poignée-Torse-Hanche-Jambes-Dos-Epaules-Genoux-Ventre		Epaules-Torse-Dos-Hanche-Poignée
Environnement d'application	Outdoor, Indoor		Indoor
Destination finale de l'information estimée	Serveur, utilisateur		Utilisateur
Pré-calibration	Aucune, précis		Aucune, minimale

données avant qu'ils puissent être exploitables par les utilisateurs finaux. Malgré ces inconvénients, cette technologie peut être un bon instrument de mesure pour calibrer les estimations réalisées par d'autres systèmes de capture. Cette approche a été exploitée pour créer la base de données détaillée dans le Chapitre 3.

Les systèmes magnétiques sont réputés pour avoir un faible coût et une faible complexité d'utilisation, ce qui les rend accessibles pour des applications en temps réel, comme le LSIMC. De plus, ils n'ont pas besoin de visibilité directe entre les capteurs et la source. Ainsi, l'utilisation des champs magnétiques est avantageux pour traverser des murs ou si l'objet à détecter est enfoui profondément sous terre [Gouillon 13]. Cependant, la détection des champs est sensible aux fortes interférences et à la présence de pièces métalliques sur le corps. De plus, les capteurs magnétiques consomment beaucoup d'énergie et leur résolution de capture est plus faible que celle des systèmes optiques [Liu 10].

En ce qui concerne les systèmes ultrasons, le fait que la vitesse du son soit inférieure à la vitesse de la lumière, est un avantage pour le traitement des signaux à ultrasons, car le calcul des distances est moins complexe. En revanche, la précision et le temps de rafraîchissement est plus bas, ce qui fait que les systèmes ultrasons sont souvent couplés avec d'autres systèmes [Vlasic 07]. En outre, ces systèmes peuvent être affectés par l'interférence due aux autres émetteurs d'ultrasons et par les effets d'écho dans l'environnement, ce qui les rendent difficiles à exploiter pour notre scénario LSIMC. Un autre problème pour ce système est la fusion de données, car leurs capteurs sont passifs ou actifs mais jamais les deux en même temps. Par conséquent, la localisation se fait souvent à l'échelle de l'utilisateur et le partage de sa position entre plusieurs personnes

TABLE 2.2 – Comparaison des systèmes de localisation par rapport aux spécifications techniques des scénarios LSIMC et CGN

Systèmes		Optiques	Magnétiques	Ultrason	Mécaniques	Inertiels	Radio NB	Radio UWB
Positionnement absolu		✓	✓	✓		✓	✓	✓
Résolution pos. relative	faible	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	haute	✓						✓
Taux de rafraîchissement	faible	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	haute	✓		✓			✓	✓
Environnement	outdoor					✓	✓	✓
	indoor	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Pré-calibration	aucune						✓	✓
	minimale		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	précise	✓				✓	✓	✓
Distances max. inter-body	<50 m	✓	✓	✓			✓	
	<10 m	✓					✓	✓
	<5 m	✓						✓
Destination finale de l'info	serveur	✓					✓	✓
	utilisateur		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Robustesse	obstacles		✓		✓	✓		
	interférences	✓			✓	✓		✓
Complexité de calcul	faible		✓	✓			✓	
	haute	✓			✓	✓		✓

ou avec un serveur peut s'avérer difficile, notamment à l'extérieur. Pour résoudre ce problème, il pourrait être envisagé d'ajouter plus de capteurs émetteurs, en revanche, cela augmentera la densité de capteurs sur le corps.

Les systèmes mécaniques ont l'avantage d'être autonomes dans le sens où les positions sont calculées par l'exosquelette, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir les données en temps réel. De plus, ils peuvent être utilisés dans des scénarios MoCap en temps réel où la contrainte de visibilité n'est pas toujours respectée et sont non sensibles aux interférences magnétiques et électriques [Gypsy 15] [ShapeWrap 15]. Par contre, pour pouvoir communiquer avec l'infrastructure (par exemple pour calculer le positionnement absolue) ou avec d'autres utilisateurs avec ce système (cas CGN), il faut le combiner avec un système radio. De plus, ce système n'est pas très confortable pour l'utilisateur, ce qui le rend difficile à porter pour les scénarios à l'extérieur et donc, pour le cas LSIMC.

Les systèmes inertiels partagent le critère de l'autonomie pour calculer les positions (nécessaire pour nos deux scénarios). De plus, ce système est suffisamment discret pour être porté à l'extérieur. Par contre, la précision est de l'ordre de quelques centimètres et ces systèmes peuvent perdre en précision au cours du temps ce qui demande des calibrations périodiques. Une approche pour réduire ce problème est d'utiliser la technique du fingerprinting [Yang 15] pour augmenter la précision et le temps de réponse avec des clusters de capteurs déployés dans l'infrastructure. Cependant, cela augmente la densité des ancrs et donc, la complexité pour la fusion de données. Toutefois, il a également besoin d'un système radio pour transmettre les données entre les capteurs (ce

qui augmente la complexité de calcul et le coût du système).

Enfin, la fonctionnalité de localisation sur les systèmes radio repose sur l'analyse des signaux sur plusieurs transmissions point à point entre les capteurs et les ancres sur le corps ou l'infrastructure. Cela permet d'avoir une liberté sur la complexité de l'algorithme de positionnement, soit avec un calcul distribué par les nœuds/utilisateurs coopératifs ou bien un calcul centralisé vers un serveur de façon opportuniste. Il faut noter que le niveau de précision et la portée de transmission sont étroitement liés au type de signal [Gezici 05] (NB ou UWB) et à la technique d'estimation utilisés. Dans le contexte WBAN, la solution AoA est difficile à mettre en œuvre puisque le coût et la complexité des réseaux d'antennes peuvent être considérables pour ce type de réseau. De plus, à l'intérieur, les récepteurs peuvent avoir des problèmes pour estimer correctement les angles d'arrivée en raison de la forte probabilité d'interférence due aux trajets multiples. Dans le cas des techniques basées sur le RSS (généralement avec des signaux NB), l'estimation de la distance dans un WBAN est difficile. Ceci est dû à l'obstruction possible du corps sur les liens, l'orientation instable des antennes et la possibilité d'avoir des multi-trajets à l'intérieur, qui conduisent tous à de fortes variations sur le niveau de puissance du signal reçu (RSSI). Il faut noter que la meilleure limite atteignable (borne de Cramér-Rao (CRLB)) [Gezici 05] [Qi 03] dépend des paramètres du canal et de la distance entre deux nœuds, i.e. la variance sur l'estimation de la distance est proportionnelle à la distance et aux effets de masque (par exemple le shadowing du corps). Ceci est un problème dans notre contexte étant donné qu'il est difficile d'extraire les composantes du shadowing et des évanouissements rapides du signal reçu [Ferrand 11] pour analyser uniquement la composante de l'affaiblissement sur le trajet. De plus, si on observe les propriétés des modèles de canal proposés pour les WBAN [Yazdandoost 09] [Cavallari 14], on peut remarquer que la composante sur l'affaiblissement est modélisée dans la plupart des cas par une distribution normale (pour les fréquences de 2,4-2,5 GHz et 3,1-10,6 GHz). Cela veut dire que même si on est capable d'extraire les composantes du shadowing et des multi-trajets, le RSSI va être toujours affecté par un path loss qui ne dépend pas linéairement de la distance parcourue par le signal reçu. Par conséquent, cela aura un impact pour la localisation précise des nœuds, notamment pour notre scénario LSIMC, où l'on peut atteindre des mouvements très dynamiques du corps dans différents types d'environnement. En revanche, l'approche basée sur ToA permet de calculer la distance à partir de l'estimation du temps de trajet des signaux transmis entre deux nœuds. Dans ce cas, la précision sur la distance estimée est inversement proportionnelle à la largeur de bande occupée par le signal et le rapport signal sur bruit (SNR) [Poor 94] [Gezici 05] [Xiao 10], i.e. la résolution peut être améliorée si on améliore le SNR ou si on augmente la largeur de bande du signal utile. Pour cette raison, le signal IR-UWB est considéré comme un candidat potentiel grâce à sa haute résolution temporelle, et sa grande largeur de bande passante qui permet de réduire les effets des multi-trajets. En effet, IR-UWB (où la bande passante peut être supérieure ou égale à 500 MHz) permet d'avoir une précision centimétrique (or, en théorie une bande passante de l'ordre de 500 MHz permet d'atteindre une résolution de 10 cm à  $-5\text{dB}$  [Hamie 13b]). En pratique, une radio en IR-UWB est limitée à des transmissions d'impulsions à courte portée pour garantir une bonne résolution avec une faible consommation. Pour ces raisons, cette technique est envisageable pour le calcul des distances et positions relatives dans le cas du LSIMC. Par contre, elle va être limitée pour les transmissions à plus grande portée, par exemple

TABLE 2.3 – Tableau de comparaison sur les projets nationaux ayant traité la problématique la localisation avec WBAN et UWB

Projet	Application	Type de lien (x-body)	Aspects de la communication étudiés	Standards	Validation
BANET (2007-2010) [BANET 10]	Médical, Sport monitoring	on-	Topologies étoile/maillé, Modélisation du canal, Design MAC, Coopération PHY/MAC	IEEE 802.15.1 (Bluetooth) IEEE 802.15.4 (Zigbee) IEEE 802.15.4a (UWB)	Théorique Simulation Expérimentale
		body-to-off-	Coexistence	N/A	Théorique
			N/A	N/A	N/A
RUBY (2012-2015) [RUBY 15]	Multimédia	on-	QoS, Design MAC, Conception de la radio	IEEE 802.15.6 (UWB)	Théorique Simulation Expérimentale
		body-to-off-	N/A	N/A	N/A
			N/A	N/A	N/A
BoWi (2012-2015) [BoWi 15]	Environnement intelligent, Détection de posture	on-	Coopération PHY/ MAC, Algorithmes pour la localisation, Consommation d'énergie, Modélisation du canal	IEEE 802.15.4 (Zigbee), Capteurs inertiels, mmWaves (60 GHz)	Théorique Simulation Expérimentale
		body-to-off-	N/A	N/A	N/A
		off-	Coopération PHY / MAC, Consommation d'énergie, Modélisation du canal	IEEE 802.15.4 (Zigbee), mmWaves (60 GHz)	Théorique Simulation Expérimentale

avec d'autres personnes avec un WBAN ou avec des ancres distantes de l'infrastructure (scénario CGN). Dans ce type de cas, il est préférable d'utiliser un schéma hybride ToA/RSS pour une meilleure estimation. Ainsi, l'estimation du RSSI avec une radio NB permettrait d'avoir une plus grande portée avec une précision autour d'un mètre, ce qui le rend intéressant pour notre scénario de navigation pour le positionnement absolu (CGN et LSIMC) ou pour le calcul des distances entre plusieurs utilisateurs (CGN).

Dans cette thèse, nous allons baser nos études sur une radio IR-UWB pour l'estimation de la distance avec le ToA des impulsions. Pour cela, nous supposons que nos nœuds sont à portée les uns des autres et peuvent communiquer entre tous.

### 2.2.4 Projets existants sur les WBANs

*Au niveau national* : nous pouvons trouver trois projets récents proches de notre contexte : un qui traite le cas général des WBANs ("BANET"), un qui explore les possibilités de l'UWB en WBAN pour des applications multimédia ("RUBY") et un qui cherche une technologie IPS avec des WBAN ("BoWi").

Le projet "BANET" (ANR TCOM, 2007 - 2010) [BANET 10] avait pour objectif de créer un premier cadre orienté WBAN avec différents modèles et technologies. En particulier, la principale contribution a été d'étudier les propriétés du canal de propa-

## 2.2. Localisation et capture du mouvement

TABLE 2.4 – Tableau de comparaison sur les projets internationaux ayant traité la problématique la localisation avec WBAN et UWB

Projet	Application	Type de lien (x-body)	Aspects de la communication étudiés	Standards	Validation
WiserBAN (2010-2014) [WiserBAN 14]	Médical	on-	Modélisation du canal, Design MAC, Conception de la radio, Coopération PHY/MAC (on-/in- body)	IEEE 802.15.4 (Zigbee), IEEE 802.15.4a, IEEE 802.15.6 (UWB)	Théorique Simulation Expérimentale
		body-to-	Modélisation du canal, Conception de la radio, Coexistence	IEEE 802.15.4 (Zigbee), IEEE 802.15.4a, IEEE 802.15.6 (UWB)	Théorique Simulation Expérimentale
		off-	Modélisation du canal, Conception de la radio	IEEE 802.15.4 (Zigbee), IEEE 802.15.4a, IEEE 802.15.6 (UWB)	Théorique Simulation Expérimentale
WearABAN (2010-2012) [WearABAN 12]	Réalité augmentée, Rééducation, Interactions IHM	on-	Consommation d'énergie, Conception radio, Algorithmes pour la localisation, Topologie étoile-maillé hybride	868 MHz (isycm CSEM technology), Capteurs inertiels	Simulation Expérimentale
		body-to-	N/A	N/A	N/A
		off-	Fusion de données	IEEE 802.11 (WiFi), Réseau cellulaire, Internet	Expérimentale
WHERE2 (2010-2013) [WHERE2 13]	Smart cities, Environnement intelligent	on-	Algorithmes pour la localisation, Design MAC, Coopération MAC	WiFi, Zigbee, UWB	Théorique Simulation Expérimental
		body-to-	Coopération MAC	Réseau cellulaire	Théorique Simulation
		off-	Conception radio cognitive, Algorithmes pour la localisation, Coopération PHY/MAC	WiFi, LTE	Théorique Simulation Expérimental

gation RF du WBAN (y compris les caractéristiques des antennes) pour proposer des protocoles au niveau des couches PHY et MAC en prenant en compte l'optimisation de la consommation d'énergie et la qualité de service. Il faut noter que ces études ont été réalisées et validées par théorie, simulation et expérimentation en considérant des radio basées sur Zigbee (IEEE 802.15.4) et Bluetooth (IEEE 802.15.1). Cependant, l'étude portant sur UWB (IEEE 802.15.4a) s'est concentrée sur la modélisation du canal par simulation. Par conséquent, les aspects sur l'interférence n'ont pas été traités. En outre, ce projet a également exploré les aspects sur la coexistence entre WBANs et l'évolutivité du réseau par la théorie, ce qui a montré les bénéfices de la coopération en WBAN au niveau PHY et MAC. Parmi les résultats obtenus, il faut citer les campagnes de mesures réalisées dans les bandes 2,4 GHz et UWB, les nouveaux modèles de canal pour montrer l'impact du shadowing du corps, les études sur l'impact du canal en Bluetooth-Low Energy et UWB, ainsi que la réalisation d'expérimentations avec des dispositifs Movea "MotionPod" pour montrer la perte de paquets dans les scénarios de marche et course. Cependant, les aspects de communication off-body et les possibles applications de ces travaux dans le cas de la localisation n'ont pas été traités.

Plus récemment, le but du projet "RUBY" (ANR-11-INFR-0004, 2012 - 2015) [RUBY 15] a proposé d'implémenter un module radio UWB impulsionnelle pour des applications WBAN qui prend en compte les dernières spécifications de standardisation [IEEEStd802.15.6 12]. Ainsi, leur contribution repose principalement sur un démonstrateur qui mixe les principes de réceptions cohérents et non-cohérents (pour laisser un spectre large sur les applications possibles) sans détériorer la complexité et la consommation d'énergie. Cependant, cette étude a considéré uniquement la transmission au niveau on-body pour des scénarios où la qualité de service peut varier en termes de latence, fiabilité et débit, sans prendre en compte les aspects de localisation ou la communication entre plusieurs utilisateurs WBAN.

Le projet "BoWi" (ANR-10-LABX-07-01, 2012 - 2015) [BoWI 15] a été proposé pour faire la conception de nouvelles interfaces interactives pour des environnements intelligents (tels que la maison, les médias, etc). Ces interfaces utilisent la technologie WBAN pour faire l'estimation des gestes et du mouvement du corps avec la prise en compte de la consommation d'énergie. Pour cela, un prototype de base a été créé avec des composantes radio disponibles et des dispositifs de récupération de l'énergie. Ainsi, la localisation a été étudiée par simulation et par expérimentation avec l'exploitation de techniques radio basées sur l'estimation du RSS, combinée avec les systèmes inertiels. Puis, le calcul des positions a été fait de manière distribuée avec des mécanismes coopératifs. Cependant, cette étude s'est concentrée uniquement sur la localisation et la détection de la posture d'une personne par rapport à des ancrs externes et donc, la localisation d'un groupe de personnes n'a pas été traitée. En outre, une architecture d'une radio utilisant des ondes millimétriques (mm-wave) a été proposée pour des applications qui ont besoin du haut débit ( $> 5$  Gbps) et une grande précision. Ainsi, ce travail orienté couche PHY a mené à l'étude de la propagation des ondes mm dans les cas on-body et off-body avec un fantôme expérimental. Cependant, ces expérimentations n'ont pas été testées dans le cas d'un scénario réaliste de localisation.

Enfin, nous pouvons citer également d'autres projets financés par l'ANR qui considèrent la technologie UWB pour différentes applications (par exemple BILBAO, AUBADE, DEMOLOC) mais sans prendre en compte le contexte WBAN.

## 2.2. Localisation et capture du mouvement

---

*Au niveau international* : nous pouvons trouver principalement deux projets dans le contexte général du WBAN ("WiserBAN" et "Wear-a-BAN") et un projet qui étudie les questions de radio-localisation coopérative ("WHERE2").

Le but du projet "Wear-a-BAN" (FP7-ICT-PME-2008-2, 2010 - 2012) [WearABAN 12] était d'étudier et démontrer des technologies à ultra-faible consommation dans le contexte WBAN pour pouvoir créer des interfaces homme-machine (IHM) corporelles applicables dans différents marchés, par exemple les textiles interactifs, les tissus intelligents et la rééducation suivie à distance avec la réalité augmentée. Une des contributions majeures de ce projet est le côté expérimental pour la création de plate-formes textiles avec des systèmes à faible consommation. Dans ce projet, la localisation a été faite avec des capteurs inertiels qui détectaient quatre types de posture (allongé, assis, marche et en repos). Pour cela, la transmission des données a été fait avec une radio propriétaire (isycm du *Centre Suisse d'électronique et de micro-technique*) dans une topologie étoile-maillée hybride. Cependant, ils sont restés concentrés sur le navigation inertielle sans explorer les propriétés de leur technologie radio pour la localisation. En outre, ce projet a montré les capacités de la technologie proposée pour réaliser la fusion de données de manière centralisée avec trois types de réseaux (WiFi, réseaux cellulaires et Internet). Par conséquent, ils n'ont pas considéré le cas d'un réseau distribué pour calculer les positions, nécessaire pour le cas de la navigation de groupe où chaque utilisateur doit se co-localiser avec les autres.

Le projet "WiserBAN" (FP7-ICT-2009-5, 2010 - 2014) [WiserBAN 14] avait pour objectif la création d'un micro-système ultra-miniature et à ultra-faible consommation en RF pour des application WBAN pour la santé et le biomédical. Pour cela, ce projet a contribué notamment dans la miniaturisation d'antennes reconfigurables et la conception de systèmes à ultra-faible puissance pour les chips, le RF et les MEMS à basse fréquence. Ainsi, cela a permis de faire la modélisation du canal on-body, off-body et body-to-body avec des radio NB et UWB. Il faut noter que ces travaux ont été réalisés en collaboration avec le projet CORMORAN pour l'UWB. En outre, ils ont également étudié le design des protocoles de communication on-body et in-body pour assurer la fiabilité de transmission avec une radio NB. Cependant, ils n'ont pas considéré l'étude de ces protocoles pour les transmissions body-to-body ou off-body ni pour des applications de localisation.

Enfin, le projet "WHERE2" (FP7-ICT-2009-4, 2010 - 2013) [WHERE2 13] cherchait à démontrer une technologie qui exploite les techniques de positionnement et communication sans fil pour des applications dépendant de la localisation en utilisant différentes techniques radio (UWB, WiFi, Zigbee et LTE). Une première contribution de ce projet a été la création de modèles de canal statistiques pour le contexte localisation entre nœuds mobiles (liens on-body et off-body). Ainsi, ils ont évalué des systèmes radio mobiles (en NB et UWB) pour démontrer la faisabilité des mécanismes de communication et positionnement coopératifs dans les environnement à l'intérieur, avec des schémas de fusion de données basés sur des mesures radio et inertielles. En outre, ils ont également proposé de nouvelles techniques au niveau de la couche PHY pour améliorer la prédiction de localisation dans les réseaux cellulaires (LTE). Pour cela, ils ont développé des algorithmes de localisation avec plusieurs appareils mobiles pour former des clusters basés sur la géo-localisation. Avec ces résultats, ce projet a permis de créer des techniques radio cognitives basées sur le positionnement pour l'amélioration des fonctionnalités sur la gestion du spectre. Ce dernier projet est probablement celui qui se rapproche le plus de ce travail de thèse.

Cependant, "WHERE2" a été plus focalisé sur un contexte de localisation générale pour des utilisateurs avec des appareils mobiles, donc pas forcément avec l'utilisation des WBAN. En revanche, ce projet permet d'avoir un cadre de base pour avoir des modèles de canal et des algorithmes de localisation à haut niveau qui exploitent les mesures physiques (RSSI et ToA).

Comme nous venons de le voir, la plupart de projets montrent un intérêt pour les problématiques de communication WBAN avec différentes techniques radio. Par contre, l'étude de la localisation n'est toujours pas prise en compte, ni les différents aspects sur les liens de communication WBAN. Ainsi, l'originalité de ce travail de thèse s'inscrit dans la recherche de mécanismes coopératifs inter-couche (PHY-MAC-application). Au niveau de la MAC, nous allons nous focaliser sur l'optimisation de l'allocation de ressources pour permettre d'assurer à la fois une communication robuste et la détection des données physiques nécessaires pour la localisation dans un contexte WBAN. Pour cela, nous allons utiliser une radio UWB impulsionnelle qui exploite l'utilisation de tous les liens on-body, body-to-body et off-body. Par la suite, nous allons présenter les différents paramètres à considérer pour la conception de protocoles coopératifs dédiés à la localisation avec les WBAN.

### 2.3 Problèmes spécifiques et aspects techniques

Un des grands défis pour le design des protocoles cross-layer pour les scénarios LSIMC et CGN se trouve principalement dans la compréhension des différents problèmes au niveau de la radio (PHY) et la couche MAC. En effet, l'estimation de positions peut être gêné par des phénomènes physiques (tels que les variations du canal, la synchronisation des nœuds, et la mobilité des nœuds), mais aussi par une mauvaise allocation de ressources (par exemple l'ordonnancement de paquets, la méthode d'accès au canal utilisée et le délai entre les paquets). Pour mieux situer ces différents problèmes, nous commençons d'abord par rappeler les bases sur la localisation avec des impulsions UWB.

#### 2.3.1 Principe de localisation avec IR-UWB

Comme nous venons de le voir précédemment, le système de radio UWB impulsionnelle [Xiao 10] [Hamie 13c] est un candidat potentiel pour des applications de localisation grâce à la haute résolution temporelle des impulsions. Cela permet une détection précise du temps d'arrivée des impulsions (ToA), pour estimer la distance entre deux nœuds. Ceci est possible avec le principe des protocoles délimiteurs de distance (en anglais *distance-bounding protocols*) [Brands 94], originalement proposés en 1993 comme mécanismes de sécurité pour répondre aux attaques du type "Man-In-The-Middle". Un nœud calcule le temps total de réponse d'un autre nœud, correspondant au temps de transmission aller-retour entre ces nœuds.

Avec ce principe, l'estimation de la distance est possible avec des protocoles (en anglais *n-way ranging protocols*) qui mesurent la distance à partir de l'estimation du temps de vol d'aller-retour (RT-ToF) des  $n$  transmissions avec des impulsions UWB. Le cas classique se fait avec l'échange de deux paquets (2-Way ranging (2-WR)) [Macagnano 07] entre deux nœuds  $i$  et  $j$  (Figure 2.3). Le nœud  $i$  commence par envoyer un paquet de requête  $Q_{ij}$  au temps  $T_1$ . Une fois que ce paquet est reçu par le nœud  $j$  au temps  $T_2$ , ce nœud envoie une première réponse  $R1_{ji}$  au nœud demandeur  $i$  à l'instant  $T_3$ , soit après un délai de réponse défini et connu. Notez que les valeurs de  $T_2$  et  $T_3$  sont transmis dans le

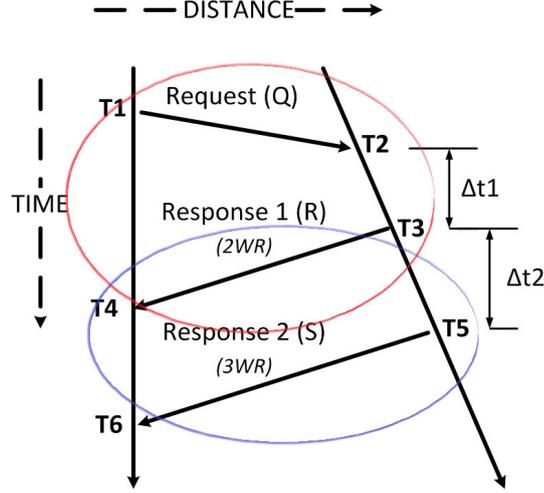


FIGURE 2.3 – Protocoles 2-WR et 3-WR pour la localisation avec IR-UWB

paquet  $R1_{ji}$ . Enfin, le nœud  $i$  finit par recevoir cette réponse à l'instant  $T_4$  et ainsi, il est capable d'estimer la distance  $\hat{d}_{ij}(t)$  de la manière suivante :

$$\hat{d}_{ij}(t) = \frac{1}{2}c [((T_4 - T_1) - (T_3 - T_2))] \quad (2.1)$$

où  $c$  représente la vitesse de transmission des impulsions (i.e.  $c = 3 * 10^8 m/s$ ).

Dans le contexte de localisation dans un WBAN, nous pouvons supposer que le réseau est complètement maillé et que tous les nœuds ( $N_T$ ) peuvent communiquer en pair à pair [Hamie 13c]. De plus, nous pouvons distinguer deux types de nœuds, les *nœuds mobiles* ( $i = 1...N_M$ ) qui souhaitent estimer leur position et les *nœuds ancrés* ( $j = 1...N_A$ ) qui ont la connaissance parfaite de leur position à tout moment, avec  $N_T = N_A + N_M$ . Ainsi, un ensemble de nœuds ancrés compose un système de coordonnées locales (LCS) associé au corps, qui est mobile dans le système de coordonnées globales (GCS). Dans ce repère, les nœuds mobiles vont d'abord réaliser des échanges RT-ToF avec les ancrés pour estimer leur distance instantanée  $d_{ij}(t)$  par rapport à elles. Cependant, pour éviter les problèmes de synchronisation entre les horloges de ces deux types de nœuds, les ancrés peuvent envoyer un deuxième paquet réponse  $R2_{ji}$ , pour réaliser un échange 3-Way ranging (3-WR) à l'instant  $T_5$ . Ainsi, la distance est évaluée à la réception de ce dernier paquet à l'instant  $T_6$  avec l'équation (2.2) :

$$\hat{d}_{ij}(t) = \frac{1}{2}c [((T_4 - T_1) - \Delta t_1) - ((T_6 - T_4) - \Delta t_2)] \quad (2.2)$$

où  $\Delta t_1 = (T_3 - T_2)$  (resp.  $\Delta t_2 = (T_5 - T_3)$ ) correspond au délai entre la réception du paquet requête et la transmission du premier paquet réponse (resp. le délai de transmission entre les deux paquets réponses). Une fois que chaque nœud mobile  $i$  a évalué sa distance avec toutes les ancrés, il est en mesure de calculer sa position relative  $P_i(t)$  à l'instant  $t$ . Or, cette position estimée  $\hat{P}_i$  peut être définie comme une fonction des distances estimées  $\hat{P}_i(t) = f(\hat{d}_{i1}(t), \hat{d}_{i2}(t), \dots, \hat{d}_{iN_A}(t))$ . Par conséquent, cette fonction varie en fonction de l'algorithme de position employé. On peut distinguer des algorithmes classiques (Linear Least Square Error (LLSE), Time Difference of Arrival (TDOA)

[Xiao 10]) ou avec des techniques coopératives statistiques (Maximum Likelihood (ML), Cooperative Constrained (CDWMDS) [Hamie 14c]).

Par exemple, dans le cas de la technique de différence de temps d'arrivée (TDOA) [Xiao 10], la position est déterminée comme l'intersection des hyperboloïdes dans un espace tridimensionnel. À cette fin, chaque nœud  $i$  doit communiquer avec au moins quatre ancres pour une localisation distribuée, tel que défini pour un positionnement à trois dimensions. Ainsi, chaque distance estimée peut être notée  $\hat{d}_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$  pour créer le système d'équations à trois inconnues (i.e. les coordonnées de la position du nœud  $i$ ) suivant :

$$\begin{cases} \hat{d}_{i2} - \hat{d}_{i1} = (x_2 - x_i)^2 + (y_2 - y_i)^2 + (z_2 - z_i)^2 - [(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2 + (z_1 - z_i)^2] \\ \hat{d}_{i3} - \hat{d}_{i2} = (x_3 - x_i)^2 + (y_3 - y_i)^2 + (z_3 - z_i)^2 - [(x_2 - x_i)^2 + (y_2 - y_i)^2 + (z_2 - z_i)^2] \\ \hat{d}_{i4} - \hat{d}_{i3} = (x_4 - x_i)^2 + (y_4 - y_i)^2 + (z_4 - z_i)^2 - [(x_3 - x_i)^2 + (y_3 - y_i)^2 + (z_3 - z_i)^2] \end{cases} \quad (2.3)$$

Ensuite, ce système est résolu par l'approche des moindres carrés linéaires (LLS) [Lee 09] pour estimer la position du nœud ( $\hat{P}_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ ). Ainsi, le système est réduit à une équation linéaire où l'on ajoute une variable intermédiaire (i.e. la fonction de linéarisation) pour estimer la position de la source :

$$\begin{cases} \hat{d}_{i2} - \hat{d}_{i1} = r_{2,1} - 2[x_i \cdot a_{2,1} + y_i \cdot b_{2,1} + z_i \cdot c_{2,1}] \\ \hat{d}_{i3} - \hat{d}_{i2} = r_{3,2} - 2[x_i \cdot a_{3,2} + y_i \cdot b_{3,2} + z_i \cdot c_{3,2}] \\ \hat{d}_{i4} - \hat{d}_{i3} = r_{4,3} - 2[x_i \cdot a_{4,3} + y_i \cdot b_{4,3} + z_i \cdot c_{4,3}] \end{cases} \quad (2.4)$$

où  $r_{k,j}$ ,  $a_{k,j}$ ,  $b_{k,j}$  et  $c_{k,j}$  (avec  $j \neq k$ ) représentent les expressions des variables connues pour la simplification du système avant la linéarisation, tel que :

$$r_{k,j} = (x_k^2 - x_j^2) + (y_k^2 - y_j^2) + (z_k^2 - z_j^2)$$

$$a_{k,j} = x_k - x_j \quad ; \quad b_{k,j} = y_k - y_j \quad ; \quad c_{k,j} = z_k - z_j$$

Ainsi, la forme de la matrice pour l'équation (2.4) peut être écrite comme suit :

$$A \cdot P = b \quad (2.5)$$

$$A = -2 \cdot \begin{bmatrix} a_{2,1} & b_{2,1} & c_{2,1} \\ a_{3,2} & b_{3,2} & c_{3,2} \\ a_{4,3} & b_{4,3} & c_{4,3} \end{bmatrix} \quad ; \quad b = \begin{bmatrix} \hat{d}_{i2} - \hat{d}_{i1} - r_{2,1} \\ \hat{d}_{i3} - \hat{d}_{i2} - r_{3,2} \\ \hat{d}_{i4} - \hat{d}_{i3} - r_{4,3} \end{bmatrix} \quad ; \quad P = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

Si  $A$  est inversible, alors la position pourra être calculée par  $P = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot b$ . Cependant, il faut noter que même cette approche n'est pas optimale, elle permet d'avoir un cadre de base, utile avec d'autres algorithmes, pour comparer les performances de nos stratégies d'ordonnancement dans un premier cas et quantifier le niveau d'erreur de la mobilité sur le calcul de position. Ce qui veut dire que par la suite, nous pouvons également implémenter d'autres algorithmes plus sophistiqués et optimisés, par exemple ceux qui sont proposés dans [Ben Hamida 10] [Hamie 14b]. En outre, l'avantage de cette

approche est que l'on réduit le temps de calcul pour les positions, ce qui est un critère important dans les scénarios réalistes.

Dans cette thèse, nous allons étudier le comportement des protocoles 2-WR et 3-WR pour l'estimation de la distance (Chapitre 4). Ensuite, pour l'estimation des positions, nous allons analyser la précision obtenue avec un algorithme classique (le TDOA) et puis, avec une approche bayésienne (le filtre de kalman étendu) (Chapitre 5).

### 2.3.2 Contraintes à considérer au niveau de la couche PHY

A partir de ce modèle, nous pouvons identifier plusieurs paramètres qui peuvent influencer sur la précision des estimations avec 2-WR et 3-WR [Soganci 11]. Les paramètres principaux sont la synchronisation d'horloge entre les nœuds, le canal WBAN et la mobilité des nœuds.

La synchronisation d'horloge entre les nœuds pour le 2-WR est cruciale pour atteindre une haute résolution sur l'estimation du ToA [Shimizu 03]. Maintenir cette synchronisation augmente généralement la complexité du capteur, soit par la création de composantes électroniques plus robustes, soit par l'utilisation de protocoles de synchronisation qui consomment de l'énergie. Dans la littérature, nous pouvons trouver plusieurs travaux qui traitent la synchronisation d'horloge [Shimizu 03] [Miscopein 07]. [Shimizu 03] étudie sur les performances d'une boucle à verrouillage de phase pour réduire l'effet de la gigue d'horloge. Pour cela, ils quantifient la relation entre la gigue détectée et l'erreur générée sur l'estimation de distance entre un émetteur et un récepteur. Cependant, ils n'ont pas regardé les effets de désynchronisation d'un réseau de plusieurs nœuds. En effet, lorsque le nombre de nœuds augmente, le risque de collision entre les impulsions de différents utilisateurs peut augmenter aussi et donc, ces interférences peuvent affecter l'estimation de distances. Pour éviter ce problème, chaque utilisateur peut utiliser un code temporel différent [Win 98], appelé aussi séquence de saut temporel (en anglais *time-hopping sequence* (THS)). Cette technique ajoute un décalage dans le temps (calculée en fonction du code de chaque utilisateur) à l'instant d'émission de chaque impulsion. Ainsi, chaque émetteur peut être différencié par son code et au niveau du récepteur, il suffit de rechercher le THS du lien qu'il attend. Dans [Miscopein 07], le code à saut temporel est utilisé pour la synchronisation par comparaison des distances estimées entre les impulsions reçues et celles prédites par la connaissance de la séquence TH. Ainsi, la synchronisation est faite lorsque la séquence TH de l'émetteur est identifiée. Dans ce travail de thèse, nous supposons que l'acquisition de synchronisation est toujours faite, par exemple par l'identification de la séquence de saut d'un préambule. De plus, nous supposons que les ancres de référence sont toujours synchronisées et partagent la même horloge. Ainsi, si une désynchronisation se produit entre deux nœuds (un nœud mobile et un nœud de référence), la dérive d'horloge est neutralisée avec le protocole 3-WR [Macagnano 07].

Une autre limitation est due à l'impact du canal sur la détection des impulsions, ce qui peut conduire à des erreurs sur l'estimation de distances et des pertes de paquets. Le niveau de robustesse dépend du type de récepteur employé. Dans la littérature, nous pouvons trouver principalement deux méthodes de détection du ToA des impulsions (par détection de pic maximal ou par détection du premier pic) [Neiryneck 10]. L'approche par détection de pic maximal (en anglais *peak detection*) cherche à estimer la plus forte des composantes du multi-trajet, alors que la détection par premier pic (en anglais *leading edge*

*detection*) va prendre la première composante des multi-trajets qui arrive au niveau du récepteur. Dans un WBAN, la plupart des mesures ToA sont affectées par le NLoS produit par le shadowing du corps et la mobilité des nœuds. Par conséquent, le chemin direct est atténué la plupart du temps et dans ce cas, la première contribution des multi-trajets n'est pas la plus puissante, par contre elle correspond le plus au trajet direct. Pour cette raison, la détection par premier pic renvoie une estimation plus précise sur le ToA de l'impulsion et donc, sur la distance. Cependant, la détection du premier pic du signal demande beaucoup d'efforts (en énergie et complexité) au niveau du récepteur et la précision de la détection va dépendre du mécanisme implémenté. Pour cela, trois types de récepteurs ont été proposés pour l'acquisition du IR-UWB [Miscopain 10] [Di Benedetto 04] : cohérent, non-cohérent et différentiel. Les récepteurs cohérents sont basés sur l'estimation du canal avec la corrélation du signal reçu avec un signal connu (qui peut être le code de saut temporel de synchronisation). Pour cela, ces récepteurs utilisent un filtre de matching ou un récepteur Rake. Ainsi, il est possible de supprimer les composants des multi-trajets pour détecter le premier pic. En revanche, ce récepteur augmente la complexité de calcul et la consommation d'énergie. Les récepteurs différentiels ne dépendent pas d'une impulsion de référence, ils utilisent la séquence des impulsions une après l'autre comme des signaux de référence pour l'impulsion suivante. Ainsi, la complexité de calcul est réduite. Cependant, ces schémas sont sensibles aux délais entre chaque impulsion. En fait, même une petite différence sur le délai peut dégrader la performance du récepteur. C'est pour cela que ces récepteurs sont souvent utilisés lorsque le canal ne varie pas beaucoup, ce n'est pas vérifié dans le cas du WBAN. Enfin, les récepteurs non-cohérents sont basés sur la détection de l'énergie des impulsions reçues avec un filtre passe bas et un intégrateur. Pour cela, la fenêtre temporelle d'intégration doit être réglée à une durée du même ordre de grandeur qu'une impulsion, tout en considérant les variations du canal. Si la durée est trop courte, le premier pic peut rester en dehors de la région de détection. À l'inverse, si elle est choisie trop longue, plus de bruit est collecté et donc, cela peut créer des erreurs d'estimation sur la distance. Il faut noter que le récepteur non-cohérent [Miscopain 10] permet d'avoir une architecture à bas coût et faible complexité, nécessaires dans le contexte WBAN (voir chapitre 3). Dans ce travail de thèse, nous supposons que les capteurs sont capables de détecter le premier pic des impulsions avec un récepteur non cohérent.

Enfin, la plupart des études ont été réalisées pour les scénarios de la localisation dans les WSN où la plupart des nœuds sont quasi-statiques. Dans le contexte WBAN, la mobilité des nœuds dépend de la nature de l'activité humaine et peut avoir un impact sur la capacité du système pour estimer des positions précises. En outre, le canal physique entre les ancres et les nœuds mobiles peut varier énormément d'un instant à un autre à cause de la mobilité, ce qui peut entraîner des erreurs sur l'estimation du ToA [Chapitre 4] et un taux de perte de paquets important [Chapitre 6].

### 2.3.3 Challenges au niveau MAC

Dans tous les réseaux, la gestion du support de communication joue un rôle clé dans la transmission de l'information entre plusieurs utilisateurs. Dans notre contexte, ces utilisateurs peuvent être les nœuds sur le corps ou différents WBANs qui essaient d'estimer leur position. Pour cela, nous transmettons plusieurs paquets pour réaliser une procédure d'estimation de distance (2-WR ou 3-WR). Cependant, avec l'augmentation

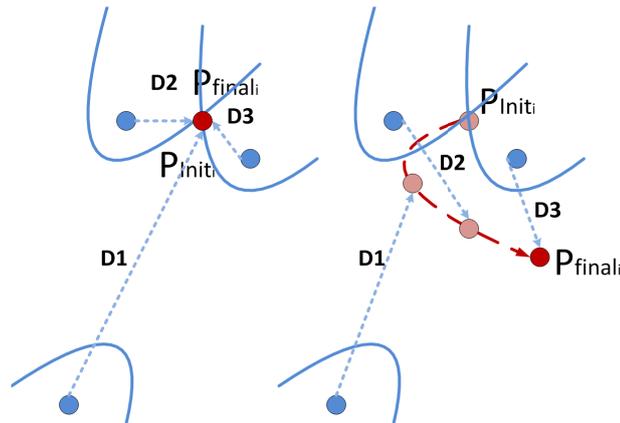


FIGURE 2.4 – Erreur sur l'estimation de la distance avec TDOA entre un nœud statique et un nœud mobile

du nombre de nœuds dans le réseau, des délais supplémentaires sont observés avant que tous les dispositifs arrivent à estimer leur distances et le risque de collisions augmente aussi. Pour ces raisons, la couche MAC est très importante dans les applications de localisation, notamment pour bien gérer l'ordonnancement de différents échanges. Les principaux paramètres pour la conception d'une couche MAC [Dohler 10] à considérer sont les suivants :

**L'accès au canal** permet de définir la façon dont les nœuds vont communiquer entre eux. Le choix de la technique à utiliser dépend des spécificités au niveau de la couche PHY et de l'application (Section 2.2.3). Dans la littérature, nous pouvons trouver plusieurs types de protocoles MAC en fonction du type d'accès, notamment pour les réseaux ad hoc et WSN. Ces protocoles sont classés principalement en trois familles [Dohler 10] [Rahim 12] [Ullah 12] : les mécanismes de contention (basé sur le CSMA), de réservation (basé sur le TDMA) et hybrides (qui fonctionnent avec les deux principes, par exemple le protocole BATMAC [Maman 11]). Cependant, peu de protocoles MAC pour les WBANs prennent en compte les contraintes de localisation et de coopération distribuée. En effet, la plupart se concentrent sur l'efficacité énergétique et la fiabilité avec une approche centralisée pour les applications médicales, notamment pour communiquer avec les implants. Alors que dans la localisation, il est important de considérer une approche distribuée et coopérative pour gérer les cas où la communication avec les ancres n'est pas possible. Par exemple, dans le cas du scénario LSIMC, une approche hybride coopérative basée sur TDMA pourrait être plus adaptée, puisqu'il est nécessaire d'adapter l'allocation de ressources en fonction de l'état du canal, la charge du trafic et les changements de taille de la topologie liés à la perte éventuelle de connectivité. Dans le cas du scénario CGN, il existe peu de travaux qui considèrent le cas multi-WBAN et donc, il pourrait être intéressant d'étudier le comportement des trois types de protocoles avec ou sans coopération en fonction de la couche radio utilisée. Par exemple, un réseau qui communique avec une radio en NB peut travailler avec des protocoles de contention ou de réservation, mais dans le cas d'une radio IR-UWB, les protocoles de réservation sont plus adaptés pour maintenir la synchronisation entre les capteurs, nécessaire pour la localisation.

**L'organisation de la topologie** est importante pour coordonner le temps de

transmission des nœuds. Dans nos scénarios d'étude, nous devons considérer l'ordre d'allocation des slots et faire une quantification de l'impact sur l'estimation des positions. Nous proposons de créer une politique d'allocation en fonction du niveau de mobilité. En parallèle, il est également nécessaire de faire une étude sur la corrélation entre l'état du canal des liens WBAN et le taux de distances/positions estimées pour ensuite créer un algorithme d'organisation coopérative pour réduire les pertes. [Chapitre 5]

**Le contrôle de puissance** est critique dans un WBAN pour avoir plus d'autonomie et pour réduire le niveau d'interférence. Pour cela, les stratégies de coopération peuvent être utiles pour adapter la puissance de transmission en fonction des variations du canal et de la mobilité. De plus, l'analyse de la distribution du niveau de puissance reçue avec différents nœuds peut être également un critère de sélection des ancres utilisées pour se localiser [Chapitre 6].

**La qualité du service** est la fonctionnalité qui permet de mettre en place des politiques de communication adaptées aux spécificités de l'application (Section 2.2.3), par exemple sur le débit, la latence ou le niveau de priorité de transmission. Dans nos deux scénarios, les politiques vont dépendre surtout du comportement du canal et les estimations de distance. Ainsi, cette fonctionnalité peut être en étroite relation avec l'analyse du contrôle de puissance pour déterminer la politique de choix des ancres et l'algorithme de localisation à utiliser en fonction des données collectées [Chapitre 6].

**L'ordonnement des paquets** détermine l'ordre de transmission entre les différents nœuds, et au sein des différents paquets du 3-WR. Cette fonctionnalité est importante pour réduire l'interférence entre les nœuds et le taux de pertes de paquets. Dans notre cas d'étude, il peut être intuitif que le délai entre les différents paquets 3-WR est un paramètre important à prendre en compte pour l'ordonnement, ce qui peut avoir un impact sur l'estimation des distances et de la position en fonction de la vitesse des nœuds [Chapitre 5].

Enfin, un dernier paramètre à considérer est **la mobilité des corps** pour un WBAN. En effet, nous avons vu que la mobilité avait un impact important sur le canal radio mais elle peut également affecter la conception de la couche MAC. Au cours des échanges des protocoles 2-WR ou 3-WR (Section 2.3.1), il faut considérer que les nœuds se déplacent à différentes vitesses. Par conséquent, le nœud détecte un ToF différent à chaque transmission 3-WR, ce qui va entraîner une erreur sur la distance estimée. De plus, nous avons expliqué que chaque transmission avait un délai de réponse ( $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$ ), ce qui veut dire que si ces délais augmentent, l'erreur sera plus grande en fonction de la vitesse des nœuds. De plus, si l'on considère qu'un nœud mobile doit estimer sa distance avec plusieurs ancres à différents instants (Figure 2.4), il est évident qu'une erreur sur chaque distance estimée aura un impact sur le calcul de la position finale. Ce problème est amplifié à large échelle, c'est à dire, avec plusieurs nœuds mobiles qui souhaitent se localiser. L'erreur sur chaque position estimée va augmenter à cause du trafic élevé de paquets qui doivent circuler dans le réseau [Chapitre 4]. Par conséquent, il est nécessaire de trouver de nouvelles stratégies de coopération au niveau de la couche MAC et réseau pour réduire l'erreur de positionnement avec une latence acceptable pour l'application, par exemple avec des techniques de fusion de données (Aggregated and Broadcast [Macagnano 07]), l'ordonnement des paquets 3-WR ou avec une meilleure allocation de slots pour les nœuds mobiles [Chapitre 5].

## 2.4 Discussion sur le design d'un protocole inter-couche pour la localisation

La conception d'un protocole inter-couche PHY/MAC/NWK doit être vue comme une boîte noire indépendante qui offre un service de communication amélioré pour les applications de localisation. Ainsi, dans ce travail de thèse, nous cherchons à créer de nouveaux algorithmes coopératifs de communication qui prennent en compte principalement l'utilisation d'une radio IR-UWB, telle que définie par le standard [IEEEStd802.15.6 12]. Par conséquent, l'approche de ce travail s'inscrit sur le design d'un protocole inter-couche qui considère l'optimisation du système par les aspects du débit effectif du réseau (*throughput*), le retard, le degré d'équité d'accès au canal (*fairness*), le contrôle de pertes de paquets et la précision du positionnement. Il faut noter que la plupart des travaux qui traitent la localisation avec des WBANs se concentrent plus sur les problématiques de la radio (par exemple la modélisation du canal) et sur les performances des algorithmes de localisation, sans prendre en compte ces différents aspects au niveau de la MAC.

Dans la littérature, les travaux précédents qui traitent de la conception de la couche MAC pour la localisation avec des systèmes IR-UWB proposent des stratégies basées sur le protocole TDMA où les performances sont évaluées en termes de précision et de latence. [Macagnano 07] propose un algorithme de localisation coopérative basé sur un principe d'agrégation de données et de transmission des paquets en Broadcast (Aggregated and Broadcast (A&B)) pour réduire le délai des échanges en 3-WR. Les résultats de [Maman 08a] montrent une amélioration sur la gestion des ressources avec un mécanisme de communication par niveaux de priorité. Avec une nouvelle approche, [Garcia 13] présente une étude sur la relation entre le délai au niveau de la MAC et la précision du IR-UWB en fonction du nombre d'ancres et de la portée de communication des nœuds en mobilité. Cependant, tous ces travaux se concentrent sur les applications de localisation pour les WSNs qui ne présentent pas les mêmes problématiques que les WBANs. En particulier, le mouvement n'est pas pris en compte. De plus, ils ne considèrent pas l'impact de l'ordonnancement des paquets ou l'allocation des ressources sur l'estimation des positions. Dans cette optique, [Denis 09] propose un algorithme d'ordonnancement pour une localisation coopérative distribuée avec deux politiques différentes (basés sur le voisinage des nœuds et la qualité des liens) pour réduire le temps de convergence du positionnement, la latence et l'overhead. Cependant, ils considèrent un positionnement en deux dimensions pour un WSN qui à nouveau, n'est pas réaliste pour notre scénario de localisation avec du WBAN.

Ce premier chapitre a permis d'avoir une vision globale sur la problématique autour de la capture du mouvement avec du WBAN. Il a permis de poser les bases sur la localisation avec IR-UWB et la mise en évidence des contraintes liées aux protocoles de communication pour la localisation que nous considérons dans ce travail de thèse. Le chapitre 3 a pour objectif de montrer le travail effectué sur la conception d'une base de données pour avoir un modèle de mobilité et de canal réalistes, ainsi que la création d'un simulateur dédié WBAN pour tester nos différents algorithmes. Ensuite, les chapitres 4 et 5 vont traiter la quantification de l'impact des différents stratégies au niveau de la couche MAC sur l'estimation de distances et sur le calcul des positions. Enfin, le chapitre 6 va être dédié à présenter notre proposition d'un mécanisme coopérative inter-couche pour augmenter le taux de succès des nœuds d'un WBAN.



# 3 Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels

*"The significant problems we face cannot be solved at the same level of thinking we were at when we created them"*

— Albert Einstein, *German physicist.*  
*Nobel Prize in physics*

**Sommaire du chapitre** \_\_\_\_\_

3.1	Introduction . . . . .	44
3.2	Plateformes existantes pour l'étude des BANs . . . . .	44
3.2.1	Mesures et modèles de canal . . . . .	45
3.2.2	Modèles de mobilité . . . . .	47
3.2.3	Simulateurs et outils déterministes pour les WBANs . . . . .	48
3.3	Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe . . . . .	51
3.3.1	Environnement expérimental . . . . .	51
3.3.2	Technologies et plateformes utilisées . . . . .	51
3.3.3	Scénarios d'expérimentation . . . . .	54
3.3.4	Traces de mesures radio/mobilité et post-traitement . . . . .	59
3.3.5	Discussion . . . . .	62
3.4	Co-simulateur dédié aux réseaux corporels . . . . .	63
3.4.1	Adaptations des simulateurs choisis . . . . .	63
3.4.2	Architecture développée pour le co-simulateur . . . . .	73
3.4.3	Synthèse des scénarios d'étude possibles . . . . .	74
3.5	Conclusion et discussion sur l'exploitation de ces outils . . . . .	75

---

### 3.1 Introduction

Dans ce travail de thèse, pour évaluer différents algorithmes de positionnement et proposer des nouveaux protocoles de communication orientés à la localisation basés sur des mesures expérimentales, nous souhaitons utiliser un simulateur dédié WBAN. Dans ce contexte, nous pouvons trouver quelques contributions qui fournissent des résultats basés sur des expérimentations, des simulations ou des analyses analytiques. Les travaux analytiques sont les plus utilisés pour la modélisation des problématiques WBAN. Cependant, lorsqu'il faut considérer plusieurs aspects entre la transmission physique, les protocoles de communication et l'application, ces modèles deviennent très complexes et ne considèrent pas toutes les contraintes de la réalité. En termes d'expérimentation, il y a de plus en plus d'études qui s'intéressent à utiliser des vrais dispositifs pour obtenir des résultats réalistes. Cependant, cette approche est très compliquée à réaliser car cela demande beaucoup d'efforts en termes de coût, de déploiement (par exemple, dans les cas des applications avec plusieurs utilisateurs) et d'exploitation de données et les capacités des capteurs (en termes de stockage et calcul) ne sont pas toujours suffisantes, notamment dans le cas des applications en temps réel. Pour ces raisons, les simulations sont utilisées car cela permet à la fois d'utiliser des modèles analytiques pour évaluer le réseau et d'exploiter des mesures expérimentales pour reproduire un scénario spécifique. Cependant, il y a peu de simulateurs pour étudier les WBANs dans leur totalité, notamment pour prendre en compte les aspects physiques, communication et application en même temps.

Pour traiter cette problématique, ce chapitre est divisé en trois sections. La section 3.2 montre l'état de l'art sur les différents outils développés dans le contexte WBAN et qui prennent en compte la mobilité du corps, le canal de propagation et l'évaluation des protocoles de communication pour la localisation avec des simulateurs dédiés. La section 3.3 présente la description de la campagne de mesures avec les différentes plateformes radio utilisées, les scénarios d'expérimentation, ainsi qu'une discussion sur les différents problèmes liés à l'exploitation de ces mesures, en particulier la synchronisation des mesures de la mobilité et du canal. Pour cela, nous allons montrer quelques exemples des mesures obtenues pour différents liens on-body et off-body. Enfin, la section 3.4 a pour objectif de montrer le travail effectué pour chaque simulateur (PyLayers et WSNET) pour évaluer nos différents protocoles avec les traces expérimentales, ainsi que l'architecture proposée pour l'interfaçage de ces deux simulateurs.

### 3.2 Plateformes existantes pour l'étude des BANs

Dans la littérature, la plupart des travaux qui traitent la localisation avec les WBAN en utilisant des mesures expérimentales, sont réalisés avec des équipements très coûteux soit pour modéliser le canal [Rosini 12a] [Hamie 13c] [Lauzier 13] [Cotton 14b] ou soit pour valider la performance des algorithmes de localisation [Mekonnen 10a] [Shaban 10] [Hamie 13a]. En effet, ceux qui se concentrent sur la modélisation du canal souhaitent caractériser principalement le ToA des impulsions [Hamie 13c] pour l'estimation des distances ou/et la connectivité de tous les liens pour la communication [Lauzier 13]. D'autres exploitent ces mesures avec des modèles synthétiques pour évaluer les algorithmes de localisation par simulation sans considérer la totalité des problèmes pratiques [Hamie 13a], tels que les variations du canal et de la mobilité. Cependant, nous avons identifié un seul travail qui considère l'utilisation directe des dispositifs réels pour évaluer la performance de localisation de nœuds dans des scénarios réalistes et en considérant les

effets du canal liés à la mobilité du corps [Hamie 14a].

### 3.2.1 Mesures et modèles de canal

Les études sur la propagation d'une onde radio à proximité du corps sont relativement récentes [Cotton 14a]. Les premiers modèles statiques ont été proposés entre 2002 et 2003 [Hall 02] [Zasowski 03] pour caractériser les effets du corps sur la variation du canal, en particulier pour modéliser le pathloss, le shadowing et les retards de propagation. D'autres modèles statiques plus récents ont été proposés pour montrer l'influence de la forme du corps [Takizawa 09] [Lu 11]. Dans ces travaux, les auteurs ont défini 3 catégories de corps : maigre, normal et gros. Ainsi, ils ont observé par mesure que l'affaiblissement de propagation et la dispersion des retards sont proportionnels à la corpulence d'une personne. En outre, [Hirose 12] a complété le modèle statique avec les effets de l'environnement. En particulier, ils ont étudié la puissance des retards (power delay profile (PDP)) dans les cas LoS et NLoS avec 5 environnements différents en fonction du volume de la salle. Ainsi, ils ont montré que les multi trajets du signal arrivaient par clusters. Ceux qui arrivent avec un délai inférieur à 4ns (pour les cas LoS et NLoS), correspondent aux propagations autour du corps et peuvent se modéliser par une loi d'affaiblissement de puissance qui dépend du périmètre du corps parcouru. Alors que les retards des multi trajets supérieurs à 4 ns, dépendent du volume de la salle d'expérimentation et peuvent être modélisés avec un modèle Saleh-Valenzuela, tel que défini par le standard [IEEEStd802.15.4a 07]. Enfin, les auteurs de [Roblin 11] ont étudié les effets du scénario et de l'environnement pour modéliser le canal des liens on-body et off-body. Dans cette étude, les auteurs ont analysé le PDP en fonction de différentes postures. Ainsi, ils ont montré que l'affaiblissement des multi-trajets dépend du type de lien et de la posture réalisée, alors que les délais dépendent de l'environnement. Ce dernier travail est très important car il montre la instabilité du canal WBAN. En effet, les facteurs importants pour la modélisation du canal sont l'état de mobilité d'une personne (marche, course, repos, etc) et le type de lien qui dépend principalement par les obstructions du corps. Par conséquent, les modèles statiques ne peuvent pas être utilisés pour une validation des algorithmes de localisation, car ils ne représentent pas la réalité d'un scénario donné où le canal peut varier dans le temps.

Ainsi, des modèles plus dynamiques ont été proposés pour montrer les variations du canal. Cependant, la mise en œuvre d'une campagne de mesures pour obtenir les variations du canal est très difficile à réaliser, notamment si l'on veut prendre en compte la mobilité du corps de manière précise et synchronisée. De plus, les affaiblissements des liens sont assez forts (de l'ordre 70-80 dB) principalement à cause du shadowing du corps. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des plateformes de mesures qui soient capables de faire une acquisition du signal très fine. Les premiers modèles dynamiques ont été faits par des mesures dans le domaine fréquentiel avec un analyseur de réseau vectoriel (VNA) [Nechayev 05] [Fort 06] [Hao 06] [Ghannoum 06]. Les travaux dans [Fort 06] ont été réalisés avec des mesures quasi-statiques dans un environnement contrôlé (à l'intérieur d'un bureau avec deux capteurs sur le bras (récepteur) et le torse (émetteur sur trois positions différentes) connectés par câble au VGA). Cette étude a montré que les fluctuations du pathloss des signaux IR-UWB (à 3.1 GHz) peuvent être modélisés par une distribution log-normale autour de la valeur moyenne. Dans le même esprit, d'autres mesures quasi-statiques ont été faites en NB à 2.45 GHz pour montrer les effets de la

### Chapitre 3. Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels

---

posture du corps [Nechayev 05] [Hao 06] dans une chambre anéchoïque. Dans ces études, les auteurs ont considéré un émetteur placé sur une ceinture au niveau du ventre et treize récepteurs autour du corps (aux pieds, aux bras, au dos et à la tête) connectés au VGA. Ainsi, ils ont montré que les mouvements du corps affectent la réception du signal de manière aléatoire en suivant une distribution log-normale. Cependant, dans tous ces travaux [Fort 06] [Nechayev 05] [Hao 06], les composants du shadowing et multi trajets étaient soit confondus par un seul et même fading, soit non pris en compte dans les modèles proposés.

Pour répondre à ces questions, [Cotton 09a] [Scanlon 08] ont réalisé des mesures avec des capteurs capables de stocker les données acquises sans les contraintes des fils du VGA (qui peuvent introduire des erreurs parasites). Pour cela, ils ont étudié deux scénarios de mobilité en trois environnements différents (chambre anéchoïque, à l'intérieur d'un bâtiment et à l'extérieur) : un statique où la personne restait sans bouger et un dynamique où la personne bougeait avec des mouvements périodiques. Pour les deux cas, ils ont calculé les statistiques d'auto-corrélation du canal. Ainsi, ils ont montré que dans le cas statique, la stabilité du canal était indépendante de l'environnement et la respiration de la personne était le facteur qui générait des variations (avec une périodicité de 0.5 Hz). Dans le cas dynamique, ils ont trouvé que lorsque la personne est dans un environnement avec peu de multi-trajets (chambre anéchoïque ou à l'extérieur), la stabilité du canal dépend directement des mouvements du corps (avec une périodicité de 0.8 Hz). Alors que dans un environnement à forts multi-trajets (à l'intérieur), ils ont observé que les évanouissements ont un impact plus important sur le canal. De plus, les coefficients de corrélation sont plus faibles lorsque la personne se déplace. Avec ces résultats, ils ont observé que le fading (lent et rapide) suivait une distribution de type Nakagami et Rice. Cependant, ces mesures n'ont pas été faites pour tous les liens on-body en full mesh et les effets du shadowing du corps et des multi-trajets étaient inclus dans le même modèle.

D'autres modèles dynamiques ont été également proposés par le groupe du IEEE 802.15.6 [Yazdandoost 09]. Dans ce même groupe, un travail important a été réalisé par NICTA [Miniutti 08] dans les bandes ISM (820MHz et 2.36GHz). Dans cette étude, ils montrent la nécessité d'avoir différentes distributions pour chaque scénario de mobilité étudié. De plus, ils ont observé que la caractérisation du fading était dépendante de la fréquence et du mouvement. Cependant, ce travail a été réalisé pour une topologie en étoile et les paramètres de stabilité des différents liens on-body n'ont pas été traités de manière approfondie.

Plus récemment, le CEA a réalisé des mesures de canal en temps réel pour proposer des modèles dynamiques [D'Errico 09] [D'Errico 10b] [D'Errico 10a] [Liu 11b] [Rosini 12a] [Rosini 12b] [Pasquero 14] qui puissent être exploités pour la conception de protocoles coopératives dédiés aux WBAN [Hamida 11] [Hamie 13b]. En particulier, ils se sont intéressés à l'observation des corrélations entre les variations du canal et la mobilité pour créer des modèles qui ne dépendent pas uniquement du path loss. Dans [D'Errico 09] [D'Errico 10b] [Liu 11b], ils proposent de modéliser le composant du signal reçu lié au shadowing du corps. Pour cela, ils ont mesurés le canal de différents liens caractérisés par des zones d'obstruction différents (torse, jambes, bras et tête) toutes les 200ms. Ainsi, le shadowing a été modélisé par une distribution log-normale. De plus, ils ont montré que le shadowing varie en fonction du mouvement et du corps de la personne.

Enfin, les travaux qui modélisent les propriétés du canal des liens off-body et body-

to-body est encore très pauvre. Nous pouvons trouver quelques modèles statiques mais très peu de modèles dynamiques [Cotton 14a]. Les modèles dynamiques plus récents [Rosini 12a] [Rosini 12b] s'intéressent à la modélisation du gain du canal et les composants du shadowing et des multi-trajets. Dans ces études, le shadowing est modélisé par une distribution normale et ils montrent qu'il dépend principalement de l'orientation du corps, les placements des nœuds et le type d'antenne. Dans le cas des multi trajets, la composante est modélisée par une distribution Nakagami et dépend principalement des réflexions entre les corps et le type d'environnement (l'intérieur étant l'endroit où la contribution des évanouissements est plus fort sur le canal).

Dans ce travail de thèse, nous souhaitons exploiter les modèles de canal dynamiques pour pouvoir tester nos algorithmes et protocoles de localisation en temps réel. Pour comparer analytiquement nos résultats calculés avec d'autres modèles de canal obtenus soit par des outils déterministes [Amiot 13] ou soit par des plateformes expérimentales [Lauzier 13], nous allons utiliser quelques modèles de base :

- le modèle IEEE 802.15.6 IR-UWB tel que défini par le standard [Yazdandoost 09].
- pour la modélisation des erreurs sur l'estimation du ToA, nous allons implémenter les modèles proposés par [D'Errico 09] [Hamie 13c] selon le type de lien à étudier.
- la même plateforme expérimentale utilisée dans [Lauzier 13] pour obtenir un modèle de canal dynamique avec différents scénarios représentant le cas LSIMC et CGN.

### 3.2.2 Modèles de mobilité

Les modèles de mobilité sont très importants pour l'évaluation des applications mobiles, notamment dans le contexte des réseaux ad hoc ou WBAN. Dans la littérature, plusieurs modèles ont été proposés pour simuler le mouvement des utilisateurs avec des contraintes physiques, par exemple les obstacles ou la vitesse. Dans notre contexte, nous souhaitons avoir un modèle de mobilité qui prend en compte trois facteurs ayant un impact sur la mobilité d'une personne [Musolesi 09] : le facteur social (par exemple la mobilité par groupes), le facteur environnement (par exemple la mobilité à l'intérieur ou à l'extérieur) et le facteur biomécanique (par exemple la mobilité du corps en fonction d'une activité donnée).

En ce qui concerne les modèles de mobilité sociale (SMM), plusieurs études ont été réalisées dans les dernières années [Yang 10] soit pour créer des outils de simulation déterministes [Fischer 10] (pour créer des traces de mobilité en fonction d'un contexte) ou soit pour modéliser le comportement des réseaux mobiles [Xia 15] [Batabyal 15] (pour l'étude des protocoles). Dans ces modèles, la théorie de graphes est un outil indispensable [Fortunato 10]. En particulier, pour la détection des communautés [Fortunato 10] (en anglais *community based models*) ou pour l'analyse du comportement sociologique d'un groupe [Zhao 10] (en anglais *sociological behavior based models*). Ainsi, il est possible d'étudier les tendances de création des groupes en fonction des paramètres prédéfinis, tels que les variations de vitesse des personnes, le temps d'inter contact entre individus et les niveaux d'attraction ou répulsion entre deux personnes suivant différents critères (objectifs communs, localisation géographique, etc). Pour ces modèles, l'exploitation de traces de mobilité réalistes est souvent nécessaire [Nardis 10] [Zhao 10] pour valider les traces produites avec un modèle. Bien que ces modèles permettent d'avoir une vision macro de la mobilité d'un groupe, ils ne donnent pas de détail sur la biomécanique des individus et ne sont pas toujours liés à un environnement physique. De plus, ils sont

## Chapitre 3. Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels

---

souvent basés sur des hypothèses peu réalistes qui ne peuvent pas s'appliquer de manière générale, par exemple, les modèles basés sur le comportement sociologique supposent que les personnes peuvent rester uniquement au sein d'un réseau ou d'un groupe et donc, les spécificités de communauté ne sont pas considérés (niveaux d'attraction ou répulsion).

Un autre facteur important pour notre contexte de localisation est l'environnement physique. En effet, les différentes contraintes d'espaces (comme les obstacles physiques) peuvent avoir une influence sur la mobilité d'une personne, mais aussi sur le canal de propagation. Par conséquent, il est indispensable de l'intégrer dans le modèle considéré. Dans ce sens, [Ren 06] propose plusieurs modèles de mobilité pour le contexte WBAN. Ce travail a été réalisé avec différents scénarios en utilisant un modèle de mobilité vectoriel pour le mouvement du corps et un modèle de groupes par points de référence pour la mobilité des personnes. Ainsi, il est possible d'associer un système de coordonnées globales défini par l'environnement au modèle de groupes et puis un système de coordonnées relatives associé au point de référence du corps pour le mouvement biomécanique. Cependant, ce modèle n'a pas été synchronisé avec des modèles de canal. En outre, l'environnement est également un paramètre très utilisé dans les outils de simulation déterministes pour contraindre la mobilité des personnes [Cotton 09b] [Cotton 10]. C'est pour cela que ce facteur va être également considéré lors de la conception du simulateur dédié WBAN.

La modélisation biomécanique du corps est un paramètre clé pour ce travail de thèse. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'étude du mouvement est un sujet très investigué, notamment dans le domaine de la réalité virtuelle et de la robotique [Kallmann 01] [Boulic ]. Dans ces modèles, plusieurs paramètres peuvent être modélisés, par exemple la démarche d'une personne, les forces agissant sur les muscles, entre autres. Dans notre contexte, [Shaban 10] a proposé un système basé sur le IR-UWB capable d'analyser la démarche de manière très précise. Ce travail peut être vu comme un cas de capture de mouvement à l'échelle du corps avec des antennes radio. Cependant, il se concentre uniquement sur le problème de la distance et il ne considère pas l'évaluation de protocoles de communication ni la capture du mouvement à large échelle. D'autre part, les systèmes optiques [Vicon 15] sont souvent utilisés pour la création des modèles biomécaniques grâce à leur haute résolution en utilisant le format [C3D ]. Pour cette raison nous allons considérer ces systèmes avec notre plateforme expérimentale pour la création conjointe des modèles de mobilité et du canal.

### 3.2.3 Simulateurs et outils déterministes pour les WBANs

En ce qui concerne les WBANs, la nécessité d'avoir des simulateurs de plus en plus réalistes a augmenté dans les dernières années. En effet, les WBANs sont de plus en plus utilisés dans des domaines critiques où la fiabilité est très importante. Par exemple, dans le domaine de la santé, nous avons besoin de créer de nouveaux algorithmes pour l'analyse ou la collecte des données médicales. Or, ces algorithmes doivent être évalués au niveau du réseau pour mesurer l'impact de la communication sur l'application finale. Pour cela, nous avons besoin de nouveaux outils de simulation qui prennent en compte la totalité du problème. Mais, dans la littérature, nous pouvons trouver soit des simulateurs utilisés pour mesurer les performances du réseau soit des simulateurs qui considèrent l'ensemble des problématiques de la radio. Cependant, l'interfaçage entre ces deux types de simulateurs se fait rarement pour le WBAN.

### 3.2. Plateformes existantes pour l'étude des BANs

---

Les simulateurs dédiés aux aspects physiques se concentrent principalement sur la modélisation du canal (pathloss, shadowing, multi trajets, interférences) et l'abstraction de la radio (antennes, modulation, architectures pour la réception et l'émission), sans évaluer la performance au niveau réseau. [Heaney 10] propose un framework (CABAN) basé sur des mesures réalistes pour la conception de la couche PHY WBAN. En particulier, ce système est capable de caractériser dynamiquement les canaux on-body et off-body pour des applications indoor. Dans [Dong 12a], les auteurs évaluent la coexistence de plusieurs WBAN par simulation. Pour cela, ils utilisent des modèles pour les nœuds, le canal, la communication et l'environnement basés sur des scénarios réalistes avec différentes mesures de canal. Dans le même esprit, [Sayrafian-Pour 13] [Alasti 14] proposent une plateforme de simulation pour caractériser les interférences entre les WBANs. Pour cela, ils utilisent des modèles statistiques pour le canal. Ainsi, ils observent la probabilité de coupure pour évaluer différentes stratégies pour réduire l'interférence. Cependant, ces résultats ne sont pas basés sur des scénarios de mobilité réalistes. D'autres outils de simulation déterministes ont été proposés pour faire des prédictions sur la propagation [McKown 91] [Seidel 94] [Meissner 11] [Raspopoulos 12] [Laaraiedh 12]. Ces simulateurs sont basés sur le principe du Ray Tracing qui modélise les chemins optiques entre deux points en utilisant une formulation théorique de la propagation physique, tels que la réflexion, la transmission et la diffraction. Pour cela, ces outils utilisent des modèles d'environnement 3D et des informations sur les propriétés des matériels, les positions physiques des capteurs et les détails sur les antennes. Ainsi, il est possible de tracer les rayons de propagation pour calculer les fonctions de transfert du canal au niveau des récepteurs. Cependant, ces types de simulateurs sont très lents en calcul et donc, ils ne peuvent pas être utilisés pour des applications en temps réel. C'est pour cela que les aspects communication et localisation ne sont pas implémentés. Pour répondre à ce problème, [Uguen 12] a proposé une technique de calcul ray tracing basée sur la théorie de graphes (PyLayers). Ainsi, ils sont capables d'estimer des paramètres du canal (RSSI et ToA) nécessaires pour la localisation. De plus, il est possible d'intégrer des traces de mobilité pour calculer les effets de propagation d'un scénario donné. C'est pour ces raisons que nous considérons ce simulateur dans nos études.

En ce qui concerne les simulateurs de réseau, nous pouvons trouver plusieurs en open source, par exemple NS-2 [NS-2 15], NS-3 [NS-3 15], OPNET [Homepage 15b], OMNeT [Homepage 15a], WSNNet [Chelius 15]. Il faut noter que ces simulateurs à événements discrets ont été créés à la base pour modéliser les réseaux de capteurs WSN. NS-2 est un simulateur développé en C++. Il intègre notamment des modules pour la simulation des réseaux ad hoc (basés sur le WiFi [IEEEStd802.11 07]), ainsi que quelques modèles de canal basiques (modèle de propagation en espace libre Friis, modèle de réflexion à deux rayons). NS-3 est l'extension de NS-2 avec plus des modules au niveau de la radio (LTE, WiMAX, [IEEEStd802.15.1 05]), du canal (Rayleigh, Nakagami) et du réseau (6LowPAN). Pour ces deux simulateurs, il est possible d'implémenter de nouvelles extensions et la documentation est souvent mise à jour. Cependant, ces deux simulateurs n'ont pas été très utilisés dans le contexte WBAN car les modèles de canal sont peu réalistes [Mahapatro 12] [Aghayi 14]. OPNET est un autre simulateur très utilisé dans les WSN. Il a été acheté par Riverbed en 2012 et il a été renommé en Riverbed modeler, mais ils proposent une version gratuite pour les travaux de recherche académique. Ce simulateur intègre des modules pour différents types de réseau (LTE, UMTS et WiFi).

### Chapitre 3. Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels

---

L'implémentation de nouvelles extensions est possible mais aucun modèle pour les WBAN n'est fourni par la version de base. OMNet++ est un simulateur développé par modules, ce qui permet d'implémenter des modèles assez facilement. Il faut noter que ce simulateur a été interfacé avec différents frameworks pour traiter différents applications, dont les WBAN. Dans le même esprit, WSNNet est utilisé pour la modélisation des nœuds et l'environnement. Malgré le fait qu'il y a peu de documentation disponible, il est très facile d'implémenter des nouveaux modules en C et le temps de simulation est assez rapide. De plus, ce simulateur a déjà été utilisé dans le contexte WBAN [Didioui 13] [Lauzier 13].

Nous pouvons trouver un certain nombre de co-simulateurs WSN qui intègrent les aspects de la couche physique et des couches supérieures. Cependant, la plupart n'a implémenté que très peu de protocoles adaptés aux différents applications WBAN. PiccSIM [Kohtamaki 09] est un des premiers co-simulateurs pour WSN qui intègre différents modules pour les réseaux sans fils et câblés. Dans ce framework, Simulink est utilisé pour la conception du système physique et pour la simulation et puis, il est interfacé avec NS-2 pour la simulation du réseau. Ainsi, il est possible de faire plusieurs simulations distribuées avec différents ordinateurs coordonnés par des packets TCP/UDP (Piccsim Toolchain). Dans le même esprit, [Hasan 09] propose un co-simulateur entre OPNET et Matlab/Simulink pour étudier les effets du mouvement des noeuds dans les réseaux de systèmes de contrôle sans fil (WNCs). Cependant, cet outil a besoin de deux ordinateurs, un qui supporte OPNET comme simulateur master et un deuxième avec Matlab. Ainsi, les deux simulateurs tournent en parallèle et sont synchronisés par UDP. Cependant, ce processus de synchronisation est lent et le développement de nouveaux modèles est lourd à mettre en place. En outre, COSMO [Zhang 10] est un framework de simulation entre MatLab et OMNet++ pour les réseaux sans fil en indoor. Ce simulateur contient plusieurs modèles de canal indoor et modèles d'environnement 3D développés en Matlab et qui peuvent être compilés et intégrés par librairies à OMNET++. Cependant, il n'a jamais été utilisé pour les scénarios WBAN. Dans ce sens, un des frameworks le plus utilisés pour OMNet++ est Castalia [Simulator 15] qui intègre différents radio pour les WSN (WiFi, Zigbee, IEEE 802.15.4/6 NB) et plusieurs modèles de canal dynamique. De plus, il est possible de tester différents protocoles MAC classiques (CSMA, TDMA, IEEE 802.15.4). Cependant, les modèles de mobilité pour le corps et l'abstraction de la couche physique sont assez simples et peu réalistes. Pour cela, un autre framework de OMNET++ orienté plus physique est Mixim [Mixim 15] qui propose des modèles dynamiques sur la propagation, l'estimation d'interférence et la consommation d'énergie de la radio. De plus, ce framework intègre un module de mobilité dédié aux WBANs qui peut prendre des traces de mesure des nœuds (MoBAN) [Nabi 11]. Cependant, la documentation est assez pauvre et il y a aucun module dédié à la localisation. Enfin, HarvWSNet [Didioui 13] est un co-simulateur entre WSNNet et Matlab proposé pour l'étude des protocoles qui visent à améliorer la consommation d'énergie des WSNs (energy harvesting wireless sensor networks (EH-WSN)). Cet outil utilise uniquement un ordinateur qui synchronise les deux simulateurs par TCP/UDP. Cependant, ce simulateur n'a pas été adapté pour les WBANs à la base et donc, il n'a pas intégré des modèles de canal et de mobilité adaptés.

Pour conclure, nous avons vu qu'il existe plusieurs simulateurs qui traitent principalement les problématiques des WSN mais qui ne sont pas adaptés spécialement aux WBAN. Dans notre contexte, OMNet++, WSNNet et PyLayers semblent être les plus adaptés. Cependant, nous avons considéré un co-simulateur WSNNet/PyLayers. La raison

### 3.3. Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe

---

principale est l'aspect modulable de WSNet qui permet d'implémenter des nouveaux modules assez rapidement, ainsi que la vitesse de traitement. De plus, WSNet et PyLayers ont été développés par le CITI-INSA et UR1, ce qui peut faciliter sa conception. Enfin, dans le cadre du projet CORMORAN, ce simulateur va permettre à la communauté scientifique de faire la conception et l'évaluation de nouveaux algorithmes coopératifs pour les WBANs (dans le sens large et non seulement à la localisation) et les comparer avec des protocoles standard.

### 3.3 Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe

Cette section a pour objectif de synthétiser le travail fait pour la conception d'une base de mesures expérimentales. Pour cela, nous allons décrire la méthodologie de déploiement suivie et les scénarios considérés. Cette campagne de mesure a été réalisée avec trois plateformes radio pour la mesure du canal en UWB et NB et un système optique pour la capture du mouvement. L'intérêt d'utiliser conjointement est d'avoir un modèle de canal dynamique synchronisé avec les différents scénarios de mobilité. Ainsi, nous allons pouvoir comparer différentes technologies dans les mêmes conditions de déploiement et valider nos protocoles dédiés à la localisation. Enfin, nous détaillons également les étapes de post-traitement réalisées pour rendre ces mesures exploitables pour le simulateur développé.

#### 3.3.1 Environnement expérimental

La série d'expériences de cette campagne a été réalisée dans un gymnase habituellement dédié aux études de capture de mouvement à l'ENS Rennes, France (plateforme "Immermove"). La zone de capture a été limitée à une surface de  $13 \cdot 8 \text{ m}^2$  autour de laquelle nous avons déployé les ancres radio et les caméras vicon (Figure 3.1). Il faut noter que dans cet environnement, les effets des multi trajets vont être moins réalistes que dans un espace indoor classique. En effet, les murs et plafonds sont éloignés, donc les trajets réfléchis sont perçus plus tard que dans une pièce plus petite. En revanche, cet environnement permet d'avoir une mobilité du corps à plus grande échelle dans un espace ouvert et donc, il permet de saisir les effets de shadowing dominants du corps pour les scénarios individuel et en groupe. En termes d'effectifs, ce travail a été réalisé collectivement avec le CEA, l'Université de Rennes, Telecom ParisTech et l'ENS Irisa. Puis, nous avons découpé le travail en trois tâches principales : i) l'acquisition et la calibration des plateformes radio, ii) la capture du mouvement et iii) la réalisation et le montage des scénarios. En ce qui nous concerne, nous avons travaillé principalement sur la plateforme radio en NB (Hikob) et dans le montage des scénarios.

#### 3.3.2 Technologies et plateformes utilisées

##### A. Système de capture optique pour la mobilité (Vicon)

Le système Vicon a été créé principalement pour l'analyse du mouvement des sportifs [Vicon 15]. Dans cette campagne, nous l'utilisons pour fournir des données précises et synchronisées sur la vérité-terrain (ground truth) des personnes et des nœuds placés sur les corps. Ces traces sont obtenues avec 12 caméras infrarouges calibrées à 100 Hz et placées autour de la scène (Figure 3.1). Pour chaque scénario d'expérimentation, nous

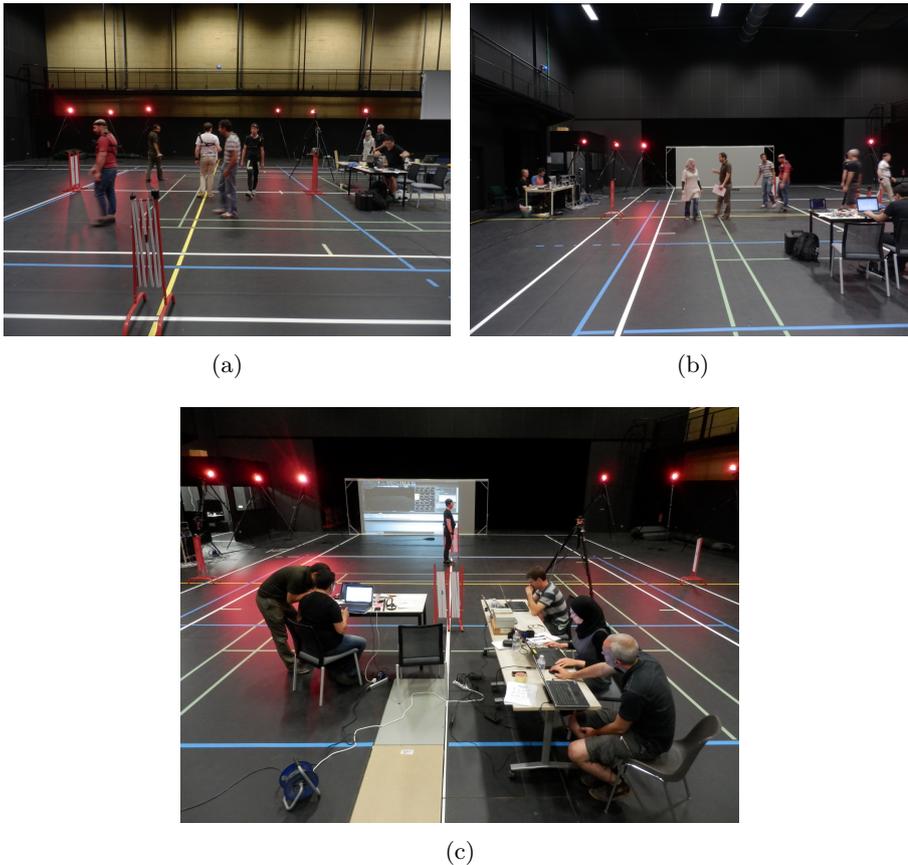


FIGURE 3.1 – Gymnase d'expérimentation de l'ENS/IRISA pour la capture de mouvement.

avons équipé les personnes de test avec plusieurs marqueurs (Figure 3.2) placés sur les noeuds et sur des points anatomiques et stratégiques pour la reconstruction de la position et l'orientation du corps en 3D. Il faut noter que le post-traitement de ces données par l'ENS a duré 6 mois pour avoir des modèles de mobilité en format C3D pour tous les scénarios.

#### B. Système radio NB IEEE 802.15.4 (Hikob)

Nous avons utilisé la plateforme radio HiKob FOX [HiKoB FOX ] pour la mesure du canal en NB. Ces capteurs sont composés par un processeur et un chipset radio basé sur le [IEEEStd802.15.4 06] dans la bande ISM 2.4 GHz. Avec cette plateforme, il est possible d'obtenir le RSSI moyen des 8 derniers symboles de modulation reçus avec un débit de 250 kbps [Lauzier 13]. Chaque capteur transmet périodiquement dans un intervalle de temps prédéterminé ( $< 2$  ms) de la trame synchronisée par TDMA. De plus, il est possible de moduler la durée de la trame en fonction du nombre de noeuds dans le réseau. A la fin de chaque trame, nous avons un intervalle de temps long et réservé pour permettre l'enregistrement de données mesurées dans une carte micro-SD. Le noeud coordinateur, placé sur le corps, annonçait le début de chaque trame.

Dans cette campagne, nous avons utilisé 16 noeuds pour une trame de 26 ms. Nous

### 3.3. Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe

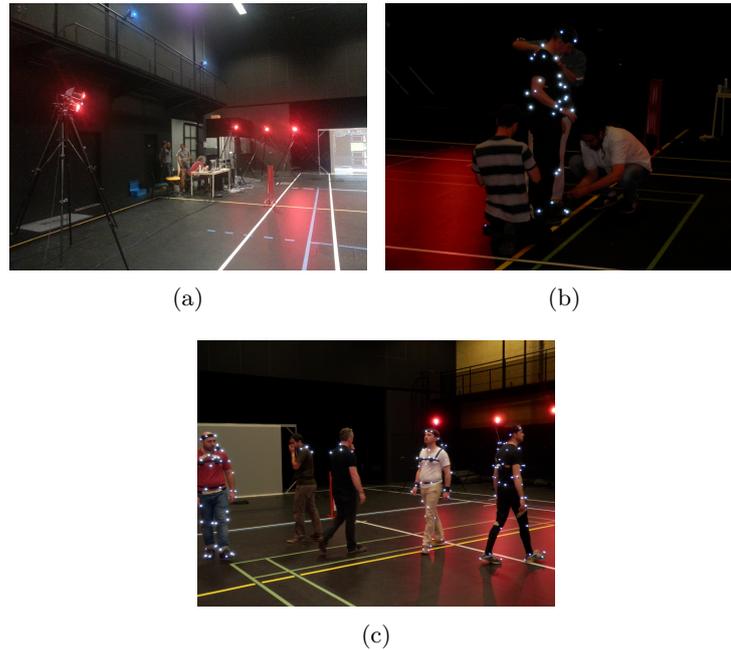


FIGURE 3.2 – Système optique (Vicon) utilisé pour la capture du mouvement et l’obtention des positions des nœuds en temps réel pour nos deux scénarios d’étude.

avons déployé 4 capteurs Hikob dans différents points autour de la zone de capture pour représenter les ancres de l’infrastructure (Figure 3.3) et 12 capteurs étaient placés sur la ou les personnes (en fonction du scénario visé). Pour contrôler l’acquisition de données radio, nous avons développé deux capteurs supplémentaires : un capteur marqueur et un capteur d’écoute. Le capteur marqueur contient un bouton qui permet de lancer et d’arrêter l’enregistrement pour tous les nœuds et réduire la consommation d’énergie. Ce capteur était donné à la personne de test. Le capteur d’écoute sert à sonder le canal pour s’assurer que tous les capteurs transmettent et enregistrent correctement les données. Pour cela, ce capteur est branché à un ordinateur pilote qui permet d’afficher le status des capteurs via un terminal (Figure 3.1).

#### C. Système radio UWB IEEE 802.15.4a (BeSpoon et IR-UWB TCR)

Nous avons également considéré la plateforme créée par BeSpoon qui est composée d’un smartphone capable de communiquer avec 6 capteurs en UWB [IEEEStd802.15.4a 07] (Figure 3.4). Ces dispositifs peuvent réaliser une mesure toutes les 250 ms. De plus, il est possible de communiquer à différentes fréquences (3.5 GHz, 4 GHz, 4.5 GHz, 7.5 GHz, 8 GHz et 8.5 GHz) avec une bande passante entre 500 MHz et 1 GHz. Dans cette campagne nous avons considéré uniquement un smartphone avec 2 capteurs. La fréquence a été fixée à 3.994 GHz avec une bande passante de 500 MHz. Pour réaliser les mesures, nous avons développé notre propre application Android dans le Smartphone pour permettre de lancer et d’arrêter l’enregistrement des distances estimées. Il faut noter que les mesures se font uniquement en étoile vers le smartphone (tenu par la main droite). Par conséquent, nous avons mesuré les variations de distance de deux liens avec les tags BeSpoon.

En outre, nous avons également considéré la plateforme IR-UWB TCR (Low Data

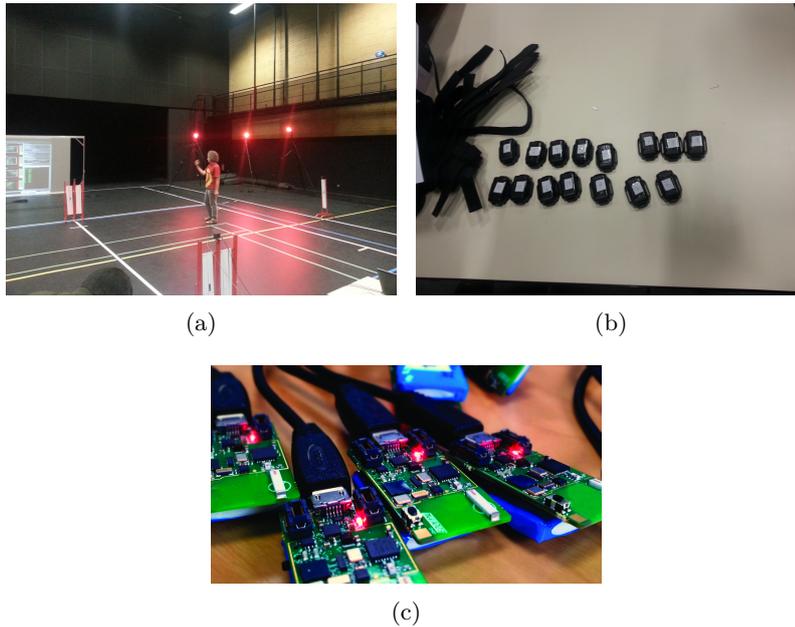


FIGURE 3.3 – Plateforme radio Hikob FOX IEEE 802.15.4 (NB 2.4 GHz)

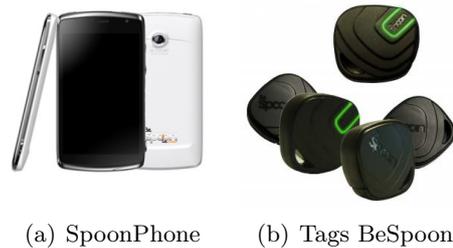


FIGURE 3.4 – Plateforme radio BeSpoon IEEE 802.15.4a (IR-UWB à 3.994 GHz)

Rate - Location and Tracking) développée par le CEA [Lachartre 09]. Ces dispositifs sont capables de transmettre à 350 Kbps avec une portée de 40 m en LoS. La fréquence a été fixée à 4.5 GHz avec une bande passante de 500 MHz, pour éviter l'interférence. Ainsi, il est possible d'obtenir la réponse impulsionnelle du canal, l'estimation du ToA et l'estimation de la distance avec l'évaluation du RT-ToF. Pour cette campagne, nous avons utilisé 14 nœuds communiquant en TDMA où le nœud coordinateur était connecté à un ordinateur externe pour la configuration et le débogage. Cependant, les traces obtenues par ces dispositifs n'étaient pas exploitables. En ce qui concerne les traces des capteurs BeSpoon, nous avons récupéré les données. Par contre, vu qu'on avait accès qu'à deux liens, nous ne les avons pas exploités en priorité. Par conséquent, nous nous sommes concentrés uniquement sur le post-traitement des mesures en NB.

### 3.3.3 Scénarios d'expérimentation

Nous avons déployé 4 capteurs (Hikob FOX et TCR) comme ancres (nommées par AP1, AP2, AP3, AP4) autour de la scène à une hauteur de 1,06 m. Puis, nous avons placé un nombre différent de capteurs sur les personnes de test en fonction du scénario,

### 3.3. Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe

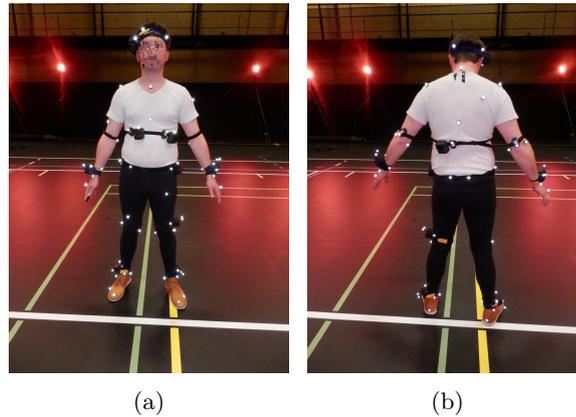


FIGURE 3.5 – Avant et arrière des images de la personne équipée avec 12 capteurs HiKoB FOX, le SpoonPhone (main droite), les 2 tags BeSpoon et 10 nœuds TCR, ainsi que plusieurs dizaines de marqueurs Vicon pour le scénario LSIMC mono-utilisateur.)

soit tous sur une même personne (Figures 3.5 et 3.6) ou soit distribués sur trois personnes (Figure 3.7).

Nous avons considéré un premier scénario de calibration et validation (S2.0), puis 5 scénarios d'expérimentation pour le cas LSIMC (S2.1a, S2.1b, S2.1c, S2.1d et S2.1e) et 2 scénarios pour le cas CGN (S2.2a et S2.2b). Pour ces scénarios, nous avons considéré trois sous-scénarios différenciés par la configuration des plateformes radio utilisées :

- Configuration A (Cf.a) : le cas avec UWB TCR uniquement
- Configuration B (Cf.b) : le cas avec NB Hikob Fox et UWB BeSpoon
- Configuration C (Cf.c) : le cas multi-standard avec les trois plateformes

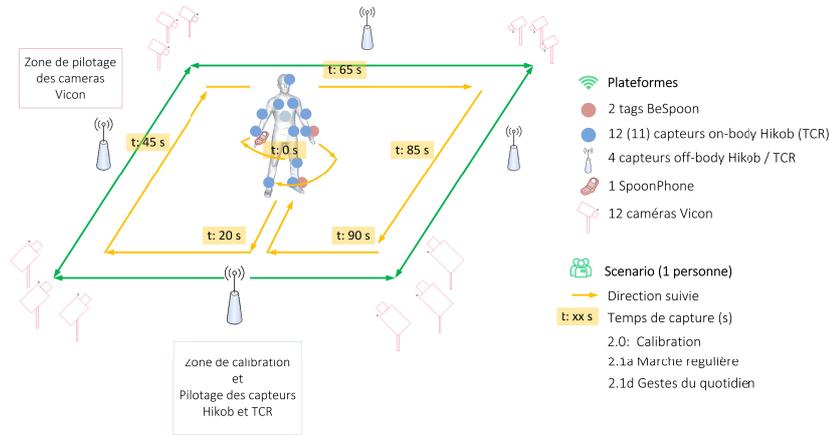
Chaque sous-scénario a été rejoué 4 fois avec une durée autour de 110 sec pour pouvoir avoir plusieurs versions au cas où un système arrêterait de fonctionner pendant l'expérimentation. Le début de chaque acquisition était caractérisé par un geste des bras réalisé par une personne, pour nous permettre de synchroniser les traces de mouvement et du canal. Enfin, nous avons également filmé tous les scénarios.

#### Scénario de calibration et validation de plateformes (S2.0)

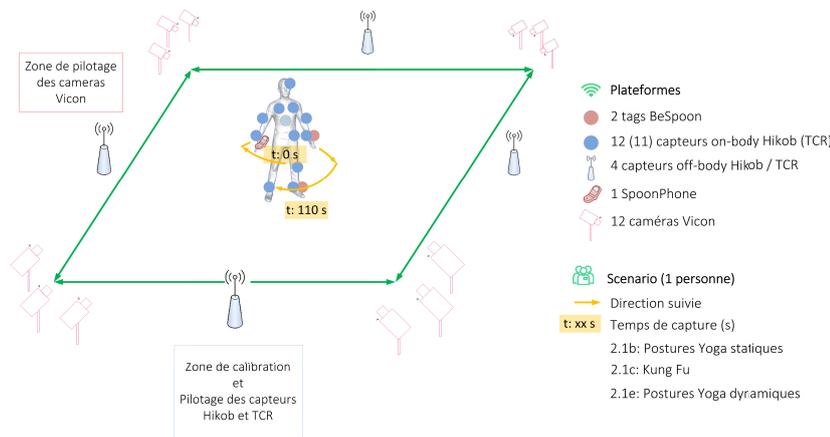
Cette première expérimentation a été faite au début de la campagne. Elle avait pour objectif de valider le fonctionnement des plateformes. Nous avons vérifié la coexistence entre les différentes radio (NB et UWB) et la possibilité d'interférence pour les cas où nous utilisons toutes les plateformes en même temps. Pour cela, nous avons considéré nos 3 configuration pour les plateformes radio (Cf.a, Cf.b et Cf.c). Ainsi, en fonction de la configuration utilisée, nous avons placé plusieurs capteurs dans les positions suivantes (Figure 3.6) :

- 10 capteurs TCR placés à droite de la tête, à droite du torse, à gauche du torse, au centre du dos, à droite de la hanche, au poignet droit, au poignet gauche, au pied droit et au pied gauche.
- 12 capteurs Hikob FOX placés à droite de la tête, à droite du torse, à gauche du torse, au centre du dos, à droite de la hanche, au poignet droit, au poignet gauche,

### Chapitre 3. Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels



(a) Marche



(b) Séquence de postures

FIGURE 3.6 – Scénarios expérimentaux considérés pour le cas de la capture de mouvement individuel à large échelle (LSIMC).

au coude droit, au coude gauche, au pied droit et au pied gauche.

- 1 Spoonphone à la main droite et 2 tags BeSpoon à la main gauche et au pied gauche.

Ce scénario correspondait à une *marche régulière en mode navigation individuelle* où la personne démarrait au milieu de la scène en regardant toujours son téléphone (geste de navigation GPS). Puis, la personne devait tourner autour d'elle en s'orientant vers chaque ancre pendant 5 sec, en suivant une orientation dans le sens horaire. A  $t = 20s$ , elle commençait à se déplacer autour de la zone de capture en suivant une trajectoire rectangulaire centrée au point de départ (Figure 3.6 (a)). Cette trajectoire est représentée par 9 sous-séquences où la personne allait d'un point d'intérêt (aux coins de la zone ou à côté d'une ancre) vers une autre avec une pause de quelques secondes.

Pendant cette séquence, nous avons regardé le comportement du canal on-body et off-body pour valider le bon fonctionnement des plateformes. Au niveau du système optique,

### 3.3. Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe

nous avons vérifié que les caméras étaient placées correctement pour pouvoir enregistrer la personne en temps réel. Ainsi, nous avons observé que nos systèmes marchaient correctement et sans problème d'interférences.

#### Scénarios pour la capture du mouvement individuel (S2.1x)

Pour tous les scénarios nous avons utilisé les mêmes positions des capteurs que pour le S2.0, selon la configuration utilisée (Cf.a, Cf.b et Cf.c).

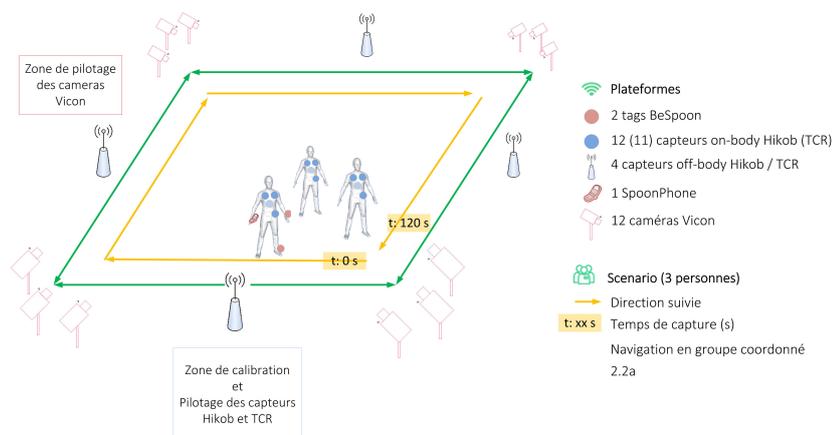
Scénario	Type	Durée	Description	Config.
2.1a	<i>Marche de piétonne régulière</i>	1m30s	La personne devait suivre un chemin indiqué au sol. Pendant la première minute, la personne devait marcher à une vitesse modérée. D'abord, en regardant son téléphone (pour simuler un geste d'orientation) pendant 30s et puis en faisant une marche naturelle avec le téléphone dans la main pendant 30s. Ensuite, elle devait enchaîner avec une marche accélérée jusqu'à atteindre une vitesse de course modérée pendant 30s.	Cf.a, Cf.b, Cf.c
2.1b	<i>Postures de Yoga statique</i>	10s/posture	Enchaînement de différentes postures yoga de manière statique. Les postures ont été réalisées dans l'ordre suivant : half-moon pose, mountain pose, warrior pose, tree pose et bend forward pose. La personne devait rester au milieu de la zone pendant toute la séquence.	Cf.a, Cf.b
2.1c	<i>Gestes de Kung Fu</i>	3m10s	Enchaînement dynamique de plusieurs gestes de Kung Fu à une vitesse lente. De la même manière que le Yoga, la personne devait rester au milieu de la scène.	Cf.a
2.1d	<i>Gestes du quotidien</i>	1m10s	Reproduction de plusieurs gestes du quotidien : s'asseoir dans une chaise, se mettre debout, ouvrir et fermer une porte, parler par téléphone	Cf.b
2.1e	<i>Enchaînement dynamique des postures Yoga</i>	1m40s	Enchaînement dynamique des postures Yoga réalisées dans 2.1b. L'intérêt de ce dernier est de pouvoir réaliser la détection de postures pour des applications d'apprentissage de type machine learning en temps réel avec un scénario contrôlé.	Cf.b

#### Scénarios pour la navigation en groupe (S2.2x)

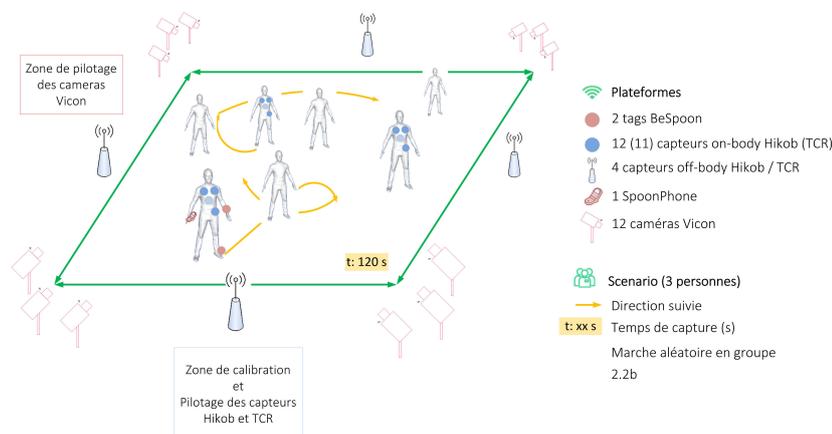
Au deuxième jour d'expérimentation, nous avons considéré plusieurs personnes. Deux scénarios divisés en sous-scénarios en fonction de la plateforme utilisée (Cf.a, Cf.b et Cf.c). Puis, nous avons déployé les différentes plateformes comme suit (Figure 3.7) :

- 3 capteurs TCR placés sur les 3 personnes à droite du torse, au centre du dos et à l'épaule gauche, dont 2 personnes avaient en plus 1 capteur à gauche du torse.
- 4 capteurs Hikob FOX placés sur les trois personnes à droite du torse, à gauche du torse, au centre du dos et à l'épaule gauche.
- 1 Spoonphone à la main droite d'une personne et 2 tags BeSpoon dans deux ancrs de l'infrastructure avec les ancrs Hikob/TCR.

## Chapitre 3. Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels



(a) Navigation coordonnée



(b) Marche irrégulière urbaine

FIGURE 3.7 – Scénarios expérimentaux considérés pour le cas de la navigation en groupe (CGN).)

**Scénario 2.2a** consistait en l'enchaînement de différentes situations de *navigation en groupe coordonné*. Pour ce scénario, il y avait un leader de groupe qui indiquait la séquence de mouvement à faire, puis tout le groupe devait suivre le chemin indiqué au sol (en cercle). D'abord, le groupe devait marcher ensemble avec une marche régulière. Puis, ils enchaînaient avec des gestes portant un objet dans le bras (en mode pompier ou soldat) et ils finalisaient avec une course coordonnée à vitesse régulière.

**Scénario 2.2b** consistait en la simulation d'une *marche aléatoire en zone urbaine* de trois personnes équipées. Lors de cette séquence, cinq personnes non-équipées apparaissaient de manière progressive. Ces dernières avaient quelques marqueurs vicon pour pouvoir les considérer dans les traces de mobilité. L'intérêt de ce scénario est d'avoir des traces body-to-body où la communication était perturbée par le shadowing de plusieurs personnes, tel qu'on peut attendre dans un milieu outdoor urbain.

### 3.3. Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe

#### 3.3.4 Traces de mesures radio/mobilité et post-traitement

Le processus de post-traitement pour rendre notre base de mesures exploitable était divisé en trois phases :

1. Définir un point de départ commun pour tous les traces.
2. Compenser les décalages temporels entre les traces des différents systèmes.
3. Ajuster les traces (obtenues avec différents taux d'acquisition) avec une même et unique fréquence d'échantillonnage.

Dans ce cas, la base référence de temps est celle de vicon (100 Hz) car c'est le taux de rafraîchissement le plus rapide. Pour cela, il a fallu faire une décimation et/ou interpolation avec les traces. En ce qui concerne le point départ, comme mentionné avant, nous avons mis en place une procédure pour pouvoir post-synchroniser les plateformes radio et vicon, comme suit :

- Un signal de voix ("top") était donné au départ pour lancer les différents systèmes en parallèle. La personne de test devait rester au milieu de la zone de capture sans bouger pendant quelques secondes après le signal.
- Ensuite, cette personne devait faire un geste prédéfini pour nous laisser détecter un changement dans les traces de mouvement et de canal. Ce geste consistait à lever et baisser les deux bras pendant 1 seconde. L'intérêt est de pouvoir resynchroniser toutes les plateformes à partir de ce geste et non pas à partir du "top" de départ qui pourrait être gêné par des décalages temporels entre les plateformes et sujet à la réactivité des manipulateurs.

Ensuite, pour resynchroniser nos plateformes, nous avons considéré d'abord les traces de mobilité (du système vicon  $\tau_{sampling} = 10$  ms) et les traces du RSSI (obtenues par Hikob FOX  $\tau_{sampling} \approx 26$  ms), pour déterminer le meilleur décalage temporel et facteur de sous-échantillonnage. Les traces Vicon permettent d'identifier les positions où il y a des obstructions ou pas et donc, le but est de corrélérer les traces du RSSI de Hikob avec les obstructions. Pour cela, nous définissons  $d_{sh}$  (pour distance et body shadowing) comme la fonction définie par la distance entre deux nœuds  $d(t)$  et le facteur du niveau d'occultation d'un lien  $s_{sh}(t)$  (0 pour libre ou 1 pour occulté) basée sur les traces de mobilité, telle que :

$$d_{sh}(t)[dB] = -20 \cdot \log(d(t)) - 15 \cdot s_{sh}(t) \quad (3.1)$$

Cette quantité est calculée comme l'inverse de la distance au carré (en dB), avec l'ajout d'une constante de 15 dB (représentant le niveau de shadowing moyenne obtenue empiriquement avec PyLayers) lorsque le shadowing du corps a été détecté à un instant donné. La Figure 3.8 montre les valeurs du RSSI (en  $nW$ ) et de l'inverse de la distance au carré (en  $m^{-2}$ ) (vérité-terrain) avec les zones d'occultation (colorées en jaune) avant la synchronisation. Nous pouvons noter que pour tous les liens, il y a une ressemblance entre les courbes du RSSI et de la vérité-terrain. En particulier, dans le liens AP1-torse gauche, AP3-torse gauche et AP4-torse gauche, nous pouvons observer un pic maximal qui correspond au moment où la personne se rapprochait le plus de l'ancre. Cependant, dans le cas du AP2-torse gauche, il n'y pas de pic ou d'indice de ressemblance avec les traces RSSI (à part la forme) pour nous aider à la synchronisation précise. Ce même problème a été observé dans la majorité des mesures ayant subi un canal très dynamique.

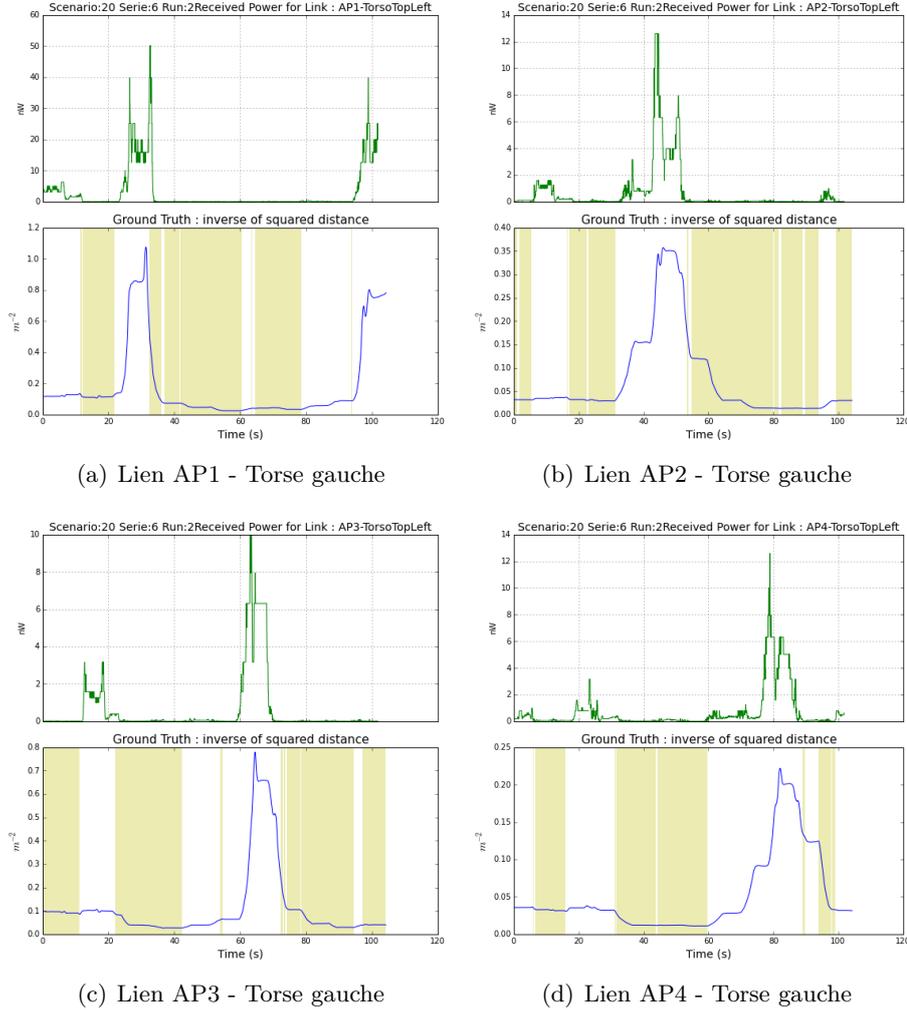


FIGURE 3.8 – Résultats non-synchronisés des traces du RSSI (en vert) et l'inverse de la distance au carré (en bleu) avec le niveau d'occultation de liens (en jaune).

Pour répondre à ce problème, nous avons calculé le facteur de corrélation croisé entre les traces RSSI et  $d_{sh}$  (en dB) pour toutes ces configurations temporelles possibles ( $k$ ), comme suit :

$$r_{xy}^k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \cdot \sigma_x \sigma_y} \quad (3.2)$$

où  $x$  représente la fonction  $d_{sh}$ ,  $y$  représente les mesures du RSSI,  $\bar{x}$  (resp.  $\bar{y}$ ) est la moyenne de la fonction  $d_{sh}$  (resp. des mesures RSSI) et  $\sigma_x$  (resp.  $\sigma_y$ ) est l'écart type de la fonction  $d_{sh}$  (resp. des mesures RSSI). Puis, nous avons calculé le ratio de corrélation pour chaque configuration comme le rapport entre la valeur maximale et la moyenne des coefficients de corrélation :

$$ratio^k = \frac{\max(r_{xy})}{\bar{r}_{xy}} \quad (3.3)$$

### 3.3. Données expérimentales pour la capture du mouvement et la navigation individuelle et en groupe

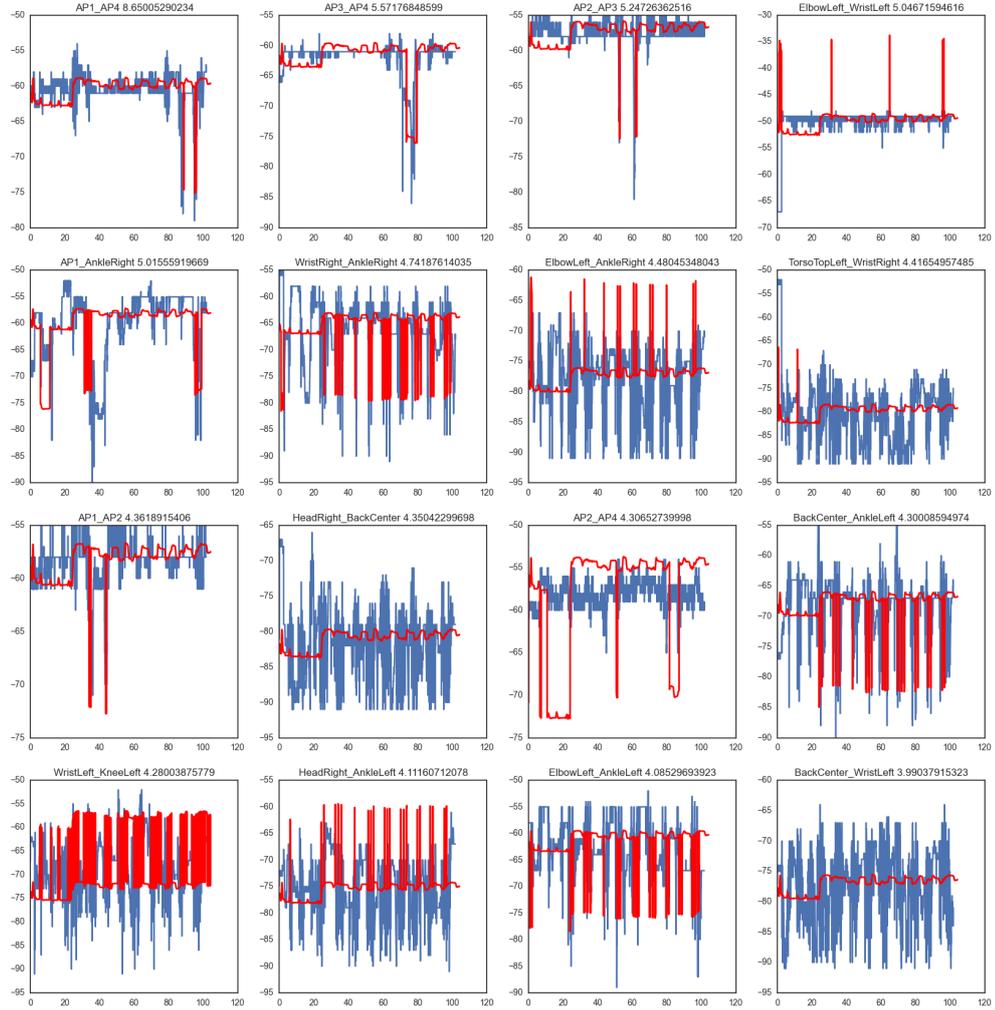


FIGURE 3.9 – Comparaison du RSSI (bleue) et la quantité  $d_{hs}$  (rouge) centrée pour les liens ayant le facteur de corrélation le plus grand.

Ainsi, nous considérons que la meilleure synchronisation est trouvée ( $\tau_{\text{délai}}$ ) lorsque le facteur de corrélation ( $ratio^k$ ) est le plus grand :

$$\tau_{\text{délai}} = \arg \max_t (ratio^k) \quad (3.4)$$

La Figure 3.9 (resp. 3.10) montre le résultat de la superposition du  $d_{sh}$  et du RSSI synchronisés avec le même taux d'échantillonnage temporel et après avoir trouvé le facteur de corrélation le plus grand. Pour pouvoir les comparer, le  $d_{sh}$  est centrée autour de la valeur moyenne du RSSI du lien traité. La Figure 3.9 est triée par ordre décroissant par rapport au ratio de corrélation. Ainsi, nous pouvons observer que pour les résultats ayant le meilleur rapport de corrélation, la synchronisation de traces est plutôt bien visible (notamment pour les quatre premières). En contrepartie, les liens ayant le ratio de corrélation le plus bas (Figure 3.10), la synchronisation trouvée est moins visible même si

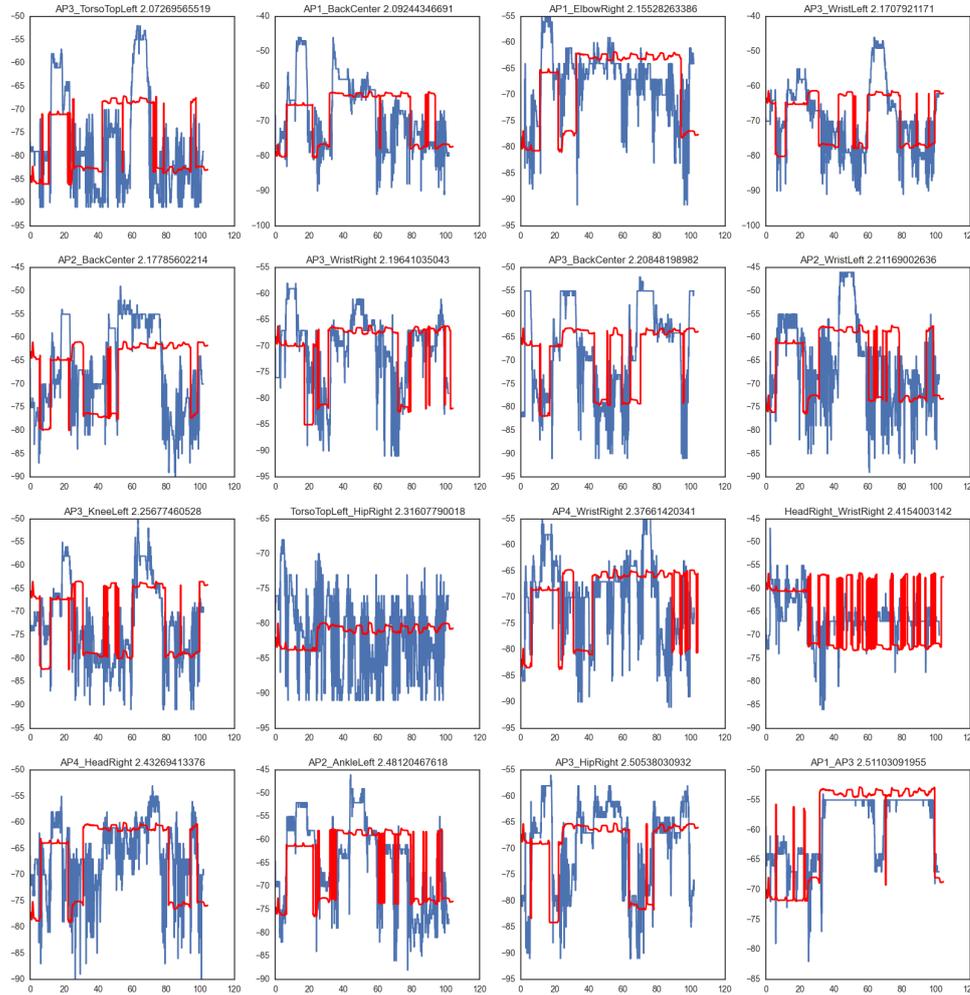


FIGURE 3.10 – Comparaison du RSSI (bleue) et la quantité  $d_{sh}$  (rouge) centrée pour les liens ayant le facteur de corrélation le plus bas.)

l'allure du  $d_{sh}$  suit le comportement du RSSI. Ceci peut s'expliquer du fait que la plupart des erreurs de corrélation viennent des instants où la condition LoS a été détectée, alors que le RSSI montrait une forte variation de canal. Il faut noter que certaines de ces fluctuations ont été générés par des effets du fading des multi trajets (du corps et de l'environnement) qui n'ont pas été filtrés (même après un moyennage du RSSI). A partir de ces résultats, les traces ont été synchronisées avec le délai du lien avec le meilleur facteur de corrélation.

### 3.3.5 Discussion

Pour conclure, dans cette section nous avons détaillé la réalisation de la première campagne de mesures multi standard dans le contexte WBAN coopérative et mobile. Dans ce travail, nous avons testé 3 technologies différentes (optique, radio NB et UWB). La technologie vicon a été utilisée pour faire la capture de mouvement et le capteurs

Hikob/TCR/BeSpoon pour la mesure du canal. Nous avons utilisé 24 dispositifs radio sur une personne ou sur plusieurs personnes en fonction du scénario d'expérimentation. Ainsi, nous avons réalisé 58 séries de mesure impliquant la navigation de groupe, la capture de mouvement individuel et ceci avec les technologies radio portées individuellement ou conjointement. Il faut noter que les traces obtenues par les capteurs IR-UWB TCR n'étaient pas exploitables (plusieurs traces manquantes) et donc, nous avons continué avec l'utilisation des traces hikob et bespoon. Enfin, nous avons également montré le processus de post-traitement suivi pour rendre exploitable notre base de mesures. Pour cela, nous avons synchronisé nos traces avec une quantité composite basée sur la vérité-terrain des traces de mobilité. Ainsi, nous avons calculé de manière empirique le décalage temporel entre les traces du RSSI et de la mobilité en fonction du coefficient de corrélation le plus haut trouvé. Ce processus a été implémenté et automatisé dans le simulateur PyLayers pour pouvoir récupérer des traces synchronisées exploitables pour WSNNet. Ainsi, l'exploitation des mesures est possible pour toute la communauté des chercheurs impliqués dans le domaine WBAN.

### 3.4 Co-simulateur dédié aux réseaux corporels

Cette section montre le travail réalisé pour la conception d'un simulateur WBAN cross-layer pour l'évaluation de nos scénarios de localisation capable d'exploiter notre base de données de mesures. L'intérêt de ce simulateur est de pouvoir traiter des mesures réalistes brutes sur la mobilité simultanément avec celles de la radio, pour ensuite les exploiter pour évaluer la performance des couches supérieures. D'une part, PyLayers est utilisé pour décrire l'environnement, synchroniser les traces brutes de mobilité et de la radio (obtenues dans la campagne) et faire des prédictions de propagation déterministes à partir du modèle de mobilité utilisé. Ainsi, nous sommes capables d'obtenir le RSSI en UWB. D'autre part, WSNNet est utilisé pour la simulation des aspects localisation, réseau et communication. Nous allons détailler les différentes implémentations réalisées, ainsi que le workflow et l'interfaçage développé pour travailler avec PyLayers. Il faut noter que notre travail a surtout concerné le développement du simulateur WSNNet, ainsi que l'interfaçage avec PyLayers, l'IETR de l'Université de Rennes 1 a été le principal contributeur sur PyLayers.

#### 3.4.1 Adaptations des simulateurs choisis

##### A. Implémentation d'un modèle de mobilité pour PyLayers pour l'exploitation de traces

PyLayers [Amiot 13] est avant tout un simulateur ray-tracing développé en Python pour faire des prédictions de propagation radio en indoor. Pour cela, il intègre deux simulateurs en interne : un simulateur pour la mobilité d'un agent (qui peut être un objet ou une personne en mouvement) et un simulateur pour le calcul déterministe de la radio en UWB. Ainsi, la mobilité d'un agent et les rayons de propagation sont calculés à partir d'un environnement prédéfini. Cet environnement est décrit par un modèle synthétique (*le layout*) défini par différentes couches (type de matières, murs, etc) et utilise des graphes spécifiques au terrain pour la simulation.

**La mobilité de l'agent** est calculée à partir des graphes de l'environnement et d'un modèle de forces virtuelles agissant sur le comportement de l'agent. Ainsi, on obtient une

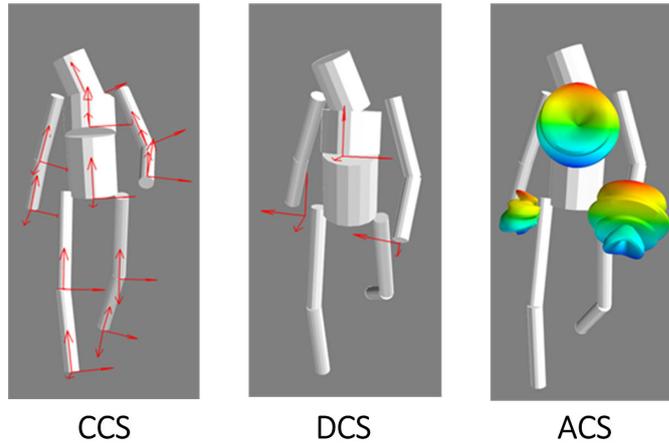


FIGURE 3.11 – Comparaison des différents systèmes de coordonnées implémentés en PyLayers pour la mobilité du corps et pour le calcul du canal de propagation.)

trajectoire qui représente le barycentre d'un agent. De plus, l'agent peut être représenté en 3D par un modèle multi-cylindrique (Figure 3.11) où la taille des cylindres peut être modifiée en fonction de la morphologie de la personne étudiée. Il faut noter que le simulateur multi-agent peut produire plusieurs trajectoires réalistes dans le modèle d'environnement. Cependant, il faut que le corps de l'agent soit associé à une trajectoire à chaque instant de simulation. Ceci est nécessaire pour déterminer la position et l'orientation des capteurs placés dans le corps.

Dans notre contexte, nous souhaitons utiliser les traces de mobilité obtenues expérimentalement pour définir le déplacement de l'agent. Pour cela, le problème a été décomposé en trois étapes. D'abord, les fichiers des traces ont été reliés au modèle multi-cylindrique. Ensuite, ce modèle multi-cylindres a été synchronisé avec la mobilité de l'agent (les trajectoires). Enfin, pour chaque instant, il a fallu calculer les positions et les orientations de capteurs associés au corps 3D. Le workflow de ce processus est synthétisé dans la Figure 3.12.

Pour la première partie, nous avons utilisé le format C3D pour nos fichiers de traces de mobilité. Ce format est assez utilisé dans la capture du mouvement et il peut être fourni par les systèmes vicon. Il nous fournit les positions des marqueurs placés sur les personnes pendant la campagne de mesure. Ces positions ont été utilisées pour récupérer les positions des nœuds et pour la création des cylindres du modèle du corps en 3D : 2 cylindres par bras, 2 cylindres par jambe, 2 cylindres pour le torse et un cylindre pour la tête. Ainsi, l'information sur chaque personne qui a participé dans la campagne a été stockée dans un fichier ".ini" pour indiquer l'information à utiliser des fichiers C3D pour chaque simulation.

La synchronisation entre la trajectoire de l'agent et le modèle du corps cylindrique a été faite en deux étapes. D'abord, nous avons calculé le centre de masse des positions obtenues par le C3D pour avoir un premier système de référence relative au corps (LCS). Ensuite, le centre de masse a été associé à la trajectoire de l'agent. Pour cela, nous avons calculé la vitesse du corps cylindrique à partir des traces et le centre de masse. Puis, cette vitesse a été associée à la vitesse de la trajectoire pour ramener le système de coordonnées du corps vers un système de coordonnées absolue (*GCS*) définie par l'environnement.

### 3.4. Co-simulateur dédié aux réseaux corporels

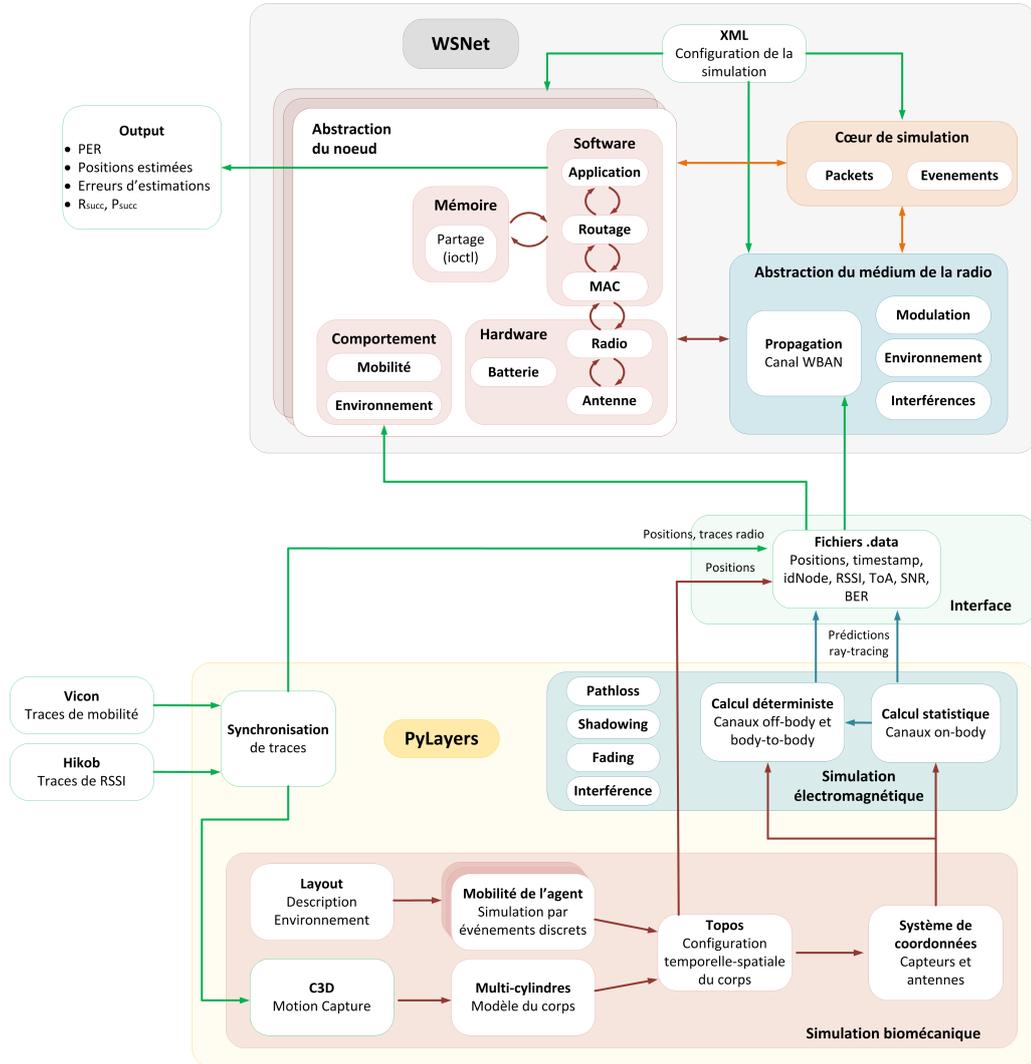


FIGURE 3.12 – Architecture du co-simulateur avec WSNet et PyLayers.

Le résultat de cette association est une séquence temporelle-spatiale des positions des nœuds (appelés *topos*) centrées sur la trajectoire de l'agent.

La dernière étape consiste à calculer les orientation des antennes par rapport aux positions relatives des nœuds sur le corps. Pour cela, nous avons décomposé notre repère LCS locale en plusieurs systèmes de coordonnées (Figure 3.11) associés graduellement aux cylindre, aux capteurs et aux antenne. Pour chaque cylindre du corps, nous avons défini son propre système de coordonnées (en anglais *cylindrical coordinate system CCS*) locales centré sur le centre de masse de l'agent. Ainsi, nous sommes capables d'obtenir les positions des nœuds à différents instants centrés relativement sur le cylindre auquel il est associé ou le centre de masse du corps. Pour cela, un autre système de coordonnées a été défini pour chaque capteur (en anglais *device coordinate system DCS*). Puis, pour le calcul de la radiation de l'antenne, un dernier système de coordonnées est défini (en

anglais *antenna coordinate system ACS*) qui est relativement centré sur le dispositif (*DCS*). L'intérêt d'avoir ce deux systèmes de coordonnées (*DCS* et *ACS*) est de pouvoir dissocier l'information physique mécanique du capteur de l'information sur la radiation de l'antenne (Figure 3.11).

**Simulation électromagnétique.** La propagation du canal est obtenue par simulation à partir des graphes prédéfinis [Uguen 12] pour l'environnement physique et les propriétés des antennes de capteurs. PyLayers propose plusieurs modèles d'antennes, mais il est possible de créer son propre modèle avec différents paramètres, tels que le gain maximal, la fréquence de transmission, la directivité et l'orientation. De plus, ces graphes peuvent être calculées pour chaque instant en fonction de la position des agents dans l'environnement avec l'information sur la structure et la topologie du terrain. Ainsi, il est possible de calculer le canal de propagation pour les liens on-body, body-to-body et off-body. Le canal on-body est basé sur les modèles statistiques fournies par le CEA [CORMORAN 16] [D2.3] [D'Errico 09] [Hamie 13c] [Pasquero 14]. Alors que les canaux off-body et body-to-body sont calculés en deux étapes. D'abord, on utilise le modèle statistique pour calculer les effets d'affaiblissement et du shadowing du canal on-body. Ensuite, on calcule par simulation déterministe l'influence de l'environnement sur le canal de propagation (incluant les effets multi trajets et les évanouissement liés aux autres corps). Il faut noter que le modèle multi-cylindrique n'a pas des propriétés électromagnétiques associées et il intervient dans le calcul uniquement pour positionner les capteurs et simuler la visibilité de la transmission (LoS ou NLoS). Le résultat final que l'on obtient est la réponse impulsionnelle du canal, avec laquelle il est possible de calculer le RSSI et le ToA des impulsions. Cependant, par manque de temps pour implémenter un modèle du récepteur et de mesures expérimentales pour évaluer le ToA, nous avons exploité uniquement le RSSI calculé avec PyLayers.

La Figure 3.12 détaille le workflow pour le calcul du canal de propagation en fonction de la mobilité donnée en entrée et l'environnement défini. Il faut noter qu'un des avantages de ce simulateur est de pouvoir modifier l'environnement indépendamment du modèle de mobilité des personnes. Le temps de calcul dépend principalement du nombre de liens à calculer et le taux d'échantillonnage temporel (qui est donné en paramètre en module  $2^n$ ). Ce taux détermine le nombre de timestamps ( $N_{timestamp}$ ) où le canal va être calculé par rapport au temps de simulation ( $t_{simu}$ ), tel que  $N_{timestamp} = \frac{t_{simu}}{2^n}$ . Par exemple, si l'on considère le scénario S2.1a (marche régulière avec les capteurs Hikob), nous avons 12 capteurs on-body et 4 capteurs off-body. Ainsi, si l'on considère que les liens sont symétriques, on trouve un total de 66 liens on-body ( $\sum_{i=1}^{11} i$ ) et 48 liens off-body ( $4 * 12$ ). Pour un taux d'échantillonnage fixé à  $n = 9$  pour 100s de simulation, nous avons obtenu une valeur de canal tous les  $\frac{100s}{2^9} \approx 200$  ms après  $\approx 52h$  de simulation (en considérant un PC Dell fixe standard (4Go de RAM, Corei5) dédié à ce calcul). Cependant, il faut noter qu'il est possible de choisir le nombre de liens d'intérêt à simuler pour réduire le temps de calcul.

Le résultat de ce simulateur que nous avons utilisé est le RSSI qui est calculé à partir de la réponse impulsionnelle du canal avec deux méthodes (en considérant les délais des trajets ou pas). Pour cela, la réponse impulsionnelle est modélisée par un canal à trajets

### 3.4. Co-simulateur dédié aux réseaux corporels

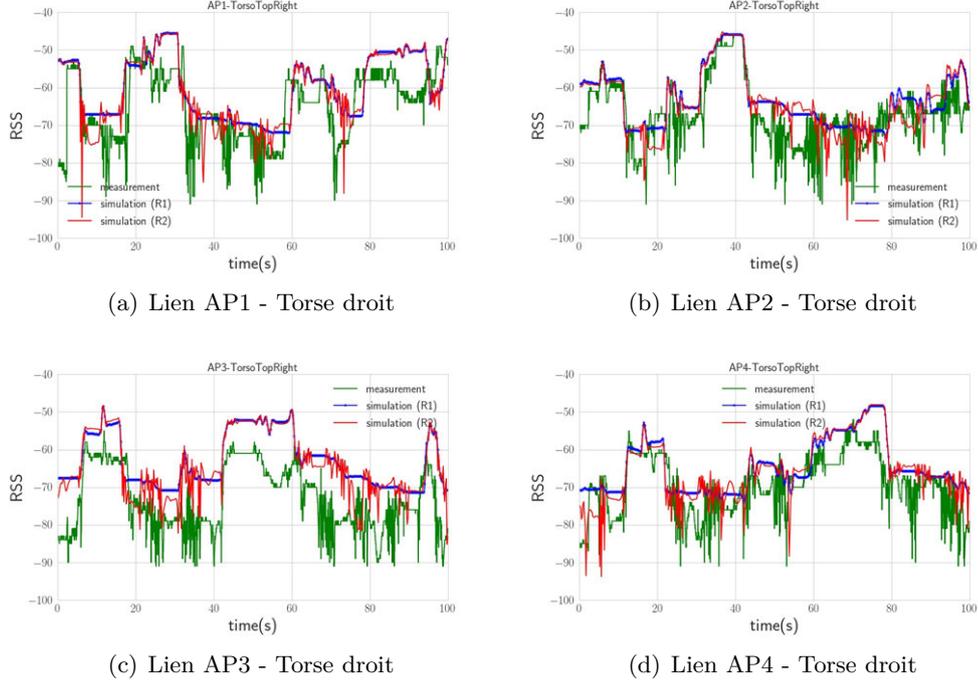


FIGURE 3.13 – Comparaison des RSSI calculés par simulation avec des traces obtenues par mesures (Hikob FOX) pour différents liens off-body :  $R_1$  (bleue),  $R_2$  (rouge) et  $RSSI_{exp}$  (vert).

multiples comme suit :

$$h(\tau) = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \delta(\tau - \tau_k) \quad (3.5)$$

où  $K$  est le nombre de trajets,  $\alpha_k$  et  $\tau_k$  représentent l'amplitude et le délai du  $k^{eme}$  trajet.

La première méthode pour calculer le RSSI se fait avec la somme des contributions des trajets, tel que :

$$R_1 = \sum_{k=0}^{K-1} |\alpha_k|^2 \quad (3.6)$$

Cette première approche est simple à implémenter car elle prend en compte uniquement l'énergie cumulée des différents trajets. Cependant, elle est limitée car les délais des trajets ne sont pas pris en compte et donc, le RSSI calculé avec  $R_1$  aura des variations lentes. Or, le canal WBAN peut avoir des variations temporelles rapides générées par les évanouissements [Lauzier 13]. Pour prendre en compte cela, la deuxième méthode consiste à l'évaluation du RSSI en considérant les délais avec la réponse de transfert du canal dans le domaine fréquentiel ( $H(f)$ ) comme suit :

$$R_2 = |H(f)|^2 = \left| \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k e^{-2j\pi f \tau_k} \right|^2 \quad (3.7)$$

L'intérêt de la deuxième approche est de pouvoir calculer un RSSI qui soit proche de la réalité et qui considère les effets de l'affaiblissement de propagation, du shadowing du

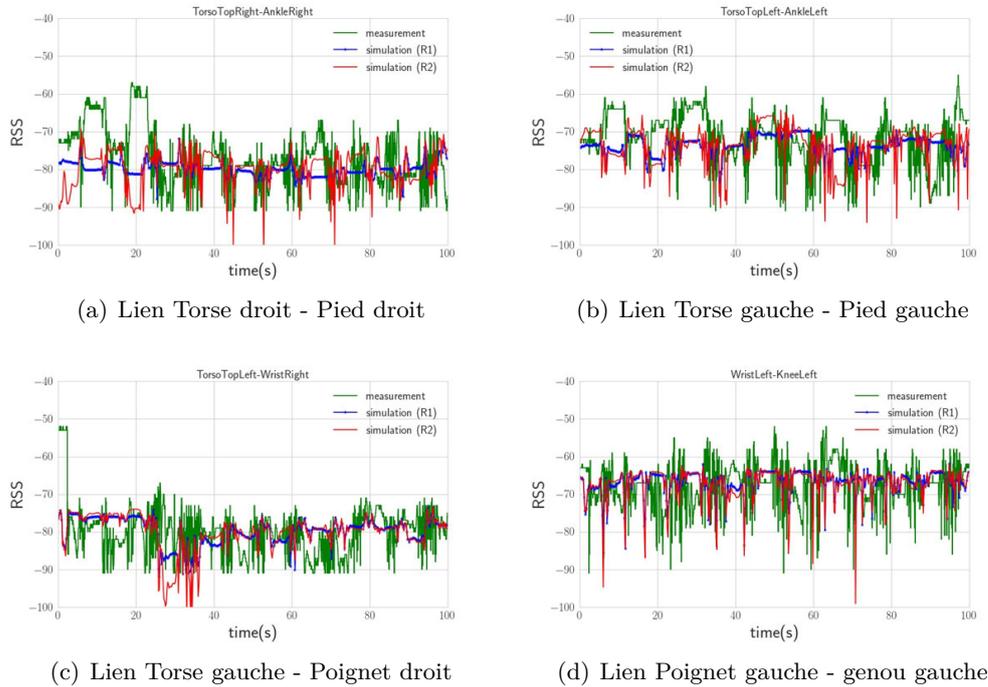


FIGURE 3.14 – Comparaison des RSSI calculés par simulation avec des traces obtenues par mesures (Hikob FOX) pour différents liens on-body :  $R_1$  (bleue),  $R_2$  (rouge) et  $RSSI_{exp}$  (vert).

corps et des multi trajets. Notez que ces deux modèles sont génériques et ils peuvent être calculés pour différents scénarios de mobilité.

**Validation.** Nous avons calculé le RSSI par des prédictions ray tracing et nous avons comparé ces résultats avec les traces expérimentales RSSI en NB de Hikob. Pour cela, l'environnement a été défini par rapport aux dimensions du gymnase de l'ENS. Le diagramme de rayonnement d'antenne des capteurs Hikob ne sont pas disponibles. Par conséquent, nous avons utilisé un modèle générique et peu complexe intégré en PyLayers (basé sur le standard [IEEEStd802.15.4 06]) où l'orientation est adaptée selon la position du capteur sur le corps [CORMORAN 16] [D2.6]. Pour réduire le temps de simulation, nous avons considéré la série de mesure S2.1a avec la simulation de 4 liens on-body (le torse droit avec les 4 ancrs) et 4 liens on-body choisis arbitrairement entre les nœuds placés dans des endroits statiques du corps (le torse droit et gauche) et des endroits plus mobiles (pieds et bras).

Les Figures 3.13 et 3.14 montrent les résultats de RSSI calculés pour les liens off-body et on-body respectivement. Nous pouvons observer pour toutes les figures la ressemblance entre les RSSI calculés par ray tracing et les mesures expérimentales. Dans le cas des liens off-body, les résultats confirment la dépendance du signal radio avec la distance et l'orientation du corps par rapport aux ancrs. En effet, la valeur du RSSI est plus forte lorsque le capteur du torse était à proximité des ancrs. De plus, ces résultats montrent l'avantage d'évaluer le RSSI en tenant compte des délais du canal avec  $R_2$ . En effet, le

RSSI calculé par  $R_2$  montre des variations temporelles assez proches de celles obtenues avec les mesures. Cependant, nous pouvons observer que le RSSI obtenu avec  $R_1$  varie beaucoup moins par rapport à celui obtenu par  $R_2$ . En particulier, nous pouvons observer que  $R_1$  dépend en grand partie de l'affaiblissement généré par la distance (pour tous les liens). En effet, lorsque la personne se déplace vers une ancre (cas du lien AP1-Torse droit à 20s (Figure 3.13 (a))), le RSSI augmente. A l'inverse, lorsque la personne s'éloigne de l'ancre (cas du lien AP2-Torse droit à 40s (Figure 3.13(b))), le RSSI est réduit. On peut noter que pour le lien entre l'ancre AP3 et le torse droit, il y a un décalage entre les mesures et les RSSI de la simulation. Ceci peut être dû à la puissance de transmission de l'ancre qui est plus faible que les autres. En effet, les capteurs Hikob peuvent être affectés par des variations de transmission lors de une expérimentation, à cause d'un gain d'antenne plus faible ou une batterie en fin de vie. Ce phénomène a été également observé par [Lauzier 13]. A l'inverse, dans les simulations tous les capteurs ont été définis avec exactement les mêmes paramètres.

Dans le cas de liens on-body (Figure 3.14), nous pouvons observer que le RSSI calculé avec  $R_1$  et  $R_2$  suivent le même comportement que pour les liens off-body. Dans le cas de  $R_1$ , on peut noter que le RSSI évolue avec l'affaiblissement (cas du lien torse gauche - poignet droit), mais aussi par le shadowing (cas des liens entre le torse et les pieds). Alors que les variations du RSSI obtenues par  $R_2$  sont plus proches de celles des mesures expérimentales. L'information apportée par  $R_2$  est importante car elle caractérise l'effet du mouvement de la marche (assez visible pour les liens qui considèrent les pieds). En effet, nous pouvons noter les périodes statiques et dynamiques lorsque la personne bougeait ou restait en repos devant une ancre.

A partir de ces résultats, nous avons décidé d'utiliser PyLayers principalement pour exploiter les traces expérimentales de la mobilité et du canal, ainsi que pour obtenir la réponse impulsionnelle du canal (en particulier le RSSI calculé avec  $R_2$ ) pour les liens WBAN.

## B. Implémentation de modules WBAN en WSNNet

WSNNet utilise un mode de simulation dit "à événements discrets" qui consiste à considérer que le système évalue son état à chaque apparition d'événement dans le temps. Par opposition à une simulation à temps continu, un simulateur à événements discrets peut donc économiser beaucoup de calculs intermédiaires et se concentrer uniquement sur les moments critiques de la simulation. Pour cela, il est capable de mettre en veille certains événements et les réveiller en fonction de la séquence d'activation des modules. Ainsi, la notion temporelle est considérée, mais aucune mise à jour du système simulé est sensée d'être faite en dehors de ces moments d'éveil. Dans le cadre de la simulation de notre réseau WBAN, ces événements sont principalement l'envoi et la réception des paquets, l'évolution de la position des nœuds et de l'environnement physique.

L'architecture de WSNNet est représentée sous forme de blocs qui modélisent le système à trois niveaux (Figure 3.12) : les propriétés du médium de la radio, le cœur de simulation et l'abstraction des nœuds simulés. Le cœur du simulateur permet de générer et traiter les événements de la simulation. Ceci est un élément clé de la performance du simulateur, car il détermine le degré de vitesse et l'efficacité des simulations. Le médium de la radio se compose de trois sous-blocs pour modéliser la propagation, les interférences et la modulation. Enfin, l'abstraction du nœud est constitué de trois blocs secondaires : i) *le*

*comportement* qui décrit la mobilité et l'environnement dans lequel les nœuds peuvent évoluer (par exemple, les obstacles, la température etc.); ii) *le hardware* qui définit les différentes propriétés physiques de chaque nœud (telles que la fréquence de transmission et réception, la puissance de transmission, la batterie); et iii) *le software* qui décrit les couches supérieures pour la communication (définis par les protocoles MAC, réseau et application).

WSNet possède une structure modulaire (nommé le *bundle*) où les nœuds sont représentés par un ensemble de couches superposées, qui communiquent directement avec les couches inférieures ou supérieures par l'intermédiaire de fonctions de gestion d'événements. Chaque couche correspond un modèle particulier, qui est programmé et compilé en C. Ces modèles comprennent les instances d'un protocole (comme l'ordonnement de nœuds par slots pour un modèle MAC de type TDMA), ou bien des calculs mathématiques simples ou statistiques (comme le calcul du PER au niveau de la couche radio en fonction du modèle de modulation utilisé). Cependant, c'est l'abstraction de la radio qui décide de la réception ou la non-réception des paquets, laissant à la couche MAC le rôle d'arbitrer l'accès au canal. Pour cela, la couche PHY est décomposée en cinq modules : *la propagation* qui calcule les effets du canal sur les transmissions en SNR; *l'interférence* qui calcule le SINR en fonction du type d'interférence considérée dans la simulation; *l'antenne* qui intègre les propriétés tels que le gain ou l'orientation pour le calcul du bilan de liaison; *la modulation* qui génère le BER en fonction du SNR; et *le protocole radio* qui permet de régler le débit, et de transmettre et recevoir les paquets en fonction du PER calculé.

Les nœuds sont instanciés et décrits avec un fichier XML qui permet de configurer une simulation. Par exemple, c'est là où l'on définit le nombre de nœuds pour simuler, les bibliothèques utilisées pour modéliser le médium de la radio et les nœuds (par exemple, pour la MAC, le routage, etc). Ainsi, le fichier XML permet de stocker un certain nombre d'informations précieuses pour l'initialisation des modules. Ces informations peuvent être ensuite complétées par des fichiers externes.

Dans ce cadre, nous avons implémenté plusieurs modules adaptés pour notre contexte de localisation avec les WBAN. Les différents modèles implémentés sont listés comme suit :

- **Mobilité des nœuds.** Pour ce module, nous avons implémenté deux modèles : un linéaire et un biomécanique. Le premier modèle a été considéré pour pouvoir faire des simulations avec des mouvements contrôlés. Pour cela, ce module peut faire bouger plusieurs nœuds avec des aller/retour en ligne droite entre deux points définis pour chacun, par exemple pour représenter le cas de deux mains qui s'éloignent et se rapprochent de manière linéaire. Le deuxième modèle (biomécanique) permet de récupérer les positions des nœuds à partir d'un fichier externe en suivant le format (*id du nœud, position x, position y, position z, timestamp*). Ainsi, ce modèle permet d'obtenir la séquence d'un mouvement réaliste et de le simuler avec WSNet. Ce choix a été fait d'une part parce que la modélisation biomécanique du corps est très complexe et difficile à implémenter et d'autre part, parce que nous souhaitons utiliser les traces de mobilité obtenues avec la campagne de mesures. Il faut noter que pour pouvoir exploiter ces modèles, il faut modifier le temps de mise à jour du simulateur pour la mobilité. En effet, le changement de position des nœuds est un événement de WSNet qui se déclenche par défaut tous les 200 ms (temps de base

défini dans le module *mobility.c* des fichiers source). Par conséquent, nous avons adapté ce temps par rapport au temps de rafraîchissement des traces : 1 ms.

- La modélisation de la propagation.** Afin de pouvoir évaluer nos protocoles de communication de manière réaliste, nous avons implémenté un mécanisme qui permet de simuler le canal on-body par un modèle théorique, et les canaux on-body, body-to-body et off-body avec la réutilisation des traces expérimentales ou simulées (par PyLayers). Le modèle empirique est basé sur le canal CM3 en UWB [Yazdandoost 09]. Ce modèle considère uniquement l'affaiblissement en fonction de la distance défini par  $PL_{on-Body}(d)[dB] = a * \log_{10}(d) + b + N$ , où  $a$  et  $b$  représentent des paramètres d'ajustement linéaire,  $N$  représente une variable aléatoire suivant une distribution gaussienne de moyenne nulle avec un écart-type  $\sigma_N$  et  $d$  représente la distance (en mm) entre les nœuds on-body. Pour utiliser ce modèle, il suffit de modifier ces paramètres par rapport à l'environnement de simulation à étudier [Yazdandoost 09], par exemple dans le cas d'une chambre anéchoïde  $a = 34$ ,  $b = -31,4$  et  $\sigma_N = 4,85$ . Il faut noter que nous avons implémenté d'abord le modèle CM3 pour se concentrer sur la simulation du canal on-body, mais il est possible d'implémenter le modèle CM4 pour le canal off-body (non réalisé). En ce qui concerne le modèle déterministe, nous utilisons d'abord PyLayers pour simuler le canal pour tous les liens (on-body, body-to-body, off-body). Puis, nous calculons pour chaque nœud les mesures du RSSI, du ToA, du SNR ou du BER à chaque timestamp de la simulation. Ainsi, WSNNet est capable de rejouer ces données avec des événements planifiés avec les timestamps, en utilisant des traces externes sous le format (*timestamp, id nœud émetteur, id nœud récepteur, donnée en réception*). Les valeurs du RSSI, SNR et BER permettent de vérifier la bonne réception du paquet par rapport à un seuil de réception ou le PER. Alors que le ToA est nécessaire pour l'évaluation des distances pour la localisation.

Comme expliqué avant, nous n'avons pas eu le temps de créer l'abstraction du récepteur pour pouvoir calculer la ToA, donc nous avons travaillé sous l'hypothèse que nos récepteurs sont synchronisés et sont capables de recevoir les impulsions au bon moment. Ainsi, le ToA est calculé à partir du temps de propagation du signal entre deux nœuds. Pour cela, WSNNet utilise le module *medium.c* qui permet d'obtenir le ToF du signal avec la formule suivante :  $derive(ns) = \frac{d(m)}{0.3(m/ns)}$ , où  $derive$  représente le temps de propagation en nanosecondes,  $d$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur en mètres et la valeur 0.3 correspond à la célérité en  $m \cdot ns^{-1}$ . Ceci est un problème car pour pouvoir obtenir une résolution de la distance de l'ordre de centimètres, il faut pouvoir travailler en picosecondes. En effet, si l'on prend le cas d'une distance d'un mètre, cela donne un temps de propagation de 3.33 ns. Cependant, WSNNet va modifier cette valeur à 3 ns car les variables de temps sont programmées en entiers. De plus, nous avons remarqué que la nanoseconde est la base de temps de travail de WSNNet et donc, modifier cette base impliquait modifier le cœur du système. Pour résoudre ce problème, nous considérons que toutes les positions doivent être calculées en millimètres. Ainsi, le résultat que nous allons obtenir va être donné en picosecondes  $derive(ps) = \frac{d(mm)}{0.3(m/ps)}$ . Pour illustrer cela, imaginons que cette fois-ci la distance est égale à 10 mm. Dans ce cas, WSNNet va utiliser toujours la même formule, mais nous allons interpréter le résultat en picosecondes. Cette modification est importante car elle nous permet de calculer

l'erreur générée sur l'estimation de distances en fonction de la mobilité dans les chapitres 4 et 5.

- **La couche radio.** Cette implémentation a été faite au niveau des modules de la radio et de la modulation basée sur le protocole [IEEEStd802.15.6 12] en IR-UWB (3.1 - 10 GHz, BW = 500 MHz). Nous avons implémenté trois modes de fonctionnement en modulation OOK : un mode par défaut (0.487 Mbps avec une sensibilité en réception de  $-91$  dBm) et deux modes à haut débit (7.8 Mbps avec une sensibilité en réception de  $-79$  dBm) et (15.6 Mbps avec une sensibilité en réception de  $-76$  dBm). Ensuite, nous avons intégré les résultats de ces études [Taparugssanagorn 10] et [Niemela 13] pour le calcul du BER en fonction du SNR obtenu à partir de deux modèles de canal (le modèle CM3 et le modèle CWC obtenu par mesure dans un milieu indoor (hôpital)). Ainsi, au niveau du module de la radio, nous sommes capables de modéliser la transmission et réception des paquets en fonction de la modulation choisie.
- **La couche MAC.** Pour ce module, nous avons implémenté un protocole basé sur le principe du TDMA où l'on suppose que la trame est synchronisée grâce à des paquets balises. Ce module a été adapté pour pouvoir travailler avec la couche application pour la transmission des paquets en broadcast ou en point à point. Pour cela, la trame est construite dynamiquement en fonction du nombre de nœuds, et la taille de chaque slot varie en fonction du type de paquet à transmettre. Dans notre contexte, nous avons 3 types de paquets tel que défini par le protocole 3-WR. De plus, l'ordonnancement est choisi pour chaque simulation et il doit être défini pour chaque nœud au niveau du XML de configuration. Le chapitre 5 va être consacré pour l'étude de l'ordonnancement des paquets 3-WR.
- **La couche application.** Ce dernier module est responsable de la génération du trafic de paquets dans le réseau. Dans notre contexte, nous l'avons adapté pour les applications de localisation où nous pouvons utiliser les protocoles 2-WR ou 3-WR pour l'estimation de la distance. De plus, l'estimation de la distance peut être paramétrée sans ou avec erreurs. Pour cela, l'erreur sur la distance est modélisé statistiquement avec une loi normale [Hamie 13c]. C'est à ce niveau que les nœuds sont définis comme des ancres ou des nœuds mobiles. En ce qui concerne le positionnement, nous avons considéré la possibilité de calculer les positions avec une approche de multilatération (par le TDOA) ou avec une approche statistique (par le filtre de Kalman). Pour cela, il faut déclarer la méthode à utiliser au niveau du XML. Le détail sur ces deux approches sera présenté dans le chapitre 5.

Pour chacune de ces couches, nous avons également développé le code pour générer les résultats statistiques sur le comportement du réseau. Ces résultats sont enregistrés dans différents fichiers à la fin de la simulation, que nous analysons avec MATLAB. Les différentes couches fournissent des paramètres différentes. Au niveau de la couche radio, nous pouvons obtenir le RSSI de tous les paquets reçus pour tous les nœuds, ainsi que le PER global et par nœud. Au niveau de la couche MAC, nous pouvons récupérer différentes informations réseau telles que la taille du paquet, l'id du nœud émetteur, le ToF et la séquence de la trame. Enfin, au niveau de l'application, nous pouvons recueillir les informations sur la performance de localisation pour chaque nœud ou de manière globale selon le protocole et l'algorithme utilisés, telles que les distances

estimées, les positions estimées, le nombre de positions estimées, le taux de succès de positionnement, le taux de succès d'estimation de distances, les taux d'erreurs sur les estimations de distance et de position. Tous ces résultats seront plus détaillés et exploités par les chapitres suivants.

#### 3.4.2 Architecture développée pour le co-simulateur

Comme évoqué précédemment, nous souhaitons utiliser PyLayers et WSNNet comme les outils principaux pour la simulation des applications de localisation avec les WBANs. D'une part, PyLayers fournit la réponse impulsionnelle du canal IR-UWB avec la mobilité des agents basée sur de traces de mouvement réalistes. D'autre part, WSNNet permet de personnaliser les couches supérieures pour faire des simulations à grande échelle. Ainsi, les modèles de canal des différents liens (on-body, off-body et body-to-body) générées par PyLayers peuvent fournir une base de travail pour l'évaluation des performances spécifiques WBAN et des études comparatives pour les nouveaux algorithmes et protocoles. Cependant, l'interfaçage entre ces deux simulateurs doit être bien planifié. Pour cela, nous avons considéré deux approches pour l'architecture de cette plateforme : soit par une simulation complète en temps réel ou soit par l'intermédiaire d'une base de données.

L'idée de la simulation en temps réel est de pouvoir implémenter un flux de travail comme celui de HarvWSNet [Didioui 13], où PyLayers et WSNNet peuvent fonctionner en même temps pour échanger des données avec des sockets réseau. Pour cela, la communication doit être gérée de manière unidirectionnelle où WSNNet devient le maître qui fait appel à des fonctions de PyLayers pour calculer un lien. Dans cette approche, on trouve une phase d'initialisation et une phase de simulation. Dans la première phase, WSNNet et PyLayers sont lancés en même temps que celui où les positions initiales des nœuds sont établies avec PyLayers. Ensuite, WSNNet devient le maître du temps pour la gestion des événements et la synchronisation des horloges. Dans la deuxième phase, nous commençons la simulation d'un scénario WBAN où la couche d'application est celle qui démarre la communication. Ainsi, lorsqu'un nœud essaie de calculer sa position, il doit commencer la transmission des paquets 3-WR. Pour cela, le nœud doit changer d'état (par exemple en mode TX) pour envoyer un paquet. Puis, la couche PHY s'occupera d'envoyer un paquet à PyLayers pour calculer la réponse impulsionnelle de canal pendant que WSNNet se met en mode attente. Une fois que ce résultat est calculé, PyLayers renvoie un paquet avec le canal à WSNNet pour continuer la simulation. Ainsi, ce processus peut se répéter périodiquement jusqu'à la prochaine mise à jour des positions.

L'avantage de cette approche est que le canal peut être calculé en temps réel et éviter de générer des traces pour chaque simulation, ce qui permet de réduire l'utilisation de la mémoire. Néanmoins, le grand défi de cette co-simulation est la gestion du temps. En effet, PyLayers et WSNNet doivent synchroniser leurs horloges pour maintenir la logique de la communication. Cependant, cela n'est pas facile à réaliser car il y a une abstraction du temps différente dans les différentes couches, notamment pour WSNNet. Le fait de mettre en veille WSNNet pour le calcul de chaque lien enlève l'intérêt de la simulation à événements discret qui est sensée être rapide.

Pour cette raison, nous avons considéré une approche avec l'utilisation d'une base de données. Cette base a pour objectif de stocker les résultats calculés avec le simulateur PyLayers. Ainsi, WSNNet peut accéder à cette base sur demande des événements créés par les couches supérieures. Pour cela, WSNNet doit configurer au niveau du xml, les fichiers à

## Chapitre 3. Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels

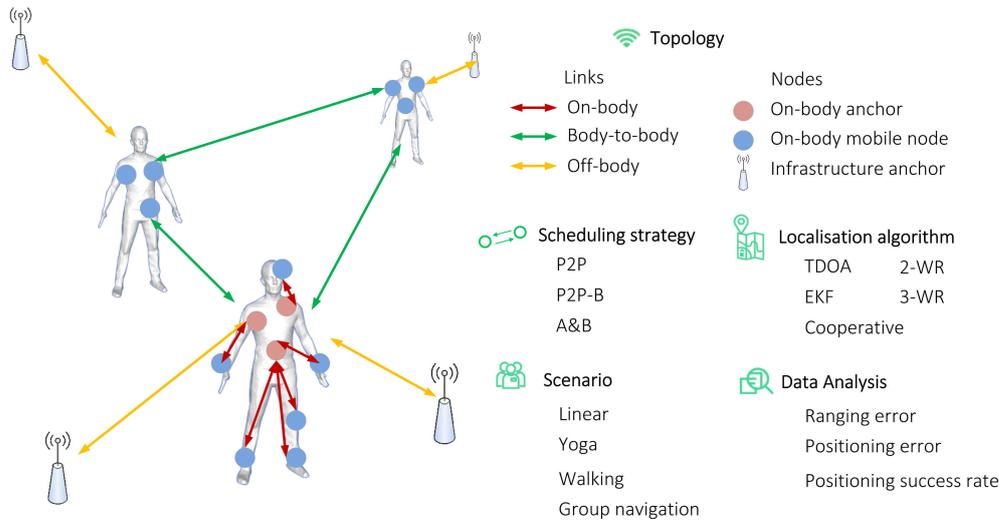


FIGURE 3.15 – Image qui montre la totalité des scénarios possibles avec le co-simulateur PyLayers-WSNet.)

utiliser pour pouvoir utiliser les traces de la mobilité et du canal (expérimental ou simulé) synchronisées par PyLayers. La Figure 3.12 montre l'architecture du co-simulateur en suivant cette approche. Il faut noter que dans ce travail de thèse, seule la réception du RSSI a été évaluée à partir de traces expérimentales des dispositifs Hikob ou avec les prédictions calculées par PyLayers. Pour le calcul du ToA, du SNR et BER, nous avons considéré l'abstraction d'une radio non-cohérente en réception. Cependant, nous n'avons pas eu le temps de l'implémenter du côté PyLayers. En revanche, nous avons implémenté quelques modèles statistiques pour considérer l'erreur d'estimation de distance des liens on-body, body-to-body et off-body, basés sur le travail de [Hamie 13b].

### 3.4.3 Synthèse des scénarios d'étude possibles

Avec cet outil, il est possible de simuler des applications de localisation en considérant deux technologies radio (en IR-UWB [IEEEStd802.15.6 12] et en NB [IEEEStd802.15.4 06]) et des traces de mobilité réalistes pour le référencement temporel-spatial. Pour cela, nous avons intégré plusieurs scénarios qui prennent en compte la capture de mouvement mono-utilisateur et la navigation en groupe, en considérant des modèles de mouvement dynamiques (comme la marche et le jogging) et quasi-statiques (comme le Yoga ou le Kung Fu). Ainsi, nous couvrons une variété de contextes applicatifs, par exemple la navigation individuelle (marche en milieu urbain) ou en groupe (pour les pompiers ou les soldats) et la reconnaissance et l'apprentissage de gestes (pour la rééducation et le sport). Dans ce contexte, ce simulateur permet d'étudier la conception des protocoles de communication dédiés à la localisation, soit par une approche de transmission point à point (P2P) ou en broadcast (tel que proposé par [Macagnano 07] avec le protocole Aggregated & Broadcast (A&B)). De plus, il est possible de modifier la topologie en choisissant le nombre des nœuds et des ancres, ainsi que leur positions. De plus, nous pouvons évaluer les performances des algorithmes d'estimation de distance (avec 2-WR et 3-WR) et de positionnement (avec le TDOA ou le filtre de kalman) par l'observation de différents métriques, telles que

### 3.5. Conclusion et discussion sur l'exploitation de ces outils

---

l'erreur d'estimation sur la distance et la position ou le taux de positions estimées. La Figure 3.15 synthétise l'ensemble de possibilités de ce co-simulateur. Par la suite, nous allons utiliser cette figure pour rappeler et montrer les paramètres qui sont considérés pour chaque étude de cette thèse.

### 3.5 Conclusion et discussion sur l'exploitation de ces outils

Dans ce chapitre, nous avons présenté le travail réalisé pour la création de deux outils nécessaires pour l'étude de la localisation avec les WBANs. Pour cela, nous avons montré que les éléments de base sont la modélisation du canal, de l'environnement, de la biomécanique du corps et la mobilité sociale, ainsi que le simulateur qui les exploite. Nous avons montré que plusieurs travaux de la littérature ont traité ces différents aspects, mais n'ont jamais été utilisés ensemble avec un seul outil. C'est pour cela que nous avons proposé la réalisation d'une campagne de mesures multi-standard sans précédent et le développement d'une plateforme de simulation qui considère les différents problématiques pour la communication des WBANs.

Pour la campagne de mesures nous nous avons fixé trois objectifs : i) fournir des vecteurs de test réalistes pour évaluer, comparer et démontrer nos différents protocoles de communication dédiées pour la localisation ; ii) soutenir le développement d'un outil de simulation déterministe (en fournissant des données de mobilité réalistes pour faire de prédictions de canal et pouvoir les comparer avec des traces radio réalistes) ; et iii) mettre à disposition une base de données de mesure unique à la communauté de recherche. Pour cela, nous avons considéré différents scénarios d'application pour représenter la capture du mouvement individuelle et la navigation en groupe. Puis, nous avons utilisé une technologie de capture de mouvement (Vicon) pour générer les traces de mobilité et trois plateformes radio (en NB (Hikob) et en UWB (TCR et BeSpoon)) pour obtenir les traces du canal. Ensuite, nous avons présenté les étapes de post-traitement appliquées sur nos données brutes pour les rendre exploitables. En particulier, nous avons montré le processus de post-synchronisation en utilisant les traces du RSSI et de la vérité-terrain avec différents exemples.

Enfin, nous avons également présenté notre contribution sur le développement d'un simulateur WBAN qui renforce les capacités intrinsèques de deux outils (WSNet et PyLayers) dans une approche de bout en bout et cross-layer. Dans ce contexte, nous avons montré le niveau actuel de réalisation de ce co-simulateur. D'une part, la composante de simulation physique est évaluée avec PyLayers, qui exploite les traces de mobilité de notre campagne pour générer des prédictions ray tracing pour les différents liens du contexte WBAN. Pour cela, PyLayers permet de faire l'abstraction du corps avec un modèle multi-cylindrique qui est animé avec nos modèles de mobilité. Ce modèle est indépendant de l'environnement qui peut être paramétré librement. Ainsi, nous pouvons calculer le RSSI en réception à partir des prédictions du canal simulé et le partager avec WSNet. Du côté WSNet, nous avons implémenté des nouveaux modules pour traiter la localisation avec les WBANs. Au niveau du canal, nous avons ajouté trois modèles : i) un modèle empirique basé sur le canal CM3 du standard [Yazdandoost 09], ii) un modèle simulé qui permet de récupérer le RSSI calculé par PyLayers et iii) un modèle expérimental qui permet de rejouer les traces de mesures obtenues avec Hikob. Au niveau de la radio, nous avons implémenté le standard [IEEEStd802.15.6 12] en IR-UWB et une modulation OOK avec deux modes de fonctionnement (par défaut et à haut débit).

### Chapitre 3. Outils développés pour l'étude du mouvement avec des réseaux corporels

---

Au niveau de la MAC, nous avons implémenté un protocole basé sur le TDMA qui peut changer son stratégie d'ordonnancement (P2P ou A&B) en fonction de la taille du réseau et l'algorithme de localisation choisi. Enfin, au niveau de l'application, nous avons implémenté les protocoles 2-WR et 3-WR pour le calcul de la distance. Puis, nous avons ajouté la possibilité de calculer les positions avec une méthode géométrique (par TDOA) ou avec un algorithme statistique (par le filtre de Kalman). Enfin, l'interfaçage entre ces deux simulateurs se fait avec une base de données partagée qui est mise à jour par PyLayers. Puis, WSNet peut récupérer ces données librement pour les rejouer dans la simulation.

# 4 Caractérisation de l'erreur sur l'estimation de la distance avec UWB

*"Whoever best describes the problem,  
is the one most likely to solve it"*

*The Back of the Napkin*  
— Dan Roam, *American business analyst*

## Sommaire du chapitre

---

4.1	Introduction . . . . .	78
4.2	Impact du délai de réponse sur l'estimation de la distance de nœuds mobiles	78
4.2.1	L'erreur de localisation en fonction du retard des paquets . . . . .	79
4.2.2	Simulation et résultats . . . . .	80
4.3	Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste . . . . .	82
4.3.1	Scénario d'étude et modèle de mobilité . . . . .	82
4.3.2	Modélisation de l'impact de la mobilité . . . . .	83
4.3.3	MAC conventionnel avec des stratégies d'ordonnancement . . . . .	84
4.3.4	Simulation & Évaluation des performances . . . . .	85
4.3.5	Conclusion sur l'impact de la mobilité . . . . .	91
4.4	Caractérisation de l'erreur de localisation entre la mobilité et le canal avec différents types des liens . . . . .	92
4.4.1	Configuration du réseau . . . . .	92
4.4.2	Évaluation du positionnement et des distances . . . . .	93
4.4.3	Modèle de mobilité . . . . .	93
4.4.4	Simulation & Résultats . . . . .	94
4.4.5	Conclusion . . . . .	97
4.5	Conclusion du chapitre . . . . .	99

---

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder la problématique de la caractérisation de l'erreur générée par la mobilité et le canal WBAN sur l'estimation de la distance. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2.3, les défis considérés dans la littérature pour la capture du mouvement avec IR-UWB sont principalement la synchronisation d'horloge, les transmissions en NLoS et l'interférence [Soganci 11]. En plus de ces effets, lorsque l'on considère la mobilité, les nœuds embarqués sur le corps se déplacent tout le temps et leur position change avec chaque paquet transmis, ce qui peut introduire une erreur sur l'estimation [Hamie 13c] [Alam 14]. Cela a aussi été montré dans [Chóliz 11] que le problème de la mobilité avait un impact pour la localisation d'un piéton à l'intérieur d'une chambre. Les auteurs présentent les problématiques de l'erreur sur la distance liées à la latence du positionnement et à la complexité de calcul des algorithmes de localisation dans le cas de nœuds mobiles des réseaux capteurs (WSN). Ainsi, ces travaux nous montrent qu'il existe un enjeu à considérer sur la gestion des délais de réponse au niveau de la couche MAC et la performance du système de localisation. Cependant, aucune analyse rigoureuse n'a été fournie pour les différentes couches protocolaires. C'est pour cela que nous souhaitons étudier et quantifier l'impact des erreurs de la mobilité et le canal dans le contexte WBAN, spécialement pour la conception de protocoles cross-layer.

Ce chapitre est composé de 3 sections. La section 4.2 permet d'introduire les principales problématiques à considérer au niveau de la MAC pour la localisation de nœuds mobiles. Après ces résultats préliminaires, la section 4.3 montre un modèle théorique qui prend en compte l'impact de la vitesse sur l'estimation de la distance. Dans ces deux premières études, nous considérons le cas idéal de transmission pour étudier uniquement l'impact de la mobilité. Enfin, la section 4.4 a pour vocation de quantifier l'erreur d'estimation sur la distance liée à la mobilité et le canal en fonction du scénario et des algorithmes de localisation utilisés. Dans ce travail, nous utiliserons une radio IR-UWB pour la couche PHY, telle que proposée par le standard [IEEEStd802.15.6 12]. De plus, nous considérons un protocole MAC de réservation basé sur le TDMA qui prend en compte les différentes contraintes des transmissions coopératives et des applications de localisation des WBAN.

### 4.2 Impact du délai de réponse sur l'estimation de la distance de nœuds mobiles

Comme expliqué dans l'introduction (Section 1.3.1), un des objectifs de ce travail de thèse est de proposer de nouveaux algorithmes coopératifs permettant la localisation, et plus spécifiquement la capture du mouvement dans un WBAN. Dans ce cas, la posture des nœuds sur le corps peut être estimée avec un système radio impulsionnel IR-UWB [Xiao 10]. En effet, la haute résolution temporelle des impulsions permet de calculer la distance entre deux nœuds avec l'estimation du temps de vol (ToF) de trois paquets, tels que définis par le protocole Three Way Ranging (3-WR) [Macagnano 07]. Cependant, cette technique a été initialement proposée dans le cas des WSNs, où les nœuds ont une mobilité réduite et où la synchronisation entre les ancres et les nœuds est plus facile à atteindre et à maintenir. Or, dans le cas d'un WBAN, les nœuds ne sont pas statiques. Par conséquent, les distances varient au cours de la mesure, ce qui induit des erreurs de positionnement.

Dans cette section, on souhaite mettre en évidence l'impact de la mobilité sur

## 4.2. Impact du délai de réponse sur l'estimation de la distance de nœuds mobiles

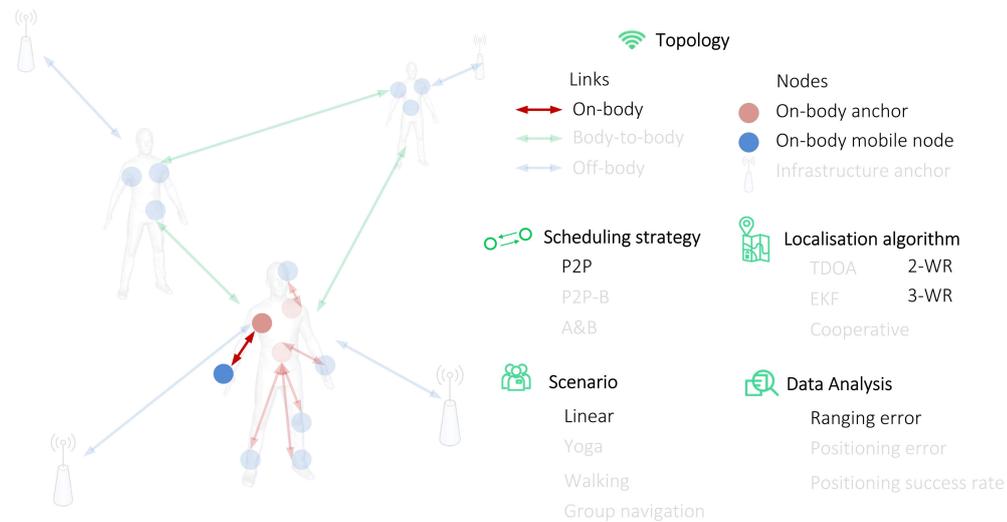


FIGURE 4.1 – Scénario d'étude pour montrer l'impact de la mobilité sur l'estimation de la distance de deux nœuds WBAN

l'estimation de la distance. Pour cela, on définit un modèle du système avec le scénario LSIMC étudié par simulation. Puis, nous complétons l'étude avec un modèle théorique pour quantifier l'erreur sur l'estimation de la distance en fonction de la vitesse des nœuds et les délais des paquets 3-WR.

### 4.2.1 L'erreur de localisation en fonction du retard des paquets

Dans la littérature, nous pouvons trouver peu de travaux qui prennent en compte la mobilité des nœuds pour les applications de localisation avec un WBAN en IR-UWB. Dans [Chóliz 11], la localisation de plusieurs personnes à l'intérieur d'un bâtiment en utilisant un réseau de capteurs (WSN) est étudié. Cette étude montre que le positionnement des nœuds peut être affecté par le délai des paquets transmis. En particulier, l'erreur sur les estimations de positions augmente (de 20 à 100 cm) lorsque le nombre de nœuds à localiser et le nombre d'ancres augmente. Cependant, chaque personne a été représentée dans la simulation par un seul capteur et la mobilité a été basée sur un modèle simulé (Random Walk Model) où la vitesse des personnes était choisie aléatoirement et changeait à différentes périodes. Et donc, la capture du mouvement n'a pas été traitée. En outre, [Hamie 13b] a proposé de nouveaux algorithmes de localisation avec les WBAN IR-UWB en utilisant un modèle de mobilité bio-mécanique simulé. Cependant, ce travail s'est concentré uniquement sur la modélisation des erreurs d'estimation et l'optimisation du calcul de positions sans regarder les effets de la mobilité au niveau MAC.

Afin d'évaluer l'impact de la mobilité sur l'estimation de la distance, nous avons réalisé une étude préliminaire sur la capture du mouvement individuelle [Guizar 14a]. Pour cela, le réseau est modélisé par deux nœuds : un capteur mobile  $i$  et un nœud ancre  $j$  placé sur un endroit fixe du corps humain (Figure 4.1). L'ancre connaît sa position par rapport à un système de coordonnées 3D globale, tandis que le nœud mobile n'a pas de connaissance de sa propre position.

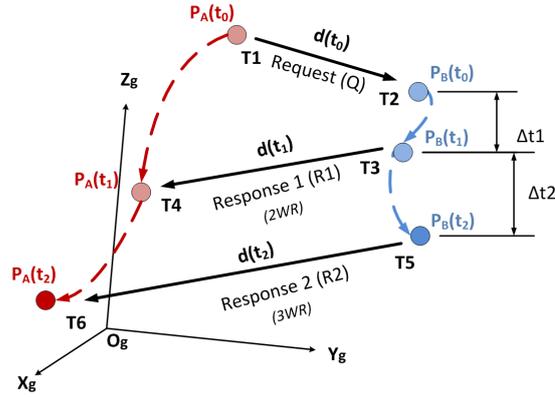


FIGURE 4.2 – Protocole Three Way Ranging

#### 4.2.2 Simulation et résultats

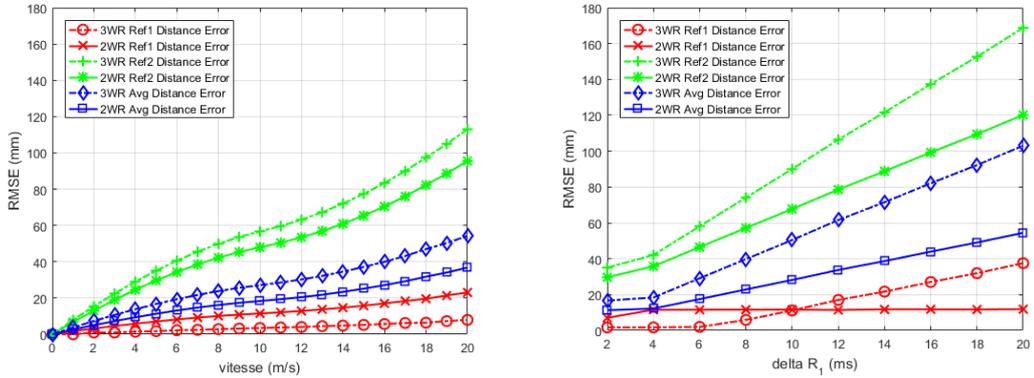
Dans cette étude, on suppose que le capteur suit un mouvement linéaire (de 30 cm) de type aller-retour à l'échelle du corps. Nous utilisons un simulateur à événements discrets WSNNet [Chelius 15] adapté à ce scénario, tel que décrit dans le chapitre 3. Pour se concentrer uniquement sur l'impact de la mobilité, on considère un canal en LoS sans pertes de paquets et on suppose que les récepteurs sont capables de détecter le premier chemin des impulsions. Au niveau de la couche MAC, nous définissons un protocole basé sur TDMA et l'on suppose qu'il est synchronisé par balise. Trois périodes de transmissions sont réservées dans la même trame pour les paquets des protocoles 2-WR et 3-WR (section 2.3.1). Nous évaluons l'impact de la mobilité en comparant la distance estimée et la distance de référence. Pour cela, nous utilisons le RMSE (erreur quadratique moyenne). Avec cette structure, nous considérons l'étude de deux types de paramètres pour l'estimation de la distance (Figure 4.2) : i) la vitesse de nœuds et ii) les valeurs des retards  $\Delta t1$  et  $\Delta t2$ .

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum^N |d_{ref} - d_{est}|^2}{N}} \quad (4.1)$$

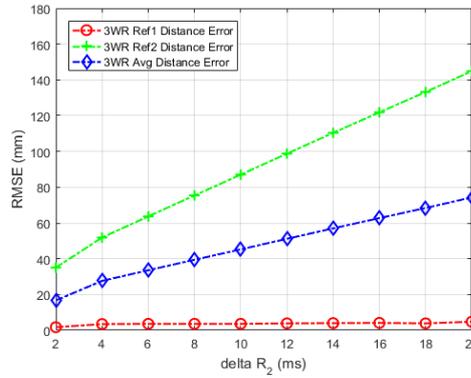
Les distances évoluant durant la mesure, la définition de la distance de référence n'est pas immédiate. Nous avons ainsi considéré trois distances de références  $d_{ref}$  différentes :  $d_{ref1}$  représente la distance au début du premier paquet requête  $Q_{ij}$ ,  $d_{ref2}$  est la distance lors de la réception du dernier paquet réponse et  $d_{avg}$  représente la moyenne entre  $d_{ref1}$  et  $d_{ref2}$ .

La Figure 4.3 montre, comme nous l'attendions, que le RMSE augmente avec la vitesse et les temps de réponse ( $\Delta t1$  et  $\Delta t2$ ). En effet, plus ces paramètres augmentent, plus les nœuds se déplacent lors d'une transaction 3-WR et donc, on détecte différents ToF pour la même distance, ce qui introduit une erreur d'estimation. De plus, nous pouvons observer que  $d_{ref1}$  est la distance la mieux estimée. Ceci s'explique par le fait que les transmissions se produisent plus au début de la trame et donc, les distances parcourus sont encore proches de  $d_{ref1}$ . Si nous comparons 2-WR et 3-WR, la Figure 4.3(a) montre que selon la vitesse et le point de référence choisi ( $d_{ref2}$  et  $d_{avg}$ ), le protocole 2-WR peut être mieux que le 3-WR, si l'on considère uniquement la mobilité (i.e. avec l'horloge du

## 4.2. Impact du délai de réponse sur l'estimation de la distance de nœuds mobiles



(a) RMSE de la distance estimée avec 2-WR/3-WR en fonction de la vitesse (b) RMSE de la distance estimée avec 2-WR/3-WR en fonction du délai  $\Delta t_1$



(c) RMSE de la distance estimée avec 3-WR en fonction du délai  $\Delta t_2$

FIGURE 4.3 – Impact de la mobilité sur l'estimation de la distance. Les délais sont modélisés par le nombre de slots (1 slot  $\approx$  2 ms). Pour les figures (b) et (c), la vitesse a été fixé à 5 m/s.

nœud et de l'ancre bien synchronisées). Ainsi, le canal peut être moins utilisé avec un paquet en moins pour chaque distance estimée.

Lorsque l'on compare les effets des délais, nous pouvons observer sur les résultats de la Figure 4.3 que le délai  $\Delta t_1$  (Figure 4.3(b)) génère une erreur plus importante sur l'estimation de la distance ( $< 200$  mm) que ceux générés par la vitesse (Figure 4.3(a)) et le délai  $\Delta t_2$  (Figure 4.3(c)). Notez que la vitesse a été fixé à 5 m/s pour le calcul du RMSE en fonction de  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  (figures 4.3(b) et 4.3(c)). La différence entre  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  s'explique par le fait que la distance est liée à l'estimation du ToF (qui dépend de  $\Delta t_1$ ), alors que  $\Delta t_2$  est utilisé pour compenser les dérives d'horloge et donc,  $\Delta t_2$  a moins d'impact sur l'estimation de la distance. Alors que dans le cas de la vitesse,  $\Delta t_1$  avait été fixé au délai d'un slot ( $\approx 2$  ms) et par conséquent, le RMSE produit par la vitesse ne dépasse pas les 120 mm d'erreur même avec une vitesse de 20 m/s (tel que la vitesse maximale d'un poing selon les Guinness World Records [Liddell 15]).

De cette étude, nous pouvons conclure que lorsque l'on considère uniquement les effets

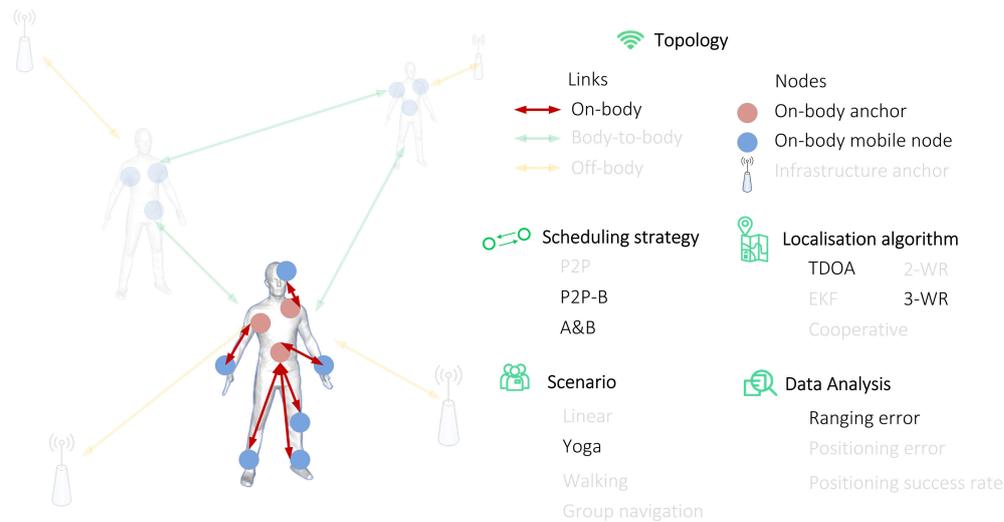


FIGURE 4.4 – Scénario d'étude pour la validation du modèle théorique

de la mobilité, la précision sur la distance dépend de la vitesse et des délais de réponse. En particulier, le délai  $\Delta t_1$  pour envoyer la première réponse  $R_{1,j_i}$  a plus d'impact que le temps pris par  $\Delta t_2$  pour la deuxième réponse  $R_{2,j_i}$ . Cependant, cette précision peut se dégrader en fonction du nombre de nœuds dans le réseau qui peut augmenter ces délais de réponse. De plus, il faut noter que pour l'estimation d'une position, chaque nœud d'un WBAN doit estimer sa distance avec plusieurs ancres. Dans la pratique, si l'on considère que les nœuds sont positionnés à différents endroits du corps, nous pouvons attendre différentes vitesses ayant un impact sur l'estimation de la distance en fonction des délais de réponse. Par la suite, nous allons quantifier cet impact dans le cas d'un scénario de mobilité réaliste avec plusieurs nœuds mobiles.

### 4.3 Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste

Dans cette étude, nous évaluons l'impact de la vitesse des nœuds sur l'estimation de la distance pour la localisation d'un WBAN. Pour cela, nous proposons un modèle théorique qui prend en compte cet impact dans le cas d'un scénario de mobilité réaliste avec plusieurs nœuds placés dans le corps [Guizar 15b]. Ensuite, on montre le rapport entre la vitesse de nœuds et les distances estimées en évaluant ce modèle théorique par simulation.

#### 4.3.1 Scénario d'étude et modèle de mobilité

Dans cette étude, on considère un réseau composé de 4 ancres et 4 nœuds mobiles (Figure 4.4). Les ancres sont positionnées sur les parties statiques du corps : le côté droit du torse ( $A_1$ ), le côté gauche du torse ( $A_2$ ), la hanche gauche ( $A_3$ ) et le dos ( $A_4$ ). Les nœuds mobiles sont positionnés sur le bras droit ( $N_5$ ), le bras gauche ( $N_6$ ), le pied droit ( $N_7$ ) et la tête ( $N_8$ ). Ainsi, nous sommes en mesure de calculer la position et la vitesse instantanée de chaque nœud. Avec cette configuration, nous considérons un modèle d'activité de Yoga réaliste obtenue par mesure. L'intérêt de ce scénario pour cette

### 4.3. Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste

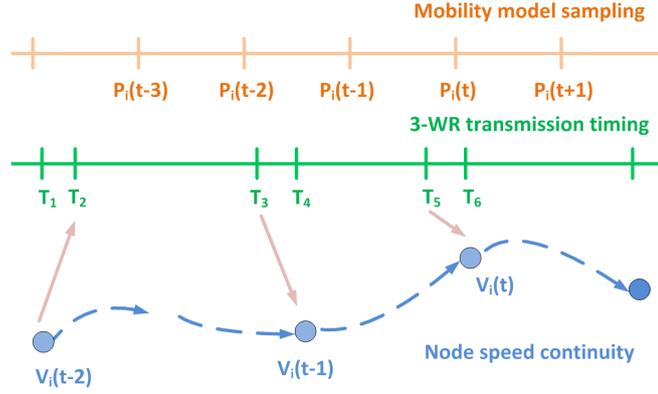


FIGURE 4.5 – Mise en pratique du modèle proposé

étude est que l'alternance de présence ou d'absence de mouvement permet de séparer l'impact de la vitesse des autres facteurs d'erreur sur la précision de l'estimation et donc, l'impact de la vitesse sera plus visible avec notre modèle théorique. La série de positions statiques (imitant des postures de yoga (e.g. mettre les deux pieds ensemble et les mains sur les côtés du corps)) est réalisée au même endroit, donc seuls les membres bougent par rapport au corps.

#### 4.3.2 Modélisation de l'impact de la mobilité

Nous considérons un réseau corporel sans fil embarqué sur une personne dans un environnement indoor. Ce réseau est complètement maillé et tous les nœuds ( $N_T$ ) peuvent communiquer directement deux à deux. Ainsi, la distance entre un nœud ancre  $j$  et un nœud mobile  $i$  est évaluée avec le protocole 3-WR. Nous rappelons que cette estimation est calculée à partir des instants d'émission ( $T_1$ ,  $T_3$  et  $T_5$ ) et de réception ( $T_2$ ,  $T_4$  et  $T_6$ ) des signaux IR-UWB comme suit :

$$\hat{d}_{ij}(t) = \frac{1}{2}c [((T_4 - T_3) + (T_2 - T_1)) - ((T_6 - T_5) - (T_4 - T_3))] \quad (4.2)$$

Or, il faut remarquer que les paquets 3-WR sont transmis à des instants différents (Figure 4.2) pendant que les nœuds se déplacent et par conséquent, la distance initiale (à estimer) est affectée par différents déplacements ( $t_0 \Rightarrow t_1$  et  $t_1 \Rightarrow t_2$ ), ce qui conduit à trois distances différentes ( $d_{ij}(t_0)$ ,  $d_{ij}(t_1)$  et  $d_{ij}(t_2)$ ) pour la même estimation.

Pour quantifier l'impact de la vitesse sur l'estimation de la distance, nous considérons un repère cartésien à trois dimensions ( $O_g, x_g, y_g, z_g$ ). Soit  $\vec{P}(t) = \overrightarrow{OgP}$ , le vecteur position entre le point d'origine et la position d'un nœud à l'instant  $t$ . Notons  $\vec{d}_{ij}(t) = \vec{P}_j(t) - \vec{P}_i(t)$  le vecteur distance entre le nœud  $i$  et l'ancre  $j$  lors de l'envoi d'un paquet 3-WR et  $\vec{V}_i(t) = \frac{d(\vec{P}_i(t))}{dt}$  la vitesse instantanée du nœud  $i$  à l'instant  $t$ . Ainsi, l'équation (4.2) peut être exprimée sous la forme :

$$\hat{d}_{ij}(t) = \frac{1}{2}c [((T_4 - T_3) + (T_2 - T_1)) - ((T_6 - T_5) - (T_4 - T_3))]$$

$$\hat{d}_{ij}(t) = \frac{1}{2} [(\|\vec{d}_{ij}(t_1)\| + \|\vec{d}_{ij}(t_0)\|) - (\|\vec{d}_{ij}(t_2)\| - \|\vec{d}_{ij}(t_1)\|)]$$

$$\hat{d}_{ij}(t) = \frac{1}{2} \left[ \|\vec{d}_{ij}(t_0)\| + 2\|\vec{d}_{ij}(t_1)\| - \|\vec{d}_{ij}(t_2)\| \right] \quad (4.3)$$

où  $\|\vec{d}_{ij}(t)\|$  représente la norme du vecteur distance en termes de vitesse de propagation du pulse (c) et les instants d'émission et de réception d'un paquet, par  $\|\vec{d}_{ij}(t)\| = c * (T_{Rj} - T_{Ei})$ . Or, dans ce modèle, nous cherchons à exprimer  $\hat{d}_{ij}(t)$  en fonction de la vitesse des nœuds et de la distance initiale  $\vec{d}_{ij}(t_0)$ . Pour cela, nous définissons la vitesse moyenne du nœud  $i$  à l'instant  $t$  comme  $\vec{V}_i(t) = \frac{\vec{P}_i(t) - \vec{P}_i(t-1)}{\delta t}$ . Ainsi, le vecteur distance  $\vec{d}_{ij}(t_1)$  peut être représenté après son premier mouvent  $t_0 \Rightarrow t_1$  par la somme des vecteurs de vitesse ( $\vec{AD} = \vec{AB} + \vec{BC} - \vec{DC}$ ) comme suit :

$$\begin{aligned} (\vec{P}_j(t_1) - \vec{P}_i(t_1)) &= (\vec{P}_j(t_0) - \vec{P}_i(t_0)) - (\vec{P}_i(t_1) - \vec{P}_i(t_0)) \\ &\quad + (\vec{P}_j(t_1) - \vec{P}_j(t_0)) \\ \vec{d}_{ij}(t_1) &= \vec{d}_{ij}(t_0) - \vec{V}_i(t_1)(T_4 - T_1) + \vec{V}_j(t_1)\Delta t_1 \end{aligned}$$

En appliquant le même principe pour  $\vec{d}_{ij}(t_2)$ , on obtient le système d'équations à trois inconnues suivant :

$$\begin{cases} \vec{d}_{ij}(t_0) = \vec{P}_j(t_0) - \vec{P}_i(t_0) \\ \vec{d}_{ij}(t_1) = \vec{d}_{ij}(t_0) - \vec{V}_i(t_1)(T_4 - T_1) + \vec{V}_j(t_1)\Delta t_1 \\ \vec{d}_{ij}(t_2) = \vec{d}_{ij}(t_1) - \vec{V}_i(t_2)(T_6 - T_4) + \vec{V}_j(t_2)\Delta t_2 \end{cases} \quad (4.4)$$

En pratique (Figure 4.5), ce système peut s'exprimer avec une première approximation ( $(T_4 - T_1) \approx \Delta t_1$  et  $(T_6 - T_4) \approx \Delta t_2$ ), si nous négligeons la vitesse d'un nœud sur le corps ( $< 20$  m/s) par rapport à la vitesse de propagation de la vitesse d'une impulsion (c) lors de la transmission d'un paquet [Brown 99]. Ainsi, le système d'équations devient :

$$\begin{cases} \vec{d}_{ij}(t_0) = \vec{P}_j(t_0) - \vec{P}_i(t_0) \\ \vec{d}_{ij}(t_1) = \vec{d}_{ij}(t_0) - (\vec{V}_i(t_1) - \vec{V}_j(t_1))\Delta t_1 \\ \vec{d}_{ij}(t_2) = \vec{d}_{ij}(t_1) - (\vec{V}_i(t_2) - \vec{V}_j(t_2))\Delta t_2 \end{cases} \quad (4.5)$$

Il faut noter que c'est ce dernier modèle d'équations que nous allons valider et utiliser par la suite pour quantifier l'impact de la vitesse des nœuds.

### 4.3.3 MAC conventionnel avec des stratégies d'ordonnement

Pour un positionnement dans un espace à trois dimensions, le nœud doit estimer sa distance avec  $m$  ancres ( $m \geq 4$ ), puis calculer sa position avec un algorithme de positionnement (par exemple avec le TDOA [Di Benedetto 04]). Cependant, lorsque le nombre de nœuds à localiser augmente, l'ordonnement des paquets 3-WR devient crucial en raison du possible délai des réponses pour chaque estimation de distance. Ce problème va être traité dans le Chapitre suivant. Nous considérons une couche MAC classique basée sur le TDMA contenant les slots nécessaires à la localisation individuelle de tous les nœuds mobiles. Puis, nous implémentons deux stratégies d'ordonnement (Figure 4.6) au niveau MAC [Maman 08b] [Macagnano 07] adaptées à notre scénario d'étude (à partir de l'étude réalisée dans les Chapitres 5.2 et 5.3)

### 4.3. Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste

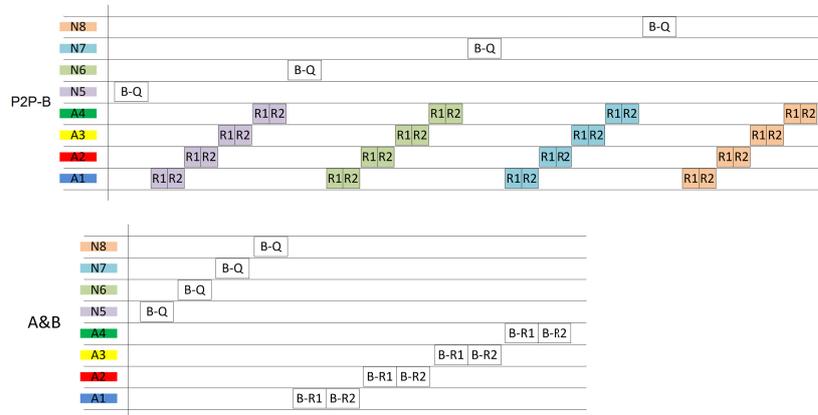


FIGURE 4.6 – Schéma sur les algorithmes d'ordonnancement P2P-B et A&B

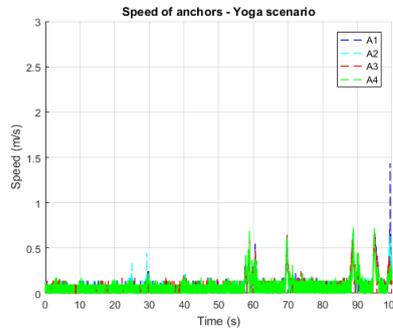


FIGURE 4.7 – Vitesse des ancrs on-body

- **Positionnement des nœuds par ordre en broadcast P2P-B** où chaque nœud envoie un paquet Requête  $Q_i$  en Broadcast à son tour à toutes les ancrs. Puis, chaque ancre répond à chaque nœud avec les deux réponses ( $R1_{ij}$ ) et ( $R2_{ij}$ ) consécutivement.
- **Agrégé et en Broadcast (A&B)** où toutes les requêtes ( $Q_i$ ) sont d'abord transmises en broadcast. Ensuite, chaque ancre  $j$  collecte les ToA de chaque requête et puis il transmet une réponse agrégée ( $R1_j$ ) pour tous les nœuds, suivie par une deuxième réponse ( $R2_j$ ) en Broadcast. Notons que A&B réduit la durée de la trame car les réponses sont agrégées, mais il augmente le délai du  $\Delta t1$  car il faut attendre la réception de toutes les requêtes avant d'envoyer la première réponse.

#### 4.3.4 Simulation & Évaluation des performances

Dans ce travail, nous utilisons le même simulateur que dans la section précédente (4.2.2) avec la même couche PHY. Au niveau MAC, nous avons implémenté un protocole basé sur TDMA, ainsi que les algorithmes P2P-B et A&B. Enfin, nous avons mis en place un modèle de mobilité qui permet d'exploiter les traces du scénario Yoga pour les 100 secondes d'acquisition. Avec ce framework, nous évaluons l'erreur sur la distance au cours du temps entre la distance réelle et la distance estimée en fonction de la vitesse

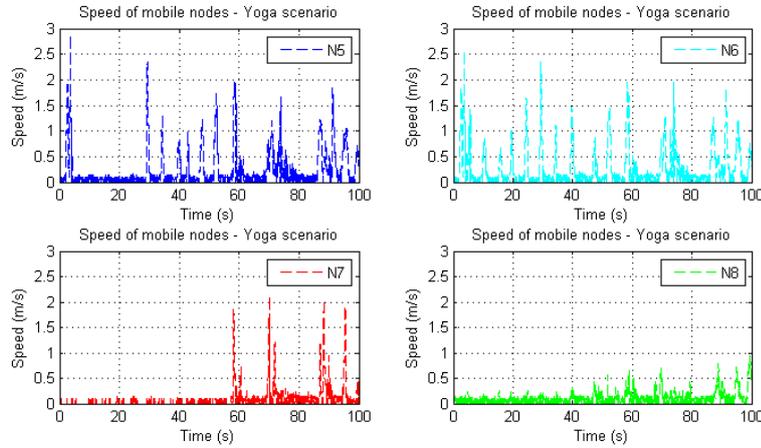


FIGURE 4.8 – Vitesse des nœuds mobiles

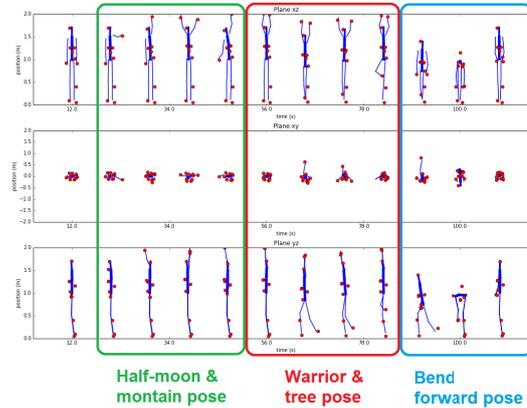


FIGURE 4.9 – Séquence des positions de yoga effectuées

des nœuds et du délai des paquets (selon l'algorithme d'ordonnancement utilisé).

### A. Relation entre la vitesse des nœuds et la précision de distance

Tout d'abord, nous avons caractérisé le modèle de mobilité considéré. Nous avons représenté sur la Figure 4.8 l'évolution de la vitesse des nœuds (obtenue à partir du mouvement réel). Nous pouvons y retrouver l'alternance de mouvement et de pause observés lors de l'exercice du Yoga (Figure 4.9). A l'inverse, les nœuds ancrés sont quasi-statiques (Figure 4.7). Par conséquent, l'estimation des distances va être impactée principalement par le mouvement des nœuds mobiles et les nœuds concernés varient au cours du temps.

Ensuite, nous évaluons par simulation l'erreur d'estimation sur les distances et nous quantifions son impact sur la conception de la couche MAC. Comme notre réseau est composé de 4 ancrés et 4 nœuds mobiles, la durée de la trame TDMA dépend de la stratégie utilisée, cette durée est de  $T_{P2P-B} \approx 54$  ms pour P2P-B et  $T_{A\&B} \approx 18$  ms pour A&B. Les résultats des Figures 4.10(a) et 4.10(b) montrent l'erreur sur la distance obtenue par simulation avec P2P-B et A&B respectivement, lorsque les nœuds mobiles

### 4.3. Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste

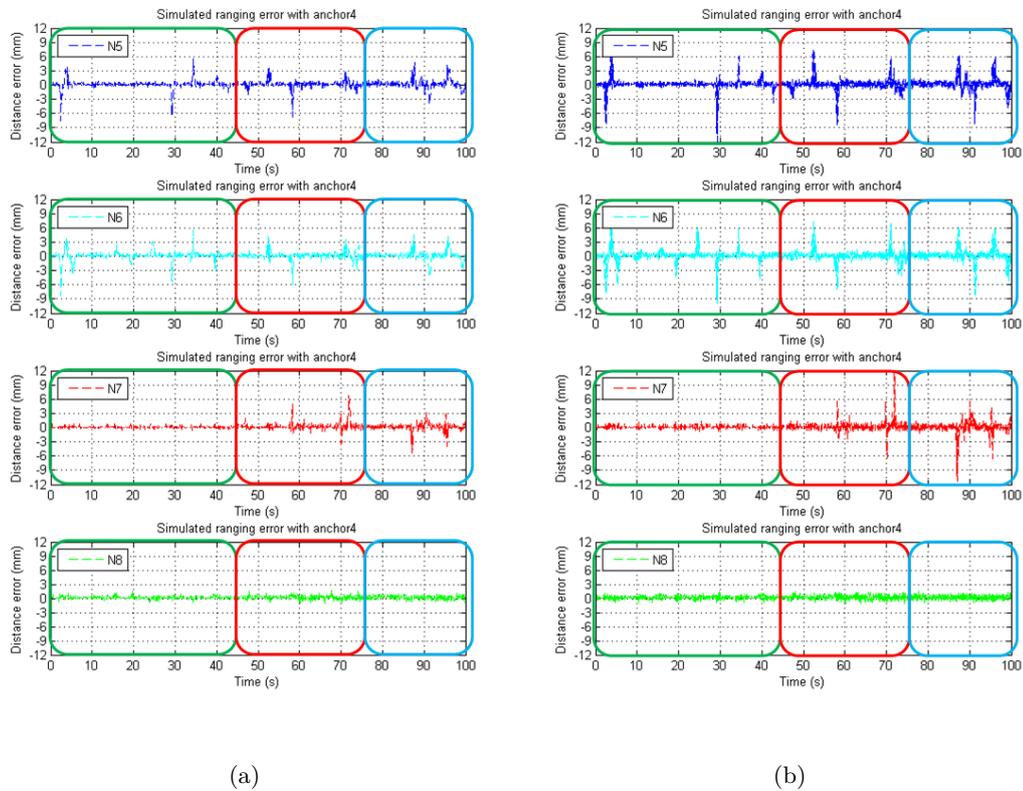


FIGURE 4.10 – Comparaison de l'erreur sur la distance par simulation entre les nœuds mobiles et  $A_4$  avec (a) P2P-B et (b) A&B avec affichage des trois périodes principales d'activité : Sb1 (0-50)s, Sb2 (50-70)s et Sb3 (70-100)s

tentent d'estimer leur distance avec l'ancre  $A_4$ . Ces deux courbes montrent un résultat très intéressant, à savoir que l'erreur sur la distance (pour les deux stratégies) suit l'évolution de la position des nœuds (Figure 4.9). Ainsi, nous pouvons observer trois périodes principales d'activité : Sb1 (0-50)s, Sb2 (50-70)s et Sb3 (70-100)s.

- Pour Sb1, le porteur réalise les postures appelées Half moon et Mountain (Figure 4.9) où il a levé et baissé plusieurs fois les deux mains au dessus de sa tête. En conséquence, ce sont les nœuds des mains ( $N_5$  et  $N_6$ ) qui subissent le plus d'erreurs de variation ; tandis que les nœuds du pied ( $N_7$ ) et de la tête ( $N_8$ ) restent quasi-statiques.
- Dans Sb2, la personne réalise un étirement des jambes pour faire la posture du guerrier, ce qui se traduit par une erreur plus importante sur l'estimation de  $N_7$ , liée à un mouvement plus rapide avec un déplacement de grande amplitude par rapport aux bras. On peut noter que, à la fin cette phase, le nœud du pied ( $N_7$ ) s'éloigne et se rapproche des ancrs, ce qui fait que la distance passe rapidement de sous-évaluée à sur-évaluée.
- Finalement, pour Sb3, la personne se penche en avant pour toucher ses pieds avec ses mains (bend forward pose). Ici, les nœuds mobiles se rapprochent des ancrs,

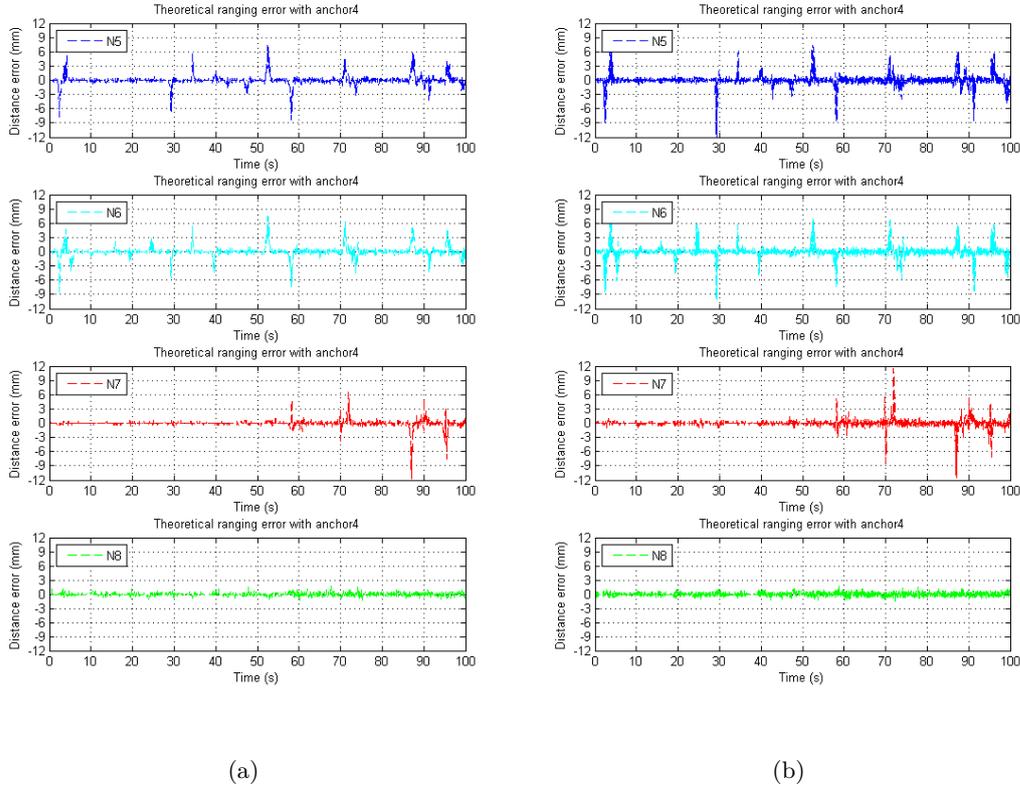


FIGURE 4.11 – Comparaison de l'erreur sur la distance théorique entre les nœuds mobiles et  $A_4$  avec (a) P2P-B et (b) A&B

ce qui conduit à des erreurs d'estimation pour tous les nœuds.

## B. Validation du modèle théorique

Dans cette étude, nous souhaitons quantifier théoriquement l'erreur entre la distance initiale  $\|\vec{d}_{ij}(t_0)\|$  et la distance estimée  $\hat{d}_{ij}(t)$  (Équation 4.3). Cette erreur théorique est comparable avec celle obtenue par simulation (Figures 4.10 et 4.11). Pour cela, on fixe les valeurs de  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  avec les délais respectifs pour une trame avec P2P-B et A&B. Nous pouvons constater que comme pour l'erreur simulée, l'erreur théorique (Figure 4.11) est corrélée avec l'évolution de la vitesse des nœuds (Figure 4.8).

En outre, nous pouvons observer qu'il existe une relation entre la variation des distances réelles avec  $A_4$  (Figure 4.12) et l'erreur théorique (Figure 4.11). En fait, lorsque les nœuds et les ancres s'éloignent (resp. se rapprochent), il existe une augmentation (resp. un affaiblissement) de la distance estimée par simulation, ce qui produit une erreur théorique négative (resp. positive). Or, ce type d'information est important à détecter et collecter pour faire un contrôle sur l'estimation des distances. En effet, si l'on dispose d'un modèle de l'erreur (par exemple obtenue empiriquement) en fonction de la vitesse et les délais, lors de l'estimation de distances, on peut savoir si les nœuds se rapprochent ou s'éloignent grâce à l'historique des distances estimées. Ainsi, on peut savoir si l'erreur est positive ou négative pour ensuite le compenser sur l'estimation.

### 4.3. Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste

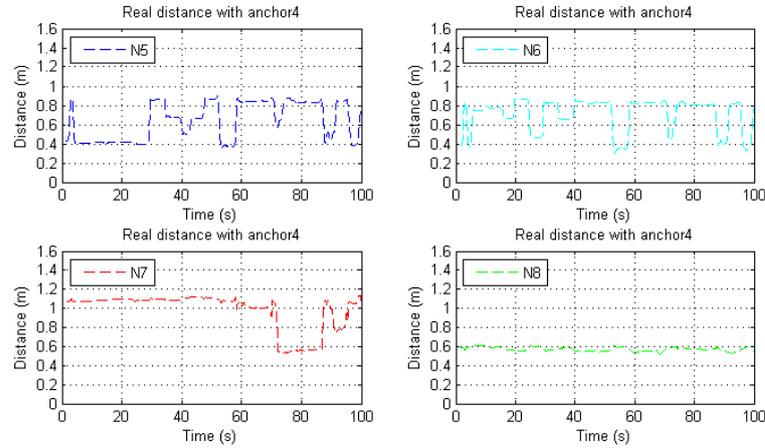


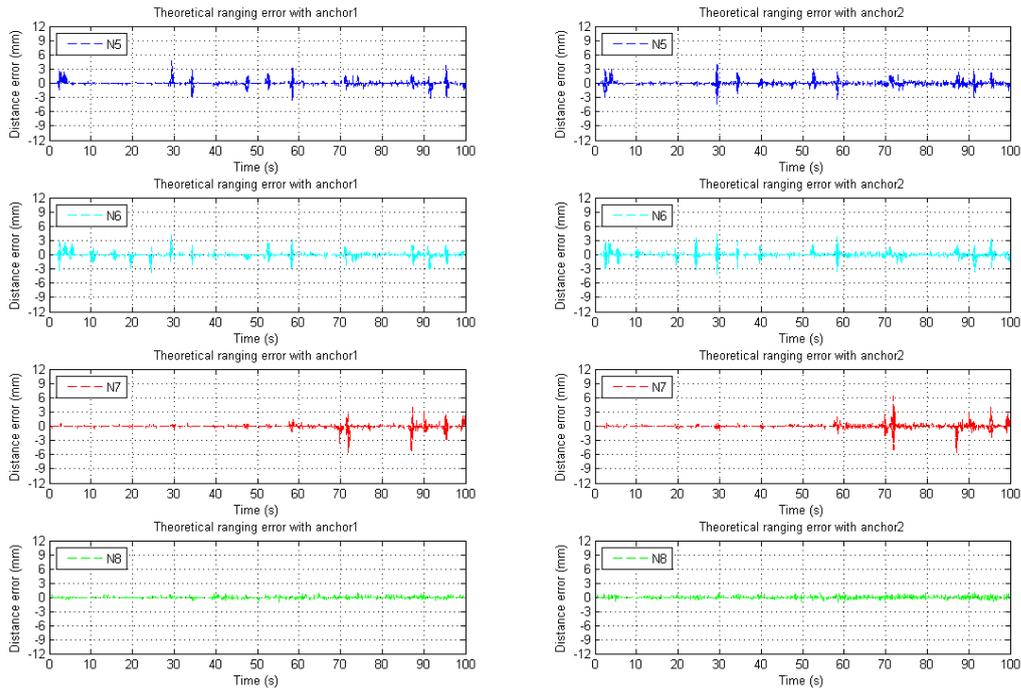
FIGURE 4.12 – Évolution de la distance réelle entre les nœuds et l'ancre  $A_4$

### C. Comparaison entre le modèle théorique et les simulations

A ce stade de notre étude, nous pouvons noter qu'il existe une différence entre les erreurs obtenues par simulation et par la théorie pour les deux stratégies. Cette différence est due aux limites de la simulation pour exploiter le modèle de mobilité. Si l'on compare dans la Figure 4.10 l'erreur obtenue par simulation entre P2P-B et A&B, nous observons que A&B donne visiblement un niveau d'erreur plus grand comparé à celui obtenu avec P2P-B. En fait, P2P-B réalise un sous-échantillonnage du mouvement, alors que A&B détecte les postures avec plus de détails. Or, les délais de A&B sont plus petits ( $\tau_{trame} \approx 18$  ms) que ceux de P2P-B ( $\tau_{trame} \approx 54$  ms), ce qui veut dire que l'erreur avec A&B est influencée principalement par le mouvement des nœuds. Dans ce scénario, lorsque la personne bouge entre deux postures de Yoga, la vitesse varie rapidement avant de revenir statique. Par conséquent, A&B est capable de détecter ces variations et avoir un niveau d'erreur plus réaliste (proche du résultat théorique), alors que l'erreur obtenue avec P2P-B est affectée par le sous-échantillonnage des mouvements donnant l'impression qu'il y a moins d'erreur. Si l'on compare l'erreur théorique entre P2P-B et A&B, nous pouvons noter que l'effet de sous-échantillonnage de P2P-B est encore présent (spécialement pour  $N_7$ ) mais avec moins d'impact. Cette différence est due au problème d'échantillonnage entre le modèle de mobilité utilisée dans la simulation et la durée de la trame de P2P-B.

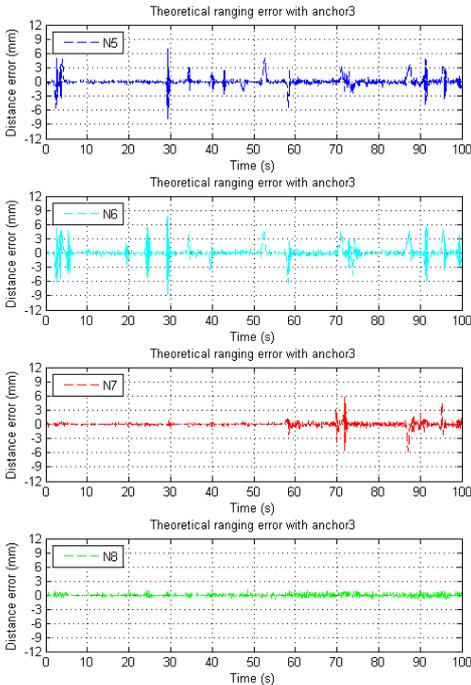
Pour illustrer cela, la Figure 4.13 montre l'erreur théorique avec les délais du P2P-B pour l'estimation des distances avec  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ . Nous pouvons observer que le niveau de l'erreur théorique évolue graduellement avec chaque ancre en fonction de la vitesse des nœuds et les délais ( $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$ ). Cependant, ceci n'est pas le cas pour la simulation qui dépend de la durée de la trame et l'échantillonnage du modèle de mobilité. En fait, lors de la conception des protocoles MAC par simulation, il est nécessaire de prendre en compte la résolution du modèle de mobilité qui va définir l'échantillonnage du changement des positions pendant la simulation (dans notre cas  $T_{vicon} = 10ms$ ). Or, si la durée d'une transaction 3-WR est inférieure à 10 ms, le niveau d'erreur ne sera pas affecté par le mouvement, étant donné que la simulation modifie les positions des nœuds de façon discrète en fonction de l'échantillonnage de la mobilité. Par conséquent, si l'on considère ce problème avec plusieurs ancres, nous pouvons nous attendre à avoir le même niveau

# Chapitre 4. Caractérisation de l'erreur sur l'estimation de la distance avec UWB



(a)

(b)



(c)

FIGURE 4.13 – Comparaison de l'erreur sur la distance théorique avec P2P-B entre les nœuds mobiles et (a)  $A_1$ , (b)  $A_2$  et (c)  $A_3$

### 4.3. Quantification de l'erreur de mobilité sur l'estimation de distance dans le cas d'un scénario réaliste

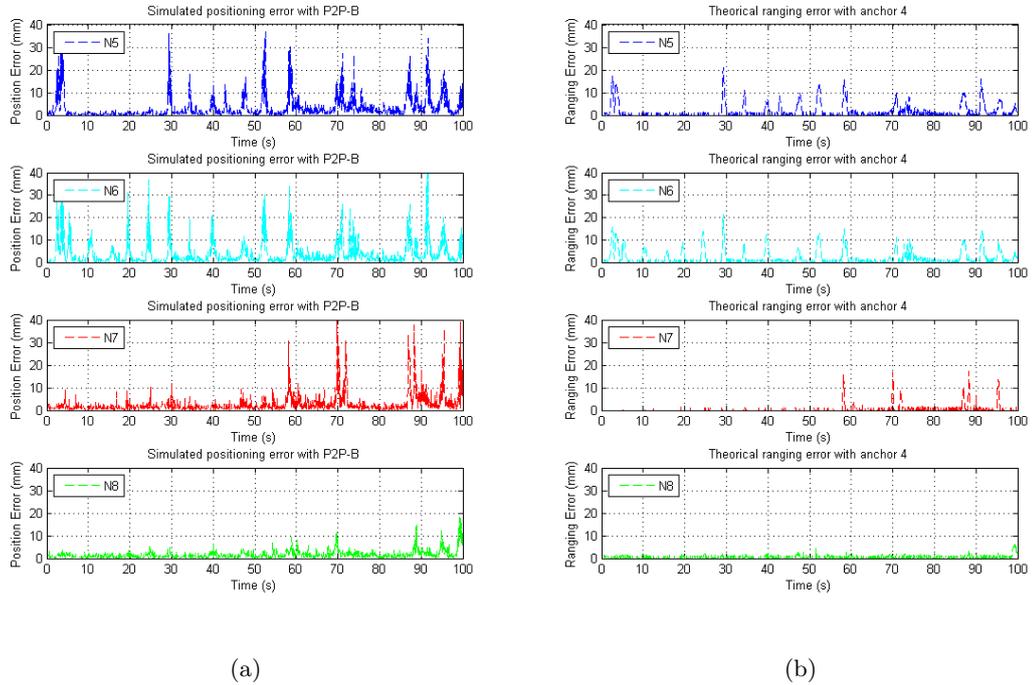


FIGURE 4.14 – Comparaison entre (a) l'erreur sur la position estimée avec P2P-B par simulation et (b) l'erreur sur la distance normalisée théorique entre les nœuds mobiles et  $A_4$ .

d'erreur sur les estimations de distances qui s'effectuent au cours du même intervalle. Ainsi, nous pouvons conclure que dans le cas d'un modèle de mobilité avec une résolution discrète, il vaut mieux prendre en compte notre modèle pour obtenir une meilleure précision sur les estimations de distance.

#### D. Impact de la vitesse des nœuds sur l'estimation de la position

Pour compléter l'étude, nous avons évalué la précision d'une position obtenue grâce à 4 distances estimées par simulation (Figure 4.14(a)) avec P2P-B et TDOA. Puis, on compare l'erreur du positionnement avec l'erreur sur la distance normalisée entre les nœuds et  $A_4$  (Figure 4.14(b)). Nous pouvons observer la forte corrélation entre l'erreur de positionnement et l'erreur théorique de distance. Cependant, il faut noter que l'erreur sur la position est plus élevée à cause des erreurs cumulées avec toutes les ancres lors du calcul des positions avec TDOA. En outre, les résultats montrent que les erreurs sur l'estimation de la distance ( $< 2$  cm) et du positionnement ( $< 5$  cm) sont plus faibles par rapport à la distance parcourue (40 à 120 cm) (Figure 4.12), et présente une variation corrélée avec la vitesse des nœuds (Figure 4.8).

#### 4.3.5 Conclusion sur l'impact de la mobilité

Dans cette section, nous avons présenté l'impact de la vitesse sur l'estimation des distances des nœuds mobiles d'un WBAN avec IR-UWB. Le but était de mieux comprendre les différents facteurs clés à considérer pour la conception des protocoles MAC dédiés aux

applications de localisation. Cet impact a été modélisé avec un modèle théorique de la transaction 3-WR qui prend en compte la vitesse et les délais des paquets. Ainsi, l'erreur a été quantifiée d'abord par un modèle linéaire, puis pour un modèle de mobilité basé sur un scénario de Yoga réaliste. Nous avons évalué le niveau d'erreur sur la distance estimée par simulation avec deux stratégies d'ordonnancement au niveau MAC : P2P-B et A&B. L'un des résultats principaux de ce travail est l'observation d'une corrélation entre la distance et l'erreur théorique. En effet, nous avons montré que l'erreur était négative (resp. positive) lorsque les nœuds s'éloignent (resp. se rapprochent). Sachant que l'historique des distances estimées permet de savoir si les nœuds se rapprochent ou pas, nous pouvons compenser l'erreur de la mobilité avec un modèle empirique modélisant l'erreur en fonction de la vitesse de nœuds et le délai.

Enfin, nous avons montré par les résultats théoriques que la vitesse des nœuds (et le modèle de mobilité associé) a un impact sur la conception des stratégies MAC et l'estimation du positionnement. En particulier, l'erreur sur la position est une erreur cumulée des erreurs de distance. Dans l'étude suivante, nous allons étendre notre analyse en prenant aussi en compte le canal de propagation pour pouvoir comparer le niveau d'erreur produit par la mobilité et les variations du canal.

### 4.4 Caractérisation de l'erreur de localisation entre la mobilité et le canal avec différents types des liens

Dans cette section, en plus de l'erreur de distance produite par la mobilité des nœuds, nous souhaitons considérer l'impact du canal WBAN pour la localisation [Ouni 15]. D'une part, comme expliqué dans les études précédentes (Sections 4.2 et 4.3), la mobilité des nœuds a un impact sur l'estimation de la distance entre un nœud qui veut calculer sa position et les nœuds de référence. D'autre part, les variations du canal liées aux effets de masque produits par le corps et les multi-trajets peuvent aussi gêner la détection du ToA des pulses. Cependant, comme les expérimentations avec une radio impulsionnelle sont difficiles à réaliser (par exemple par le manque d'un dispositif qui intègre le standard IEEE802.15.6), la plupart des travaux [Ben Hamida 10] [Chóliz 11] [Hamie 13c] [Bharadwaj 14] se concentrent sur des études théoriques avec des hypothèses peu réalistes ou une abstraction imprécise des communications sans fil. De plus, cette limitation nous oblige souvent à traiter une problématique au niveau d'une seule couche. Pour ces raisons, nous proposons de traiter le problème de localisation des WBANs en prenant en compte toutes les couches protocolaires avec un scénario réaliste. Pour cela, nous avons envisagé pour cette étude un scénario de navigation en groupe réaliste (CGN) composé par trois WBANs qui communiquent à travers les différents liens on-body, body-to-body et off-body. Cette étude a été faite en collaboration avec Télécom ParisTech et nos contributions ont concerné la conception des couches PHY et MAC, ainsi que l'interfaçage entre PyLayers et WSNNet pour l'exploitation de la base de données présentée dans le chapitre précédent.

#### 4.4.1 Configuration du réseau

Dans ce travail, nous considérons trois WBANs avec une communication totalement maillée avec deux types de nœuds, comme présenté dans la Figure 4.15 : les nœuds mobiles qui sont placés sur le corps sans aucune connaissance de leur propre position et

#### 4.4. Caractérisation de l'erreur de localisation entre la mobilité et le canal avec différents types des liens

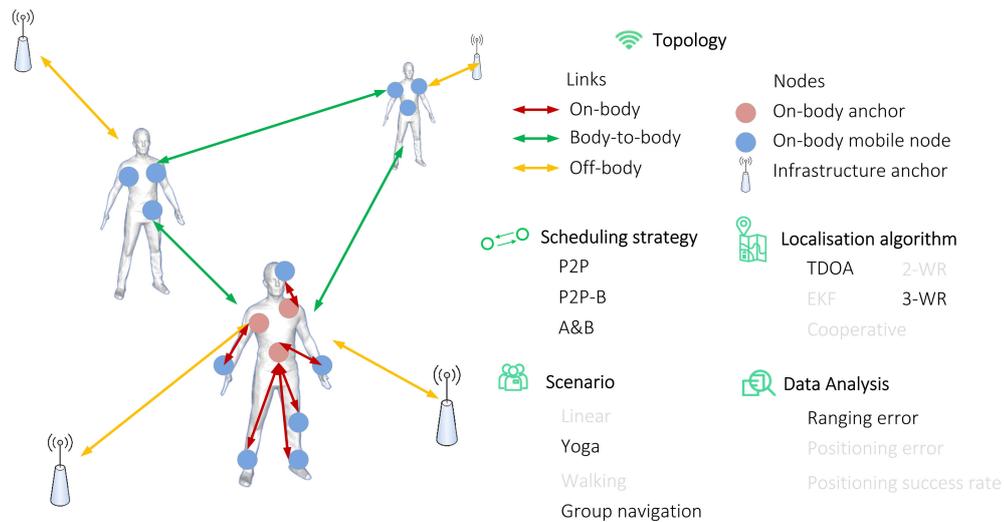


FIGURE 4.15 – Scénario d'étude avec la représentation des trois types de liens : on-body (ligne rouge), inter-body (lignes vertes) et off-body (lignes jaunes). Les nœuds mobiles (en bleu) se positionnent par rapport aux ancres fixes.

les nœuds de référence qui sont fixés dans l'environnement ayant connaissance de leur position à tout moment. Ces nœuds communiquent à travers trois types de liens : les liens on-body pour la communication entre les nœuds d'un même WBAN, les liens inter-body pour connecter les nœuds entre différents WBANs et les liens off-body pour permettre l'échange de paquets avec les nœuds fixes dans l'infrastructure. Un groupe d'ancres fixes définit un système de coordonnées globales (GCS) capable de localiser le groupe des WBAN qui peuvent se positionner relativement entre eux. Dans ce système, tous les nœuds communiquent en point à point avec une radio IR-UWB, pour estimer les ToA avec le protocole 3-WR (décrit dans le Chapitre 2.3.1). Pour éviter les interférences entre les WBANs, on utilise une couche MAC basé sur le TDMA et on suppose que la trame est synchronisée grâce à une balise. Dans cette étude, nous nous référons à une localisation non-coopérative (resp. coopérative) lorsque les nœuds réalisent les transmissions 3-WR uniquement avec les ancres (resp. avec les ancres et les autres nœuds).

#### 4.4.2 Évaluation du positionnement et des distances

Une fois que toutes les distances entre les nœuds avec les ancres et/ou avec les autres nœuds sont estimées avec 3-WR, les positions des nœuds pourront être calculées avec un algorithme de localisation. Cependant, le trafic du réseau augmente en fonction du nombre de dispositifs à localiser et le protocole MAC utilisé (unicast ou broadcast). Pour cette étude, nous utilisons trois stratégies d'ordonnancement, les deux stratégies (P2P-B et A&B) de notre étude précédente (Section 4.3.3), ainsi qu'une stratégie de transmission classique pair à pair (P2P) où chaque couple de nœuds réalise des échanges 3-WR (ceux-ci vont être présentés plus en détail dans les Chapitres 5.2 et 5.3).

#### 4.4.3 Modèle de mobilité

Le modèle de mobilité pour cette étude a été obtenue par mesure à partir de la campagne de mesure CORMORAN (Section 3.4). Pour ce cas, on considère un scénario

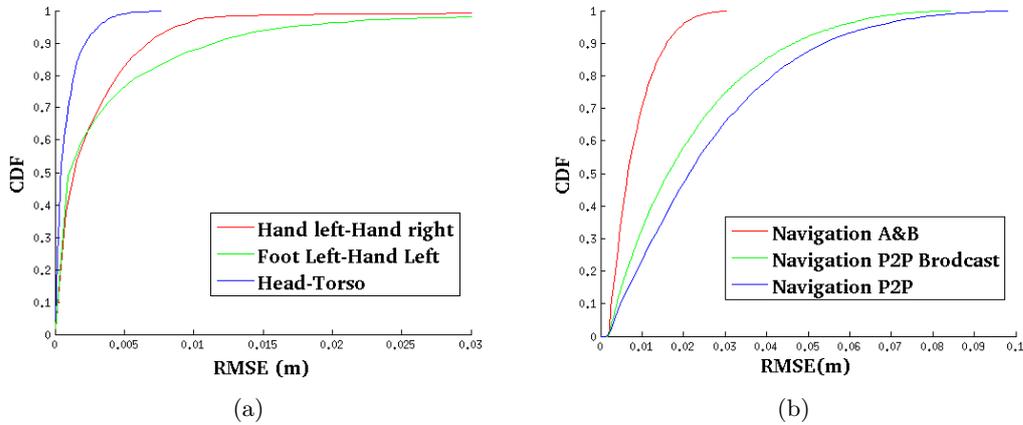


FIGURE 4.16 – CDF de l'erreur quadratique (RMSE) sur l'estimation de distance avec le scénario Yoga (cas LSIMC). (a) RMSE des différents liens on-body et (b) RMSE avec les différents stratégies d'ordonnancement.

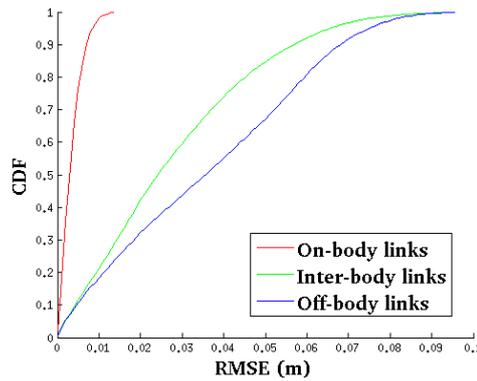


FIGURE 4.17 – CDF de l'erreur quadratique (RMSE) sur l'estimation de distance des liens on-, off- et inter-body dans le cas de la navigation en groupe (CGN) avec A&B.

réaliste avec trois personnes réalisant une navigation aléatoire dans l'espace entouré par quatre ancres (Figure 4.15). Les deux premières personnes sont équipées de quatre appareils chacune, tandis que la troisième est équipée avec seulement trois capteurs (en raison du nombre limité de dispositifs). Ainsi, ces nœuds se placent sur le torse droit, l'épaule, le dos et le torse gauche (sauf pour la troisième personne).

#### 4.4.4 Simulation & Résultats

Dans ce travail, nous utilisons le même simulateur WSNet que dans nos études précédentes. Pour l'estimation de distances, nous utilisons le protocole 3-WR qui est capable de transmettre ses paquets avec P2P, P2P-B et A&B. De plus, nous avons également implémenté un module qui permet d'exploiter le modèle de mobilité détaillée dans la Section 4.4.3 pendant la simulation. Avec cette structure, nous quantifions l'erreur de distance avec l'erreur quadratique moyenne (RMSE), calculée comme la différence

#### 4.4. Caractérisation de l'erreur de localisation entre la mobilité et le canal avec différents types des liens

---

absolue entre les distances mesurée et réelle. Ainsi, tous les résultats sont obtenues avec 20 essais indépendants de 100s et au cours de chaque cycle, le nombre de mises à jour pour chaque distance estimée est environ de 1500 fois.

##### Étude préliminaire : analyse des éléments de la mobilité

Dans cette analyse préliminaire, nous reprenons l'étude de l'impact de la vitesse des nœuds présentée dans 4.3 pour l'étendre à des transmission inter-body et off-body. Nous évaluons l'impact par simulation en considérant un canal parfait (sans pertes de paquets et avec une détection parfaite des impulsions). Pour cela, nous quantifions l'erreur en fonction du type de lien WBAN et de la stratégie MAC utilisée. Pour chaque configuration, nous allons analyser l'évolution de la fonction de distribution cumulative (CDF) du RMSE.

Dans le premier scénario, on réutilise le modèle de l'activité Yoga présenté dans la section précédente 4.3.1. Cette fois-ci, la personne est équipé avec 11 nœuds placés dans les endroits suivants : à la tête, au dos, aux mains, aux pieds, au genou, au coude droit et deux au torse. La Figure 4.16 montre le CDF du RMSE des trois différents liens on-body, on observe que l'erreur est plus impactée par les nœuds les plus mobiles (par exemple les mains et les pieds). De plus, la Figure 4.16(b) montre que la précision sur la distance dépend également de la stratégie d'ordonnancement utilisée. Dans ce cas, on peut observer que P2P et P2P-B ont un comportement similaire par rapport à A&B qui montre une meilleure précision. Ainsi, ces résultats confirment que la réduction des délais des transactions en 3-WR permet d'améliorer l'estimation de la distance, comme nous l'avons montré dans les sections 4.2 et 4.3.

Lorsque nous analysons les résultats pour le scénario de navigation en groupe (Figure 4.17) avec A&B, nous observons que la précision sur la distance varie en fonction du type de lien. Comparativement, l'erreur sur les liens on-body est relativement négligeable par rapport à l'erreur obtenue par les liens inter-body et off-body. Le résultat de cette observation est très important pour le cas de la localisation coopérative, car même si la coopération peut améliorer la précision, il faut trouver des approches qui le rendent plus fiable avec la prise en compte de l'impact de la mobilité. En effet, dans notre étude précédente, nous avons montré que les erreurs cumulées pour chaque distance estimée ont un impact sur l'estimation de la position de l'ordre de 5 cm dans le cas du Yoga, ce qui n'est pas négligeable dans la capture du mouvement. Par conséquent, dans le cas coopératif, chaque distance estimée aura sa propre contribution d'erreur sur la position.

##### Distribution de l'erreur de distance liée à la mobilité

Dans cette étude, nous proposons de modéliser la distribution de l'erreur de distance à partir d'une analyse empirique pour chaque lien du scénario de navigation en groupe. D'abord, la Figure 4.18 montre l'histogramme (en bleu) et la distribution empirique (en vert) de toutes les erreurs de distance calculées avec 20 simulations indépendantes de 100s chacune. Ainsi, nous pouvons observer que les distributions d'erreur pour tous les liens suivent une distribution normale. A partir de ces données, nous avons calculé la valeur moyenne et l'écart-type (Tableau 4.1) pour comparer nos résultats empiriques avec une distribution normale théorique (courbe en rouge). Cette comparaison montre que les liens off-body présentent le plus grand écart, alors que les liens on-body montrent le plus petit. Un facteur clé de ces résultats est la distribution normale de l'erreur due à la mobilité pour

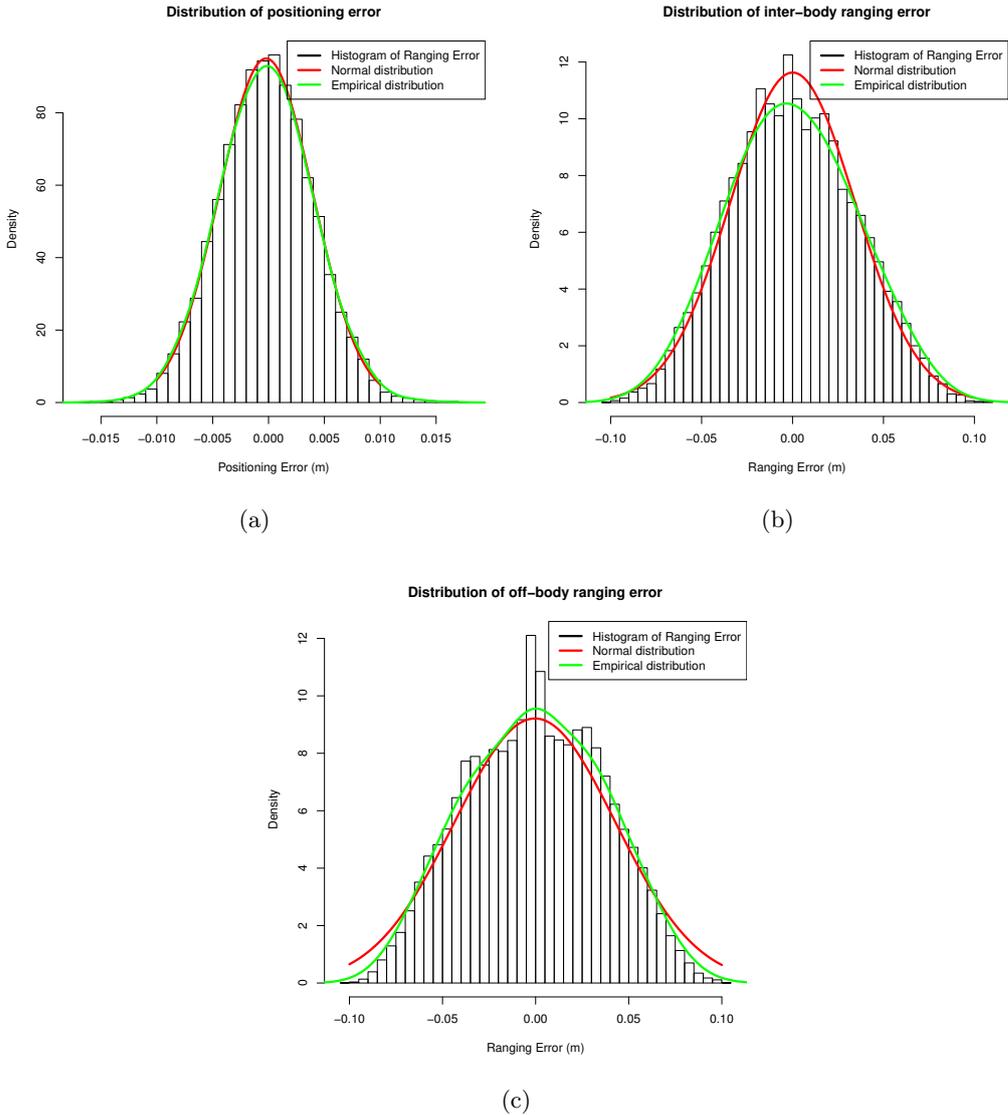


FIGURE 4.18 – Distribution des erreurs de distance avec les différents types de liens : (a) on-body, (b) inter-body et (c) off-body.

#### 4.4. Caractérisation de l'erreur de localisation entre la mobilité et le canal avec différents types des liens

tous les liens, ce qui veut dire que nous pouvons utiliser ces paramètres statistiques pour améliorer la précision de localisation avec des algorithmes de positionnement empiriques, par exemple avec un mécanisme basé sur le filtre de Kalman étendu (EKF).

TABLE 4.1 – L'écart-type sur l'erreur de distance due à la mobilité des nœuds (m).

On-body	Inter-body	Off-body
$\mathcal{N}(0, 0.0042)$	$\mathcal{N}(0, 0.0343)$	$\mathcal{N}(0, 0.0433)$

#### Impact du bruit de canal sur l'erreur de distance

Cette dernière étude consiste à quantifier l'erreur de distance avec et sans un canal bruité. Pour cela, nous avons implémenté une abstraction du canal avec un modèle d'erreur de distance appliqué aux distances estimées par simulation. Les détails sur ce modèle peuvent être trouvés dans [Hamie 13c] qui est une étude réalisée dans le cadre du projet CORMORAN par le CEA Leti. Ce modèle d'erreur suit une loi normale avec les paramètres décrits dans le tableau 4.2 pour chaque type de lien. Ainsi, nous évaluons le RMSE moyen de l'erreur de distance au cours de la simulation pour chaque type de lien et en utilisant A&B. La figure 4.19(a) montre l'évolution de l'erreur avec un canal parfait. Dans ce cas, nous pouvons observer que l'erreur sur les liens on-body (courbe en vert) est quasi-constante (centrée sur 0,6 cm) à cause de la mobilité réduite des nœuds sur le corps. Cependant, les liens inter-body et off-body présentent un RMSE qui varie lentement avec une valeur moyenne plus élevée par rapport aux liens on-body, l'erreur des liens off-body correspondant au pire cas (avec une valeur moyenne de 3,6 cm).

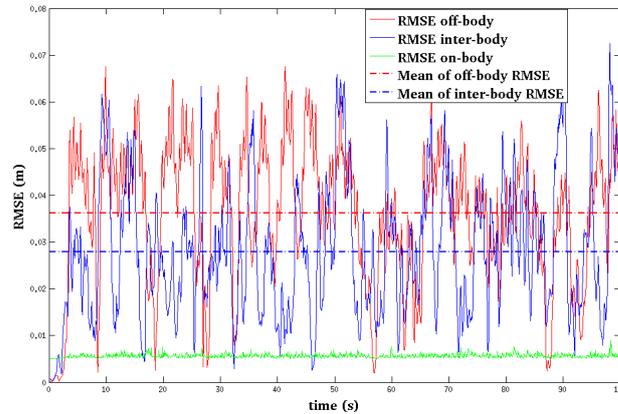
La Figure 4.19(b) montre l'évolution du RMSE lorsque l'on considère l'abstraction du canal bruité. Dans ce cas, nous pouvons noter une variation plus rapide du RMSE pour tous les types de liens où les liens on-body présentent encore une fois la valeur moyenne la plus petite. Si l'on compare l'erreur de distance entre nos deux scénarios (Figures 4.19(a) et 4.19(b)), on remarque que l'impact lié au bruit du canal est plus élevé que l'impact de la mobilité pour tous les liens par un facteur de 10 (visible aussi en comparant les tableaux 4.1 et 4.2).

TABLE 4.2 – L'écart-type sur l'erreur de distance due au bruit du canal (m).

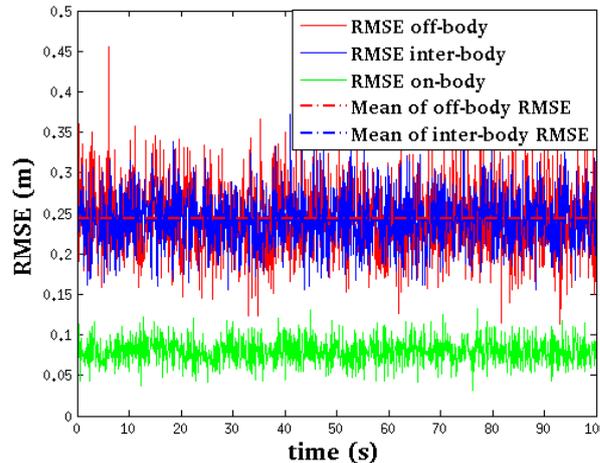
On-body	Inter-body	Off-body
$\mathcal{N}(0, 0.1)$	$\mathcal{N}(0, 0.3)$	$\mathcal{N}(0, 0.3)$

#### 4.4.5 Conclusion

Dans cette section, nous nous sommes concentrés sur l'étude de l'impact de la mobilité et du canal WBAN sur la localisation des nœuds avec une radio impulsionnelle. Pour cela, nous avons considéré un scénario réaliste avec différents types de liens on-body, inter-body et off-body où les nœuds estiment leurs distances avec le protocole 3-WR. Ainsi, la localisation est possible avec différentes stratégies d'ordonnement pour communiquer avec des nœuds ancrés fixes qui composent un système de référence. L'étude préliminaire permet d'observer l'effet de la mobilité sur l'estimation de la distance, compte tenu des différentes contraintes pour la conception de la couche MAC. Lorsque nous avons quantifié l'erreur de distance obtenue par les liens on-body, inter-body et off-body, nous avons



(a) RMSE de l'erreur avec canal parfait



(b) RMSE de l'erreur avec modèle de canal.

FIGURE 4.19 – RMSE moyenne des distances estimées pour les liens on-, inter- et off-body.

observé que l'erreur varie en fonction de l'ordonnement MAC utilisé, mais aussi en fonction du type de lien. A partir de ces résultats, nous avons montré que l'erreur liée à la mobilité des nœuds suit une distribution gaussienne et cette erreur est plus petite comparé avec celle produite par les variations du canal. Ce résultat est important à prendre en compte par le système de positionnement avec un WBAN, notamment pour l'utilisation des ressources au niveau MAC (par exemple avec une meilleur allocation de slots ou l'ordonnement de paquets pour réduire les délais). Ainsi, cette étude va être continuée dans le prochain chapitre pour utiliser les paramètres statistiques des distributions de l'erreur produites par la mobilité et le canal pour améliorer la précision des algorithmes de localisation, par exemple avec l'utilisation d'un mécanisme de localisation coopérative avec un filtre de Kalman étendu (EKF).

## 4.5 Conclusion du chapitre

L'intérêt de ce travail présenté dans ce chapitre réside dans la quantification de l'erreur en utilisant une radio IR-UWB pour la localisation des nœuds d'un WBAN. La validité de ces propositions est démontrée par des simulations qui exploitent des modèles de mobilité réalistes, notamment du point de vue design pour la conception de la couche MAC destinée à une application de localisation. Pour ce faire, nous avons implémenté une couche radio basé sur le standard IEEE802.15.6 et nous avons utilisé une couche MAC basé sur la technique du TDMA, qui permet d'avoir une trame synchronisée par balise pour éviter les interférences et maintenir la synchronisation du réseau nécessaire pour la localisation. Ensuite, nous avons mesuré le niveau d'erreur sur les distances estimées en fonction de la vitesse des nœuds, les délais de transmission des paquets et la présence (ou l'absence) d'un canal bruité.

La première approche consiste à se servir du principe des protocoles délimiteurs de distance pour faire l'estimation de distance. En particulier, nous avons implémenté des protocoles classiques du type n-WR (par exemple 2-WR et 3-WR) pour montrer qu'il existe un impact de la mobilité des nœuds du WBAN sur l'estimation avec un modèle de mobilité linéaire. En effet, nous avons montré que lorsque l'on considère la mobilité, la position d'un nœud mobile placé sur le corps peut être différent entre le moment où l'on envoie le premier paquet requête et le moment où l'on reçoit le paquet réponse pour compléter les transactions n-WR avec un nœud de référence et calculer la distance. Ainsi, nous avons montré que la latence de transmission des paquets 2-WR ou 3-WR avait un impact sur la précision de la distance estimée plus important que celui de la vitesse des nœuds. Notamment, le délai de la première réponse a un impact plus grand sur le niveau d'erreur par rapport au délai de la deuxième réponse, et ceci en fonction de la vitesse du nœud mobile.

En extension de cette étude, nous avons quantifié l'erreur de la distance due à la mobilité avec un modèle théorique. Pour cela, nous avons proposé de tester les performances de notre modèle avec différentes stratégies d'ordonnement des paquets 3-WR pour fixer la latence des réponses avec des délais connus et se concentrer uniquement sur l'impact de la variation de la vitesse selon la position des nœuds sur le corps avec un modèle de mobilité réaliste (scénario LSIMC). Ensuite, nous avons validé notre modèle avec des mesures obtenues par simulation. Les évaluations de cette étude confirment que l'erreur sur la distance estimée augmente en fonction du délai des paquets et de la vitesse des nœuds, ce qui a un impact sur la conception des stratégies d'allocation au niveau MAC et donc, sur le calcul de la position. De cette étude, nous pouvons en déduire que la conception d'une couche MAC doit pouvoir avoir accès au maximum de données sur le modèle biomécanique intra-WBAN afin de garantir des résultats de positionnement acceptables. Par conséquent, nous proposons d'étendre l'étude dans le Chapitre 5 pour évaluer l'impact sur l'estimation des positions avec différents stratégies d'ordonnement et minimiser l'erreur sur la distance et la position dans un scénario de capture du mouvement.

Pour conclure, nous avons également étudié et comparé l'erreur sur la distance générée par la mobilité des nœuds et les variations du canal. Pour ce cas, nous considérons un scénario réaliste de navigation en groupe pour quantifier l'erreur sur différents types de liens on-body, inter-body et off-body. Le problème qui se pose est d'arriver à caractériser ces deux types erreurs statistiquement pour améliorer la précision de positionnement.

## Chapitre 4. Caractérisation de l'erreur sur l'estimation de la distance avec UWB

---

Ainsi, nos résultats montrent que l'erreur liée aux variations du canal est plus grande que celle générée par la mobilité, spécialement dans les liens off-body où le niveau d'erreur est plus important. Aujourd'hui, il n'existe pas des mécanismes de localisation pour les WBAN qui prennent en compte ces paramètres. Pour cette raison, nous proposons de continuer cette travail dans le chapitre suivant (Section 5.4) pour améliorer la fiabilité des algorithmes de localisations coopératives avec un filtre de Kalman étendue [Hamie 14c] dans une perspective de fonctionnement cross-layer pour le partage d'information entre les différentes couches et améliorer la localisation.

# 5 Réduction de l'erreur sur l'estimation de la distance et du positionnement des nœuds

*"Notice that stiffest tree is most easily cracked,  
while the bamboo or willow survives  
by bending with the wind"*

— Bruce Lee, *Hong Kong martial artist*

## Sommaire du chapitre

---

5.1	Introduction et état de l'art . . . . .	102
5.1.1	Allocation de ressources au niveau MAC . . . . .	102
5.1.2	Impact des algorithmes de calcul de position . . . . .	102
5.2	Étude des stratégies d'ordonnement pour le positionnement . . . . .	103
5.2.1	Problématique autour des protocoles MAC considérés . . . . .	104
5.2.2	Ordonnement pour le positionnement d'un nœud avec 4 ancrs	104
5.2.3	Ordonnement pour la capture du mouvement avec plusieurs nœuds mobiles . . . . .	107
5.2.4	Synthèse sur l'ordonnement pour le positionnement . . . . .	111
5.2.5	Conclusion . . . . .	113
5.3	Étude sur l'allocation de ressources pour l'estimation de distance . . . . .	114
5.3.1	Configuration du système . . . . .	115
5.3.2	Modèles de mobilité . . . . .	115
5.3.3	Allocation de slots par niveau de mobilité . . . . .	116
5.3.4	Simulation & Résultats . . . . .	117
5.3.5	Conclusion . . . . .	121
5.4	Amélioration de l'algorithme coopératif de calcul des positions . . . . .	122
5.4.1	Scénario de suivi et navigation coopérative . . . . .	124
5.4.2	Filtres de suivi coopératif proposé . . . . .	125
5.4.3	Simulation & proposition . . . . .	129
5.4.4	Conclusion . . . . .	130
5.5	Discussion . . . . .	130

---

### 5.1 Introduction et état de l'art

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la précision du positionnement des nœuds d'un WBAN était impactée par la mobilité. En effet, la distance peut être estimée par le biais de plusieurs transactions basées sur le protocole 3-WR. Or, lorsque le nombre de nœuds dans le réseau augmente, la collecte des distances génère plus de trafic et des délais plus importants. Nous avons montré que ces retards amplifient les erreurs sur les estimations, car le corps peut changer sa position et ses gestes pendant ce temps d'échange.

En outre, le canal WBAN est une autre source d'erreur pour l'estimation de distance, notamment par les obstructions du corps qui peuvent générer une forte perte de paquets ou affecter les signaux et conduire à une mauvaise détection du ToA des pulses [Hamie 13c]. Dans ce chapitre, nous cherchons à minimiser l'impact des ces sources d'erreur sur la précision de localisation.

#### 5.1.1 Allocation de ressources au niveau MAC

Dans la littérature, le peu de travaux qui se concentrent sur la conception de la couche MAC, pour une application de localisation basé sur UWB, proposent des stratégies protocolaires basés sur une approche TDMA par balise, et ils évaluent les performances en termes de précision et de latence. Par exemple, [Macagnano 07] propose un algorithme coopératif d'estimation de distances avec des stratégies d'agrégation de données et de diffusion en broadcast pour réduire le délai des transmissions. Dans le même esprit, [Maman 08a] se concentre sur la gestion de ressources avec une politique d'allocation par niveaux de priorité pour communiquer et assurer la QoS. Une approche différente peut être trouvée dans [Garcia 13] où les auteurs analysent la relation entre les délais au niveau MAC et la précision avec UWB liée au nombre d'ancres et de la portée de communication des nœuds en mobilité. Cependant, tous ces travaux ont été proposés pour des applications de localisation avec WSN [Bachir 10] qui ne présentent pas les mêmes problèmes sur le WBAN [Ullah 09]. En effet, le niveau de mobilité des nœuds n'est pas le même, ce qui peut donner lieu à un impact plus important de l'ordonnancement des paquets de localisation sur l'estimation des positions. [Denis 09] propose différents schémas d'ordonnancement pour une localisation coopérative distribuée avec deux politiques différentes (par le voisinage des nœuds et la qualité des liens) pour réduire le temps de convergence de positionnement, la latence et l'overhead. Cependant, ils considèrent un positionnement à deux dimensions avec WSN qui, encore une fois, n'est pas un scénario réaliste pour une application de localisation avec les WBANs.

#### 5.1.2 Impact des algorithmes de calcul de position

Dans le cadre de l'estimation des positions, différents algorithmes ont été développés au cours des dernières années [Hamie 13b]. Comme expliqué dans l'introduction, une position peut être calculée de plusieurs façons, soit par des méthodes non-statistiques, telles que la détection de proximité, la triangulation, la trilatération ou la multilatération, soit par des mécanismes statistiques avec des méthodes par vraisemblance ou des approches bayésiennes. Cependant, les performances de l'algorithme choisi, en termes de précision et de temps de calcul, vont dépendre de la précision obtenue lors de l'estimation des distances. Par exemple, [Ben Hamida 10] utilise le principe des moindres carrés non-linéaires (NLLS) pour les distances mesurées avec des transmissions coopératives et non-coopératives en

## 5.2. Étude des stratégies d'ordonnement pour le positionnement

---

point à point. Ce travail montre que la coopération améliore le taux de positionnement (i.e. moins pertes de paquets) au prix d'une plus grande erreur sur l'estimation des positions (à cause des délais de réponse plus importants). [Shaban 10] et [Mhedhbi 12] adaptent la technique de positionnement multidimensionnel (en anglais *multidimensional scaling* (MDS)) pour la capture de mouvement des nœuds sur le corps sans considérer les aspects MAC ou les erreurs des distances estimées. [Mhedhbi 12] introduit des contraintes supplémentaires basées sur la connaissance préalable des distances minimales et maximales possibles contraintes par les dimensions du corps (et donc, une certaine limite sur les positions possibles). Dans le même esprit, [Mekonnen 10b] propose un estimateur du maximum de vraisemblance centralisé avec des contraintes basées sur les positions instantanées des nœuds sur le corps. Cependant, comme nous l'avons expliqué, les approches centralisées peuvent être coûteuses en termes de calcul et de latence, ce qui peut introduire des erreurs supplémentaires. Ainsi, plus récemment, une approche de localisation coopérative décentralisée est proposée dans [Hamie 14b], basée sur un filtre de Kalman étendu pour exploiter les mesures des distances par coopération.

De la revue de ces travaux dans la littérature, nous pouvons retenir que la tendance récente est à recourir à des mécanismes de localisation décentralisés coopératives ou non-coopératives basés sur des approches statistiques. Pour cela, nous souhaitons tirer parti de l'information potentielle des couches inférieures pour améliorer la localisation. Dans ce chapitre, nous proposons donc d'aborder l'étude du positionnement par une approche d'allocation de ressources améliorée au niveau de la MAC pour réduire le niveau d'erreur généré par la mobilité des nœuds et le canal WBAN. Dans un premier temps, la section 5.2 va traiter le problème de la mobilité avec un canal parfait, en proposant différentes stratégies d'ordonnement des paquets 3-WR qui réduisent l'erreur et les délais de réponse. Dans la section 5.3, nous proposons d'analyser les performances de l'allocation des slots en fonction du niveau de mobilité des nœuds pour un canal parfait. Puis, nous comparons les différents schémas d'allocation par rapport à leur capacité à estimer différentes positions de référence du nœud définies par rapport à la trame MAC. Enfin, dans la Section 5.4, nous présentons une étude qui considère l'erreur générée à la fois par la mobilité et par le canal pour améliorer un algorithme de positionnement statistique basé sur le filtre de Kalman étendu.

## 5.2 Étude des stratégies d'ordonnement pour le positionnement

Dans le chapitre précédent (Sections 4.2 et 4.3), nous avons présenté une étude sur l'impact de la mobilité sur la précision des distances estimées par 3-WR avec un système IR-UWB. Nous avons montré que lorsque l'on considère une cible mobile dans un WBAN, les positions réelles des nœuds varient de façon significative lors de chaque paquet transmis. Ce problème fait que l'erreur sur les distances estimées augmente, notamment, lorsque la durée de réponse entre ces paquets augmente. Par conséquent, l'ordonnement des paquets 3-WR devient important pour effectuer un positionnement précis. Ainsi, la couche MAC doit prendre en compte la vitesse des nœuds du WBAN en réduisant les délais entre les transmissions. Dans cette étude, nous proposons différentes stratégies d'ordonnement au niveau MAC pour réduire l'impact de la mobilité sur la précision des positions estimées par le biais des délais de réponses réduites [Guizar 14b].

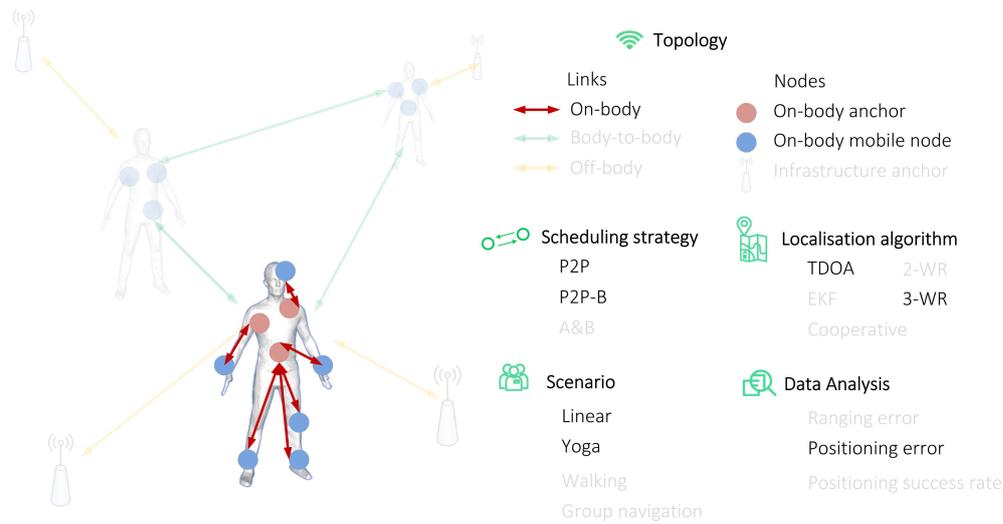


FIGURE 5.1 – Scénario de capture de mouvement individuel avec différentes stratégies d’ordonnancement

Pour cela, nous considérons d’abord, un canal parfait avec un scénario de mobilité réaliste.

### 5.2.1 Problématique autour des protocoles MAC considérés

Pour réduire l’erreur de positionnement avec un délai de réponse acceptable, nous proposons l’utilisation d’une couche MAC basée sur le protocole TDMA. Nous supposons une synchronisation par balise. On réserve trois périodes de transmission par nœud dans la même trame pour les paquets 3-WR. Avec cette configuration, on est capable de modifier l’ordonnancement de ces trois périodes pour pouvoir comparer différentes stratégies d’ordonnancement pour réduire l’erreur sur les distances. L’objectif est d’évaluer ces stratégies pour augmenter la précision du positionnement d’un nœud mobile avec plusieurs ancres. Ensuite, nous étendons cette étude dans un cas général où l’on considère plusieurs nœuds mobiles pour effectuer la capture du mouvement d’une personne (Figure 5.1).

### 5.2.2 Ordonnancement pour le positionnement d’un nœud avec 4 ancres

Dans cette étude, nous considérons 4 stratégies d’ordonnancement différentes avec des transmissions 3-WR pair à pair (P2P) pour l’estimation de la position d’un seul nœud avec 4 ancres par TDOA. Pour chaque stratégie, schématisées dans la Figure 5.2, nous avons cherché à de réduire autant que possible le délai pour la première réponse ( $\Delta t_1$ ) :

- **Toutes les requêtes en premier (S1)** : Les paquets requête  $Q_{ij}$  sont envoyés en priorité vers toutes les ancres. Ensuite, chaque ancre transmet sa réponse  $R1_{ji}$  et  $R2_{ji}$  consécutivement.
- **Transaction en ordre (S2)** : Le nœud réalise les transactions 3-WR avec chaque ancre une par une.
- **Transmission par trois périodes (S3)** : La trame MAC est divisée en trois périodes dédiées à l’envoi de chaque type de paquet 3-WR dans ordre suivant : les  $Q_{ij}$ , les  $R1_{ji}$  et puis les  $R2_{ji}$  à la fin.

## 5.2. Étude des stratégies d'ordonnancement pour le positionnement

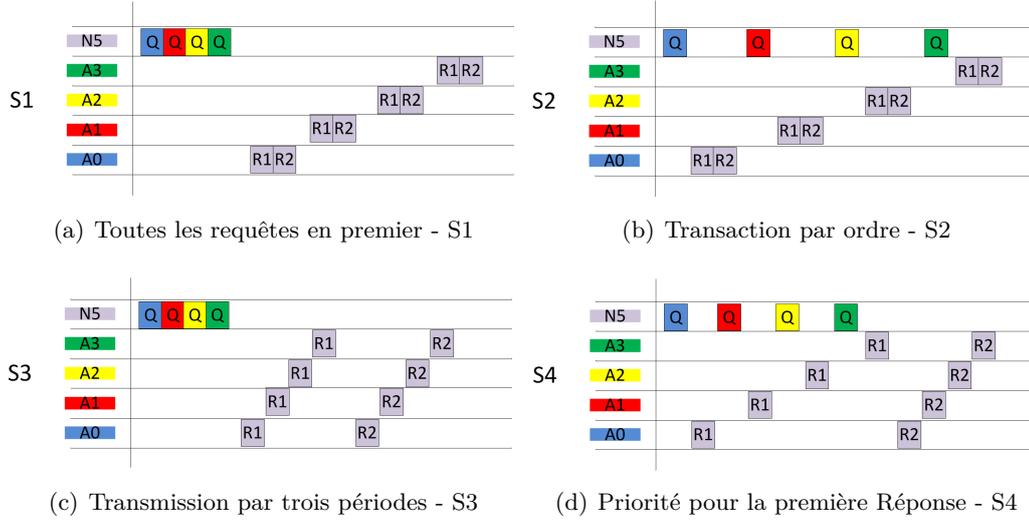


FIGURE 5.2 – Stratégies d'ordonnancement pour un nœud et quatre ancres. Dans ce schéma, chaque nœud a une couleur. Ainsi, la couleur de chaque paquet représente le nœud de destination.

- **Priorité pour la première Réponse (S4)** : Le nœud envoie les requêtes et les ancres répondent immédiatement avec un paquet réponse. Puis, chaque ancre transmet les  $R2_{ji}$  à la fin de la trame.

### A. Modèle de mobilité

Pour cette étude, nous considérons deux modèles de mobilité (Figure 5.1). Le premier consiste en un scénario simulé composé de cinq capteurs : quatre ancres placées sur le torse, le dos, le droit et le gauche de la hanche et un nœud mobile sur le poignet droit. Ainsi, le nœud sur le poignet réalise un mouvement périodique linéaire (par exemple dans le cas de la marche) à des vitesses différents (entre 1 à 20 m/s). Les ancres restent fixes et le nœud se déplace dans un espace linéaire de 30 cm. Dans le deuxième modèle, nous considérons un scénario d'activité Yoga réaliste obtenu par mesure, tel que présenté dans la Section 4.3.1. Le nœud mobile ( $N_5$ ) est placé sur le poignet droit et les ancres sont placés sur le torse droit ( $A_1$ ), le torse gauche ( $A_2$ ), la hanche gauche ( $A_3$ ) et le dos ( $A_4$ ). Pour ce modèle, on utilise un facteur de vitesse entre 1 et 10 pour accélérer les traces du mouvement.

### B. Paramètres de la simulation

Nous adoptons une approche de simulation à événements discrets avec WSNNet. La couche PHY est basé sur le standard IEEE802.15.6 UWB en mode par défaut (modulation OOK et débit 0,4875 Mbps). Comme expliqué avant, nous supposons un canal LoS sans pertes de paquet afin de se concentrer sur l'erreur liée à la mobilité. Par conséquent, on suppose que la radio est capable de détecter le premier chemin du signal et le ToA du IR-UWB. En outre, nous avons implémenté nos quatre stratégies d'ordonnancement au niveau de la couche MAC. Avec cette configuration, nous évaluons l'impact sur l'estimation de la position en fonction de la stratégie choisie avec le RMSE comme suit :

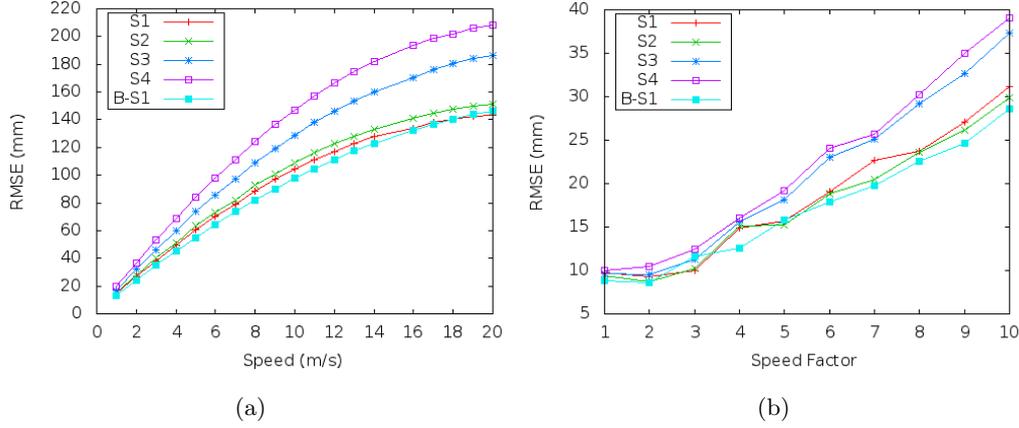


FIGURE 5.3 – RMSE en fonction de la vitesse pour évaluer l'impact des différents schémas d'ordonnancement (a) avec une mobilité linéaire et (b) un scénario d'activité Yoga réaliste.

$$RMSE(i, ref_r) = \sqrt{\frac{\sum^{N_f} |P_{ref_r,i}(t) - \hat{P}_i(t)|^2}{N_f}} \quad (5.1)$$

où  $N_f$  est le nombre de trames testées au cours de la simulation et  $P_{ref_r,i}(t)$  représente la position de référence à comparer avec la position estimée. Cette position de référence peut être considérée comme la position des nœuds au début, à la fin ou au cours de la trame. Enfin, nous avons implémenté un module qui exploite les deux modèles de mobilité présentés (linéaire et réaliste) et les résultats sont obtenus sur une simulation de 100s.

### C. Évaluation de performance

La position de référence considérée pour cette étude est la position réelle à la fin de chaque trame, notée  $P_{final_i}(t)$ . La Figure 5.3 montre le RMSE pour les deux scénarios de mobilité en fonction de la vitesse. Ces deux figures montrent d'abord que le RMSE augmente avec la vitesse pour toutes les stratégies. En effet, nous avons montré dans le chapitre précédente que comme la vitesse augmente pour chaque simulation, le nœud couvre une distance plus grande pour le même temps d'une transaction 3-WR et donc, une erreur plus importante sur la position estimée du nœud qui est calculée avec quatre distances non liées à la même position. De plus, cette erreur varie selon la stratégie utilisée. En particulier, nous pouvons observer pour les deux scénarios que S1 et S2 effectuent un meilleur positionnement que S3 et S4. Cette observation est intéressante car elle illustre le compromis entre mettre en priorité soit la précision de calcul de position soit de l'estimation de distance (avec la réduction du  $\Delta t1$ , comme présenté dans la Section 4.3). Or, si l'on considère une comparaison globale entre les différentes stratégies et leurs délais, S3 et S4 présentent un délai  $\Delta t1$  plus petit comparé à celui de S1 et S2. Par conséquent, S3 et S4 effectuent des estimations de distance plus précises. Cependant, ce gain en précision se perd avec le calcul de la position. En effet, dans notre scénario on compare la position estimée avec la position réelle à la fin de la trame. Ce qui veut dire

## 5.2. Étude des stratégies d'ordonnancement pour le positionnement

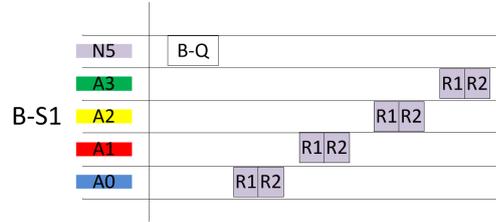


FIGURE 5.4 – Stratégie d'ordonnancement S1 avec les requêtes en broadcast

que même si les estimations de distance avec S1 et S2 sont moins précises, ces distances estimées se rapprochent plus des distances réelles correspondant à la position que l'on souhaite estimer et donc, S1 et S2 permettent d'estimer mieux la position finale.

Pour compléter cette étude, nous considérons également le cas d'une transmission en broadcast des paquets requête pour la meilleure stratégie, dans ce cas B-S1 (Figure 5.4). Ainsi, nous pouvons avoir un gain de 3 slots au niveau de la transmission de ces paquets. Nous pouvons observer que le broadcast avec S1 permet de réduire l'erreur sur l'estimation de position de manière marginale par la réduction du délai.

Enfin, il faut noter que la stratégie S3 ressemble le plus à la stratégie classique considérée dans la littérature [Macagnano 07] [Maman 08a] [Lee 09] [Ben Hamida 10] [Hamie 13b], où l'ordonnancement des paquets N-WR se fait par périodes. Or, dans ces travaux, la mobilité des nœuds était très basse et donc, l'ordonnancement n'avait pas vraiment d'impact. Ici, S1 apporte un gain entre 2 à 5 cm (pour nos deux scénarios), ce qui est non négligeable pour la capture de mouvement du corps. Ainsi, cette étude préliminaire confirme l'intérêt de trouver l'ordonnancement le plus adapté pour le cas du positionnement d'un nœud mobile.

### 5.2.3 Ordonnancement pour la capture du mouvement avec plusieurs nœuds mobiles

Suite aux résultats précédents, nous proposons d'aborder la problématique d'ordonnancement dans un cas avec plusieurs nœuds où nous considérons un WBAN dans une application de capture de mouvement d'une personne. Dans cette configuration, nous proposons trois stratégies d'ordonnancement différentes basées sur S1 et S2 (Section 5.2.2), qui sont (Figure 5.5) :

- **Toutes les requêtes en premier avec priorité pour l'ancrage (S5) :** Les nœuds envoient les paquets requête  $Q_{ij}$  au début de la trame, puis chaque ancre répond avec  $R1_{ji}$  et  $R2_{ji}$  à tous les nœuds. Ainsi, les paquets d'un nœud sont répartis tout au long de la trame.
- **Toutes les requêtes en premier avec priorité pour le nœud (S6) :** Les nœuds envoient d'abord les paquets  $Q_{ij}$ , puis les réponses  $R1_{ji}$  et  $R2_{ji}$  sont envoyées consécutivement pour chaque nœud. Ainsi, les paquets émis par une ancre sont répartis dans le temps.
- **Positionnement par ordre (S7) :** Chaque nœud effectue le schéma S1 un par un avec toutes les ancres. Ainsi, du point de vue des nœuds les paquets sont regroupés dans le temps.

## Chapitre 5. Réduction de l'erreur sur l'estimation de la distance et du positionnement des nœuds

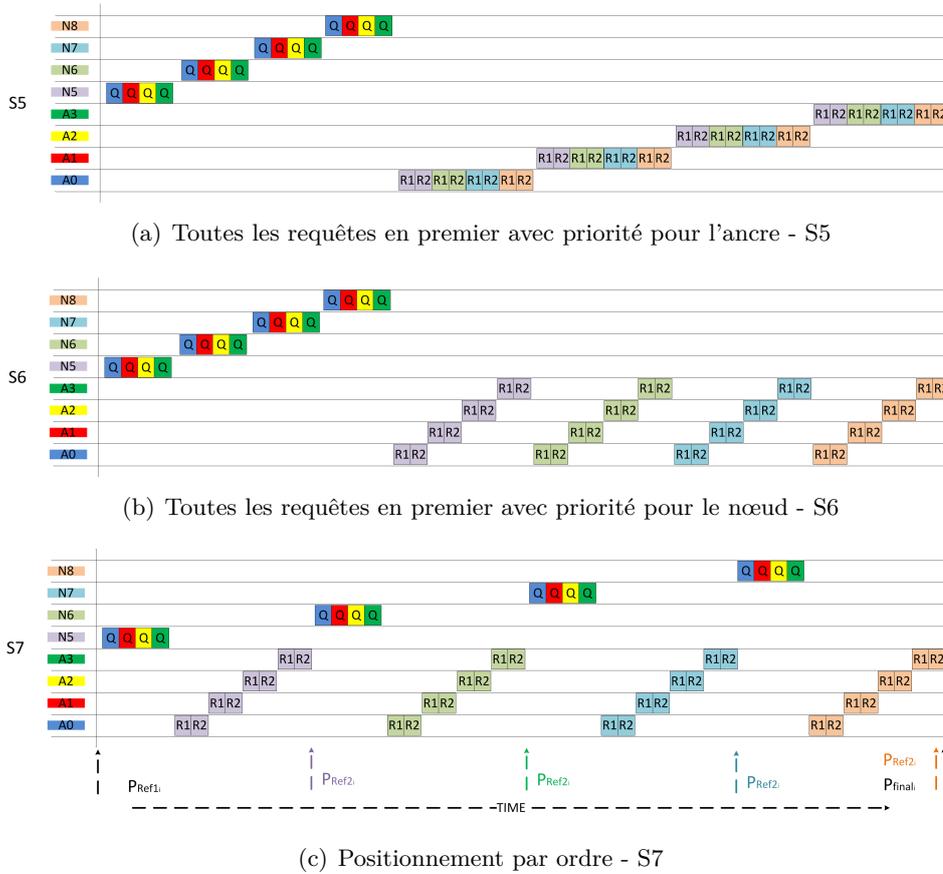


FIGURE 5.5 – Stratégies d’ordonnement pour quatre nœuds et quatre ancres. Dans ce schéma, chaque nœud a une couleur. Ainsi, la couleur de chaque paquet représente le nœud de destination.

### A. Modèle de mobilité

Dans cette étude, nous considérons un scénario d’activité Yoga réaliste (Section 4.3.1) où la position des nœuds varie de manière contrôlée. Dans ce cas, l’on considère quatre nœuds mobiles placés sur le poignet droit ( $N_5$ ), le poignet gauche ( $N_6$ ), le pied droit ( $N_7$ ) et la tête ( $N_8$ ). Puis, les ancres restent sur le torse droit ( $A_1$ ), le torse gauche ( $A_2$ ), la hanche gauche ( $A_3$ ) et le dos ( $A_4$ ) (Figure 5.1).

### B. Paramètres de la simulation

Nous utilisons la même structure de simulation présentée dans la Section 5.2.2. Cependant, nous évaluons la performance de nos différentes stratégies d’ordonnement avec le RMSE entre les positions estimées et trois positions de référence (Figure 5.5(c)) :  $P_{ref_{1,i}}(t)$  est la position des nœuds au début de la trame MAC,  $P_{ref_{2,i}}(t)$  représente la position instantanée des nœuds lorsqu’ils finissent les transactions 3-WR avec toutes les ancres et  $P_{final,i}(t)$  est la position des nœuds à la fin de la trame. Comme avant, nous évaluons également la performance des meilleures stratégies pour estimer les différentes positions de référence avec les paquets requête en broadcast.

## 5.2. Étude des stratégies d'ordonnement pour le positionnement

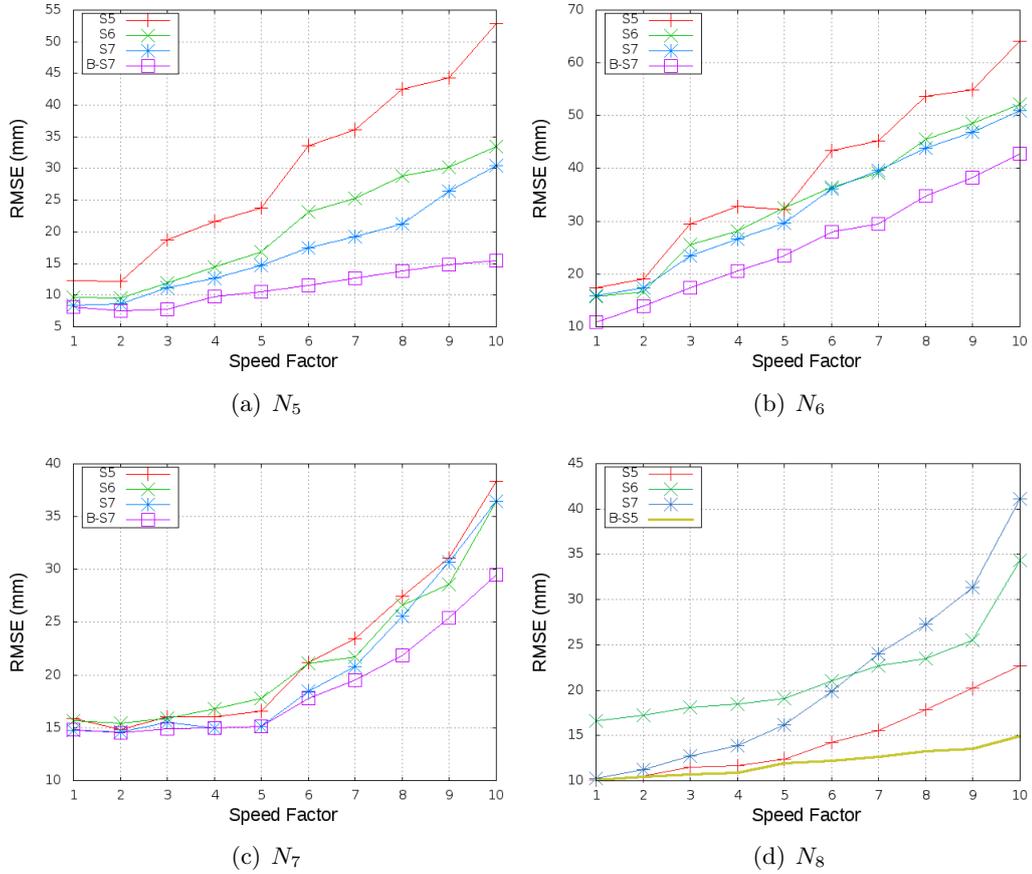


FIGURE 5.6 – RMSE en fonction de la vitesse par rapport à la position  $P_{ref_{1,i}}(t)$  pour chaque nœud mobile : (a) le poignée droit ( $N_5$ ), (b) le poignée gauche ( $N_6$ ), (c) le pied droit ( $N_7$ ) et (d) le tête ( $N_8$ ).

### C. Évaluation de performance

Les Figures 5.6, 5.7 et 5.8 montrent le RMSE de la position estimée par rapport à chaque position de référence en fonction de la vitesse des nœuds. La Figure 5.6 montre que les nœuds placés au début de la trame ( $N_5$  et  $N_6$ ) atteignent une meilleure estimation de  $P_{ref_{1,i}}$  avec S7. Inversement, les nœuds placés à la fin de la trame ( $N_8$ ) ont une meilleure estimation  $P_{ref_{1,i}}$  avec S5. En outre, si l'on analyse les performances sur l'estimation de  $P_{ref_{2,i}}$  (Figure 5.7), nous pouvons observer que S7 permet d'obtenir une estimation plus précise sur les positions instantanées pour toutes les vitesses et avec un RMSE inférieur à 50 mm pour tous les nœuds. Enfin, la Figure 5.8 montre que les nœuds placés au début de la trame ( $N_5$ ) estiment mieux la position  $P_{final_i}$  avec S5, sans montrer une précision remarquable (RMSE > 50 mm) lors d'une vitesse importante. Alors que les nœuds placés à la fin de la trame ( $N_7$  et  $N_8$ ) atteignent une bonne estimation de  $P_{final_i}$  avec S7 et une meilleure précision (RMSE < 30 mm) même avec la plus grande vitesse testée.

Lorsque l'on applique la transmission par broadcast de paquets requêtes pour les meilleurs stratégies B-S5 et B-S7 (Figure 5.9), nous pouvons noter un gain sur le RMSE selon la position des nœuds et la position de référence à estimer. Dans le cas de

## Chapitre 5. Réduction de l'erreur sur l'estimation de la distance et du positionnement des nœuds

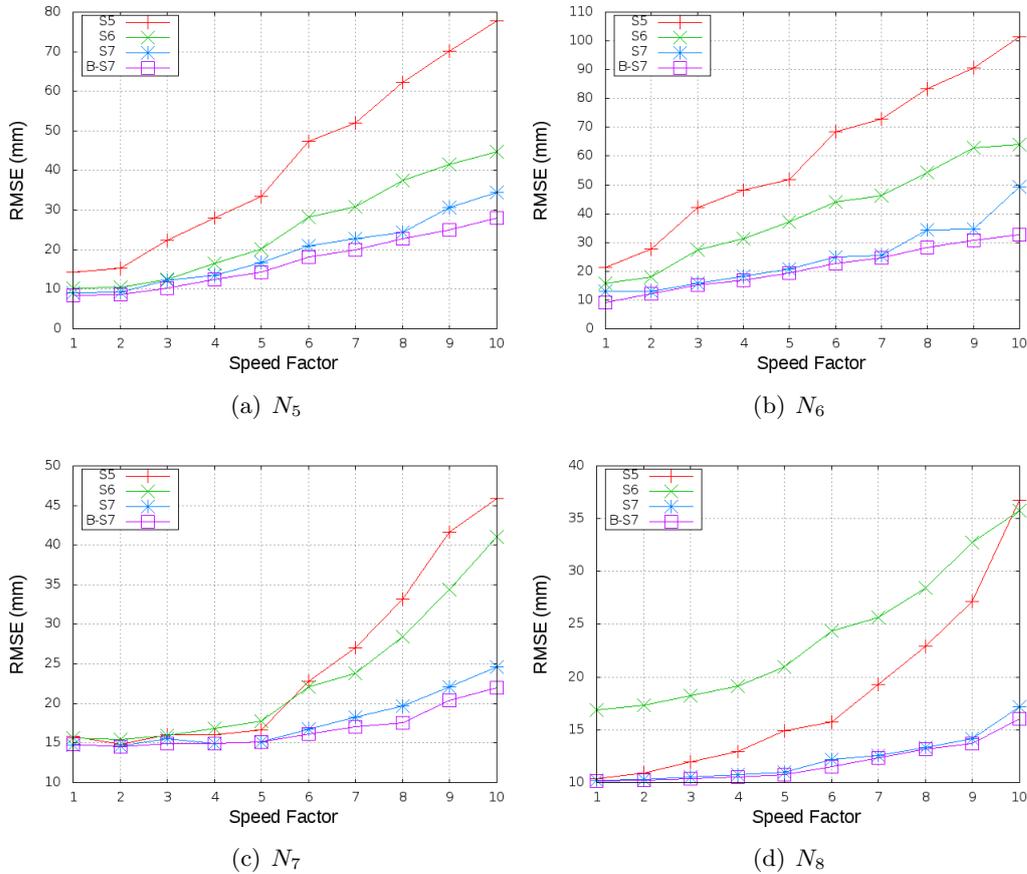


FIGURE 5.7 – RMSE en fonction de la vitesse par rapport à la position  $P_{ref_{2,i}}(t)$  pour chaque nœud mobile : (a) le poignée droit ( $N_5$ ), (b) le poignée gauche ( $N_6$ ), (c) le pied droit ( $N_7$ ) et (d) le tête ( $N_8$ ).

l'estimation de  $P_{ref_{1,i}}$  (Figure 5.6), ce gain est entre 10 mm et 20 mm par rapport à la meilleure stratégie respective à chaque nœud et avec la plus grande vitesse. Dans le cas de l'estimation de  $P_{ref_{2,i}}$  (Figure 5.7), le gain est plus petit pour la plupart des nœuds (entre 0 et 10 mm), sauf pour  $N_6$  où le gain est au maximum 20 mm. Enfin, pour estimer  $P_{final_i}$  (Figure 5.8), le gain est inférieur aux 10 mm pour tous les nœuds. De plus, il faut noter que le gain du broadcast en termes de temps est équivalent à la durée de 12 slots (trois paquets requêtes en moins pour les quatre nœuds mobiles) pour B-S5 et B-S7. Par conséquent, cela permet d'estimer plus des positions en moins de temps.

En se référant à ces résultats, nous constatons que dans le cas d'une application qui souhaite effectuer la reconnaissance de postures (soit par l'estimation des positions à la fin (resp. au début) de la trame  $P_{final_i}$  (resp.  $P_{ref_{1,i}}$ )), S5 en broadcast (B-S5) sera choisi. Alors que si l'application cherche la capture du mouvement individuelle par les nœuds (i.e. l'estimation de  $P_{ref_{2,i}}$ ) avec un taux de rafraîchissement élevé, le meilleur ordonnancement est une transmission avec S7 en broadcast (B-S7).

## 5.2. Étude des stratégies d'ordonnement pour le positionnement

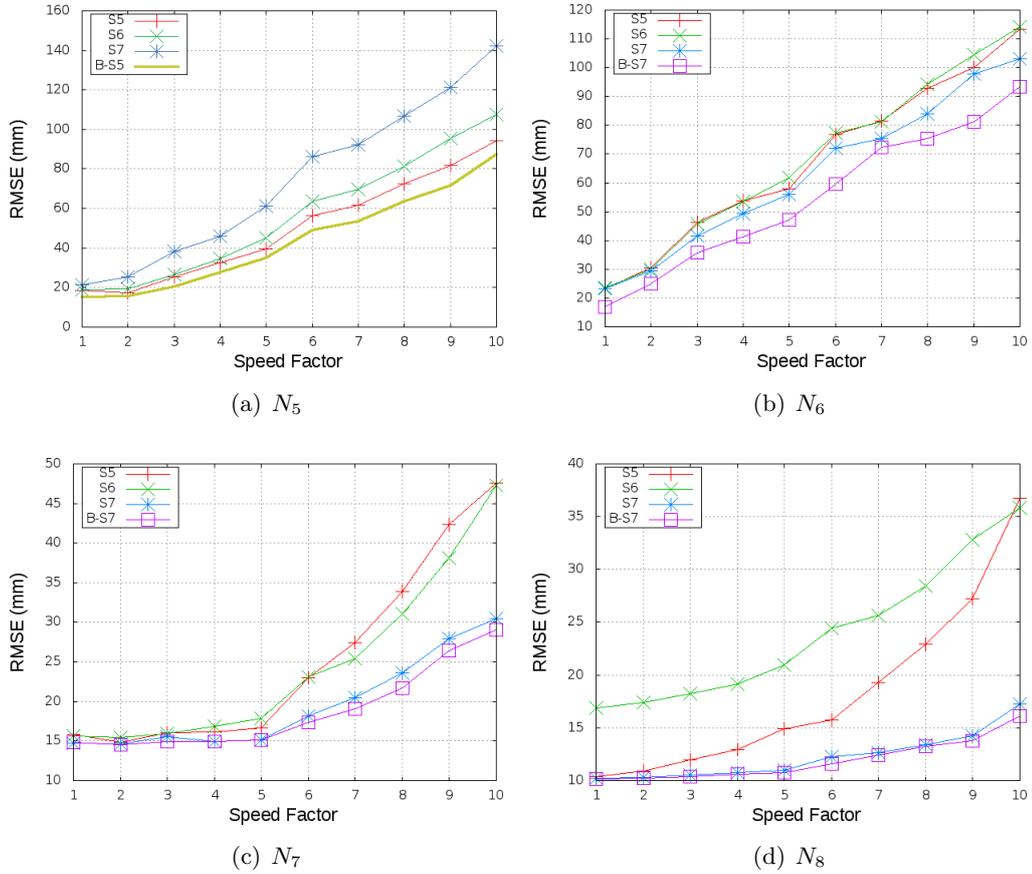


FIGURE 5.8 – RMSE en fonction de la vitesse par rapport à la position  $P_{final_i}(t)$  pour chaque nœud mobile : (a) le poignée droit ( $N_5$ ), (b) le poignée gauche ( $N_6$ ), (c) le pied droit ( $N_7$ ) et (d) le tête ( $N_8$ ).

### 5.2.4 Synthèse sur l'ordonnement pour le positionnement

Dans cette dernière analyse, nous souhaitons définir les stratégies d'ordonnement à utiliser dans la suite de nos études. Pour cela, nous proposons de comparer de manière théorique les avantages de nos deux meilleures stratégies point à point (S7 et B-S7) basées sur nos résultats précédents (Section 5.2.3) avec une stratégie où toutes les transmissions sont en broadcast (A&B) (Figure 5.10) :

- **Positionnement des nœuds par ordre (P2P, ancien S7)** (Figure 5.5(c))
- **Positionnement des nœuds par ordre en broadcast (P2P-B, ancien BS7)** : chaque nœud mobile  $i$  envoie un paquet Requête  $Q_i$  en Broadcast à toutes les ancres. Puis, à son tour, chaque ancre transmet les deux réponses ( $R1_{ij}$ ) et ( $R2_{ij}$ ) consécutivement à chaque nœud. Notez que la diffusion des requêtes en broadcast fait augmenter le retard  $\Delta t1$  pour certaines ancres d'une manière non-uniforme.
- **Agréé et en Broadcast (A&B)** : au départ, toutes les requêtes ( $Q_i$ ) sont transmises en broadcast par les nœuds mobiles pour une localisation décentralisée. Ensuite, chaque ancre  $j$  collecte les ToA de chaque requête, puis transmet une

## Chapitre 5. Réduction de l'erreur sur l'estimation de la distance et du positionnement des nœuds

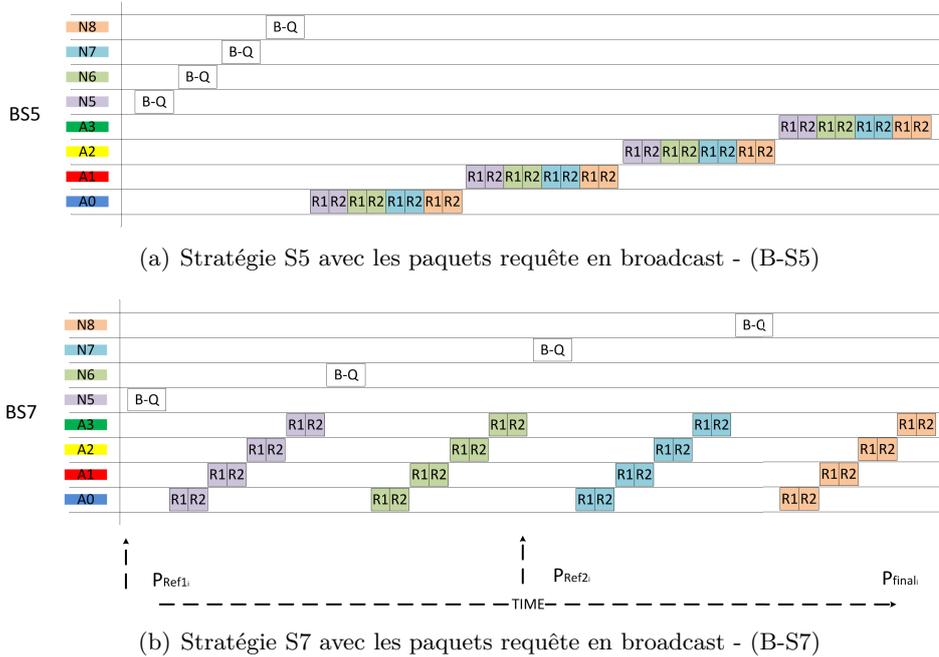


FIGURE 5.9 – Meilleures stratégies d'ordonnancement

réponse agrégée ( $R1_j$ ) pour tous les nœuds, suivie par une deuxième réponse ( $R2_j$ ) en Broadcast. Ainsi, cet ordonnancement permet de réduire le volume de trafic et par conséquent, la durée de la trame MAC. En revanche, il augmente le délai  $\Delta t1$  pour tous les nœuds. Il faut noter que cette stratégie est basée sur le protocole proposé par [Macagnano 07] et que nous avons adapté pour notre cas distribué. Ce dernier fonctionne avec une localisation centralisée où ce sont les ancres qui démarrent la transmission des requêtes 3-WR et puis les nœuds agrègent les temps de toutes les requêtes pour ensuite répondre à toutes les ancres. Cependant, cette approche est plus longue que la notre en termes de latence et de temps de convergence car il est possible d'avoir plus de nœuds que d'ancres et par conséquent, le nombre de paquets réponse est supérieur dans le cas centralisé.

L'intérêt d'étudier ces trois stratégies est de contourner le problème de mobilité et de s'en servir pour améliorer le positionnement, ce qui n'a pas été fait jusqu'à maintenant. Dans l'étude précédente (section 5.2.3, nous avons montré qu'avec un ordonnancement P2P (i.e. la stratégie S7 où les nœuds réalisaient les transactions 3-WR un par un), nous pouvons améliorer la précision de positionnement par rapport aux stratégies d'ordonnancement classiques par périodes. Cependant, la durée de la trame pour cette stratégie P2P augmente en fonction du nombre des nœuds dans le réseau. Pour cette raison, A&B a été proposé pour limiter le trafic avec l'agrégation de données et les transmissions en broadcast. Cette stratégie peut néanmoins conduire à une plus grande perte de paquets lorsque l'on considère le shadowing du corps et donc, la réduction du taux du positionnement. Ainsi, la différence entre ces trois stratégies se situe sur la durée de la trame pour localiser  $n$  nœuds mobiles avec  $m$  ancres en fonction du nombre de nœuds dans le réseau. Pour A&B (resp. P2P-B), les nœuds envoient  $n$  paquets

## 5.2. Étude des stratégies d'ordonnancement pour le positionnement

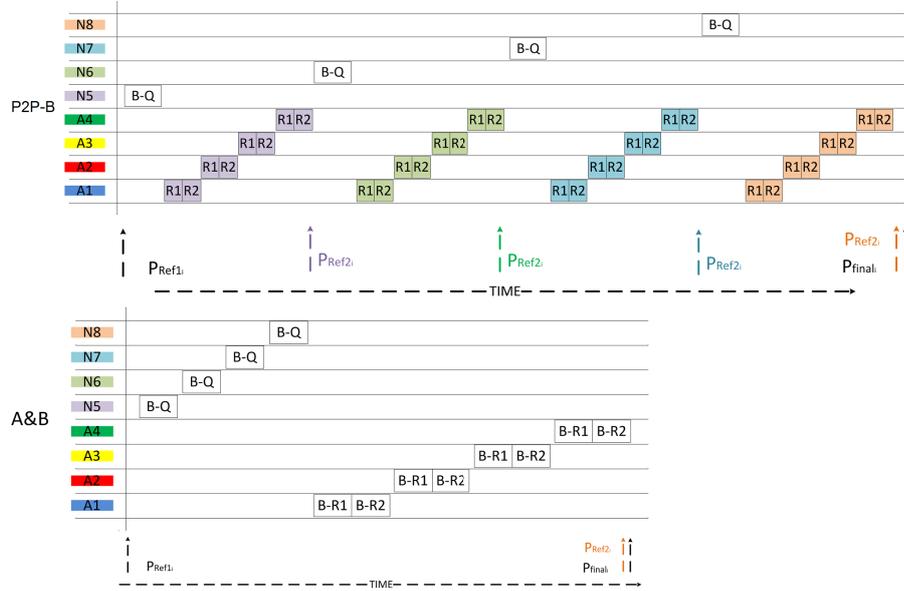


FIGURE 5.10 – Schéma sur les algorithmes d'ordonnancement P2P-B et A&B

requête en broadcast (Figure 5.10). Ensuite, les ancres répondent avec  $m$  (resp.  $n \cdot m$ ) paquets réponse 1 et  $m$  (resp.  $n \cdot m$ ) paquets réponse 2. Ainsi, on obtient respectivement  $\prod_{A\&B} = n + 2m$  et  $\prod_{P2P-B} = n + (2m + 1)$  paquets pour A&B et P2P-B (Figure 5.11). Dans le cas de P2P, il y a autant de paquets requêtes et réponses pour tous les nœuds et ancres et donc,  $\prod_{P2P} = 3 \cdot m \cdot n$ . Dans notre scénario avec 4 ancres et 4 nœuds mobiles, P2P-B présente une durée de trame de  $\approx 54$  ms (et P2P de  $\approx 72$  ms) contre  $\approx 18$  ms pour A&B. Cela signifie que pendant l'acquisition d'une position avec P2P-B, A&B peut effectuer trois fois plus de capture du mouvement (ou quatre fois plus par rapport à P2P). Donc, il devrait réduire l'impact de la mobilité des nœuds. Ainsi, on propose d'étudier ces deux stratégies dans la suite de cette thèse.

### 5.2.5 Conclusion

Dans ce travail, le problème d'ordonnancement des paquets de localisation est adressé dans le cas d'une application de capture de mouvement avec un système radio IR-UWB. Pour cela, nous avons considéré nos résultats précédents (Sections 4.2 et 4.3) qui montraient l'impact de la mobilité sur l'estimation de distance, notamment par les délais de réponse et la vitesse des nœuds. Nous avons proposé de réduire cette erreur avec des stratégies d'ordonnancement les plus appropriées au niveau de la couche MAC. D'abord, nous avons considéré le cas du positionnement d'un nœud. Pour cela, nous avons défini différents schémas de transmission des paquets 3-WR qui jouent sur les délais des réponses pour atteindre un positionnement précis soit par l'estimation de distances plus précises (S3 et S4) ou soit par l'évaluation des distances plus proches de la position à estimer (S1 et S2). Ainsi, nos résultats montrent que l'ordonnancement S1 (où les requêtes sont envoyées groupées) est plus précis que l'ordonnancement classique par périodes (S3) pour le cas de positionnement d'un nœud mobile. Ensuite, nous avons également étudié l'ordonnancement pour le positionnement de plusieurs nœuds. Dans ce cas, il vaut mieux

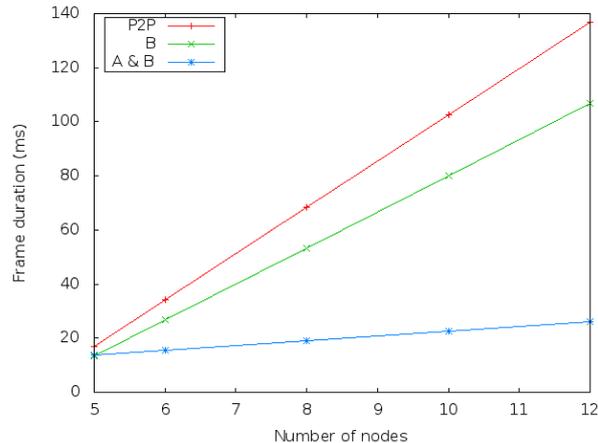


FIGURE 5.11 – Comparaison des durées de trames en fonction du nombre de nœuds entre P2P(rouge), P2P-B (vert) et A&B (bleu).

estimer la position des nœuds un par un (B-S7) pour le cas des applications de capture de mouvement en temps réel, tandis que l'ordonnancement où les ancres répondent une par une (B-S5) est plus adapté pour les applications de reconnaissance de postures.

De cette étude, nous pouvons conclure que l'ordonnancement a un impact sur l'estimation de la position des nœuds mobiles. Ainsi, nous avons défini les trois stratégies d'ordonnancement (P2P, P2P-B et A&B) à utiliser pour la suite de nos études. Or, un autre aspect qui peut augmenter le niveau de précision est avec les politiques de gestion sur l'attribution des ressources. Ainsi, nous proposons de compléter l'étude sur l'impact de la mobilité avec l'analyse de l'allocation des slots pour les nœuds mobiles avec un autre scénario de mobilité plus dynamique, par exemple la marche.

### 5.3 Étude sur l'allocation de ressources pour l'estimation de distance

L'attribution des ressources est une méthode de contrôle d'admission au canal utilisé par la couche MAC pour éviter les interférences et l'encombrement du réseau. L'allocation de slots est une de ces méthodes utilisées dans les cas des protocoles basés sur la réservation (TDMA). Les travaux qui traitent de l'allocation de slots dans le contexte WBAN [Rahim 12] [Ullah 12] se concentrent principalement sur quatre critères : l'efficacité énergétique [Kong 13], la QoS [Liu 11a] [Yan 12], l'équité de transmission [Misra 15] et la fiabilité [Ben Hamida 14]. Ainsi, [Kong 13] propose un mécanisme d'allocation de slots pour une application médicale avec un WBAN composé de nœuds hétérogènes : chaque capteur est caractérisé par le type d'information à envoyer, le taux d'échantillonnage des données et la consommation énergétique. Pour ces raisons, le protocole proposé repose sur le principe du TDMA pour allouer un nombre de ressources à chaque nœud en fonction de la consommation d'énergie définie par le réseau pour chaque capteur et le besoin minimal en données pour maintenir le service médical (QoS) dans les meilleurs délais. [Misra 15] propose une approche d'attribution différente pour les situations d'urgence médicale en fonction du type d'urgence et la criticité de l'information à envoyer. Dans ce

### 5.3. Étude sur l'allocation de ressources pour l'estimation de distance

---

mécanisme, les nœuds coordinateurs sont connectés aux dispositifs placés sur le corps et la transmission s'effectue avec un algorithme de jeu évolutif non-coopératif (appelé hawk-dove game) où les coordinateurs choisissent le nombre de slots qui vont être alloués à leurs nœuds en fonction de trois critères : un facteur d'équité de transmission, l'information d'urgence et la consommation d'énergie. Ces deux mécanismes n'ont pas été testés dans des scénarios réels ou avec la prise en compte de toutes les contraintes du WBAN, notamment les variations du canal. Pour adresser ce dernier point, [Liu 11a] a proposé d'améliorer la QoS, en parallèle avec la gestion de la perte de paquets, avec des périodes de contention pour une retransmission. En revanche, l'utilisation du canal et l'efficacité énergétique diminuent à cause de la période de contention. En outre, [Yan 12] propose une solution mixte basée sur le TDMA et l'analyse de la qualité des liens. L'objectif est d'améliorer l'efficacité énergétique avec une attribution de slots en fonction de la QoS et de l'historique le plus récent du canal dans une topologie en étoile. Ainsi, la perte de paquets est améliorée par l'affectation d'un certain nombre de slots (au-dessous d'un seuil calculé) aux nœuds en fonction de la fiabilité de leur canal avec le coordinateur. Dans le même esprit, [Ben Hamida 14] propose une politique de gestion de l'attribution des slots basée sur la qualité du lien à long et court termes. Le coordinateur alloue les slots en fonction de la fiabilité avec les autres capteurs sur le corps, i.e. pour placer au début de la trame les nœuds avec la meilleure qualité du lien et à la fin les nœuds difficiles d'atteindre.

Cependant, dans notre cas de radio-localisation avec WBAN, aucune de ces solutions d'allocation de slots ne s'inscrit avec nos prérequis. Par exemple les nœuds dans notre réseau sont plus homogènes et les principales exigences sont la latence et la précision pour la localisation. Cependant, la stratégie qui évalue le canal à court et long terme pourrait être adaptée pour traiter le canal WBAN et augmenter la fiabilité de transmission. Nous devons donc vérifier si la mobilité des nœuds a un impact sur la localisation en fonction de l'allocation de slots. Dans cette étude, nous proposons d'évaluer l'erreur de positionnement avec une nouvelle politique de gestion pour l'attribution de slots en fonction du niveau de mobilité des nœuds dans deux scénarios réalistes [Guizar 15a] [Guizar 15e]. Ensuite, nous présentons la performance du positionnement de ces schémas d'allocation avec différentes stratégies d'ordonnement des paquets 3-WR basées sur nos résultats de l'étude précédente (Section 5.2).

#### 5.3.1 Configuration du système

Nous considérons un seul WBAN complètement maillé dans le cas d'un environnement à l'intérieur avec deux catégories de nœuds : les nœuds ancrés placés aux positions les plus statiques du corps (par exemple le torse et le dos) et qui ont connaissance de leur propre position pour composer un système de coordonnées locales (LCS) ; et les nœuds mobiles sur le corps, dont leurs positions sont inconnues. Comme précédemment, notez que notre LCS est mobile et on suppose qu'il est aligné relativement avec un système de coordonnées globales (GCS).

#### 5.3.2 Modèles de mobilité

Dans cette étude, nous considérons deux scénarios de mobilité de 100 secondes obtenus par mesure, comme présenté dans le chapitre 3.4. Pour les deux modèles (Figure 5.12), les nœuds mobiles sont placés aux mêmes endroits que dans notre étude précédente (section

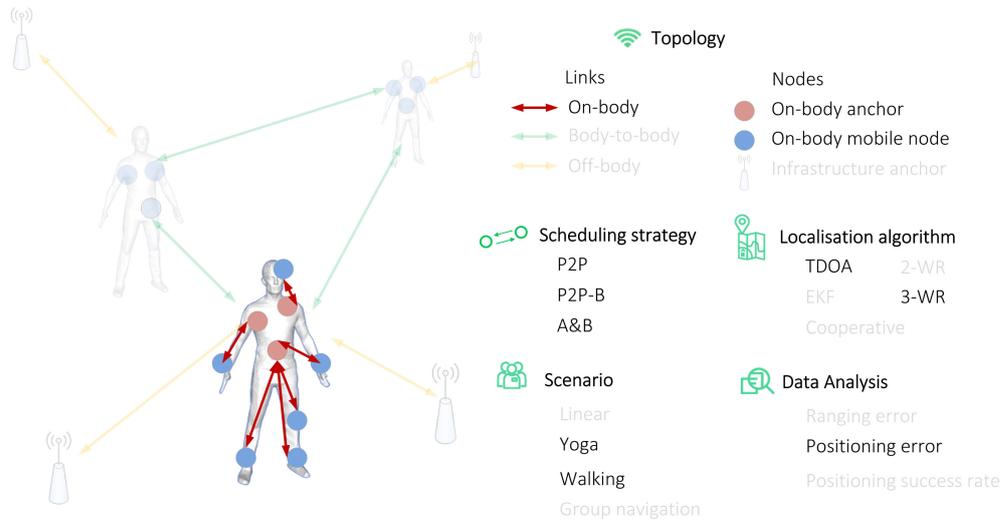


FIGURE 5.12 – Configuration du système pour l'étude de l'impact de l'allocation de slots en fonction de la mobilité des nœuds

5.2.3.A). Dans le premier scénario, appelé l'activité de yoga, le sujet réalise une série de positions statiques dans le même endroit pour imiter différents postures de yoga (Section 4.3.1). Le deuxième modèle de mobilité représente le scénario d'un piéton en marche où la personne commence à se déplacer à partir du milieu de la scène, pour rejoindre une trajectoire rectangulaire centrée sur le point de départ [Denis 14] (chapitre 3.4).

### 5.3.3 Allocation de slots par niveau de mobilité

Outre les stratégies d'ordonnancement (P2P-B et A&B) pour réduire les délais des transactions 3-WR, nous proposons de modifier l'allocation de slots pour réduire l'erreur du positionnement en fonction du niveau de mobilité des nœuds. Pour cela, nous définissons trois niveaux de mobilité en fonction de la vitesse des nœuds : haute, moyenne et faible. Dans ce cadre, nous analysons quatre permutations différentes des slots alloués à chaque nœud en fonction de son niveau de mobilité, regroupées sur la Figure 5.13 :

- **NS1** où les nœuds plus (resp. moins) mobiles sont positionnés au début (resp. à la fin) de la trame.
- **NS2** où les nœuds plus mobiles sont positionnés au milieu de la trame.
- **NS3** où les nœuds plus (resp. moins) mobiles sont placés à la fin (resp. au début) de la trame.
- **NS4** où les nœuds moins mobiles sont placés au milieu de la trame.

Dans notre scénario avec quatre ancres ( $A_1$  à  $A_4$ ) et quatre nœuds mobiles ( $N_5$  à  $N_8$ ) (Figure 5.13), nous considérons que les nœuds  $N_5$  et  $N_6$  (placés dans les poignets) ont le niveau de mobilité le plus grand pour les deux scénarios (marche et yoga). Le nœud  $N_7$  (sur le pied) est considéré avec une mobilité moyenne (resp. haute) pour le scénario yoga (resp. marche).  $N_8$  (sur la tête) est toujours considéré avec un niveau de mobilité bas pour les deux scénarios.

### 5.3. Étude sur l'allocation de ressources pour l'estimation de distance

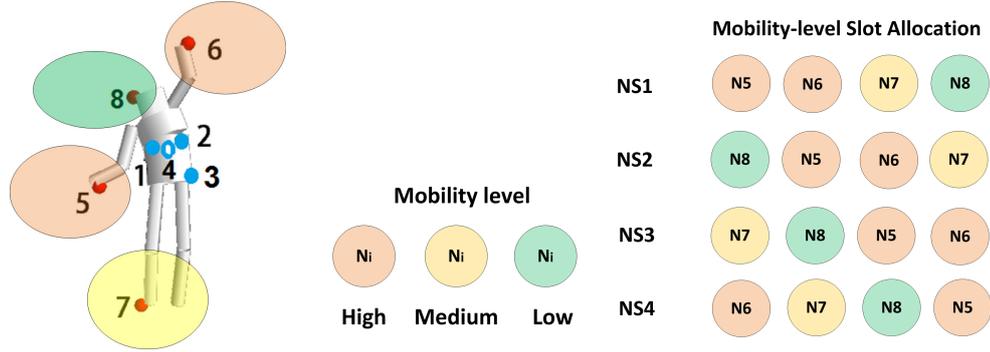


FIGURE 5.13 – Allocation de slots ( $NS_k$ ) en fonction du niveau de mobilité avec 4 nœuds mobiles.

#### 5.3.4 Simulation & Résultats

Comme dans les études précédentes, nous effectuons une simulation basée sur des événements discrets avec WSNNet pour évaluer la précision de positionnement en fonction du schéma d'allocation de slots par niveau de mobilité et la stratégie d'ordonnancement (P2P-B et A&B), implémentés au niveau de la MAC. Enfin, nous avons mis en place un modèle de mobilité qui permet d'exploiter les traces de nos deux scénarios (yoga et marche), décrits dans la Section 5.3.2. La précision de positionnement est quantifiée avec l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre une position de référence connue ( $P_{ref,r,i}(t)$ ) et la position estimée ( $\hat{P}_i$ ) au cours de  $N_f$  trames, tel que définie par l'équation 5.1.

Avec ce *framework*, chaque nœud  $i$  effectue une localisation distribuée avec les transactions 3-WR pendant toute la simulation. À chaque trame,  $i$  estime sa position dont la précision est évaluée par rapport à une position de référence  $P_{ref1,i}(t)$ ,  $P_{ref2,i}(t)$  ou  $P_{final,i}(t)$  (Figure 5.10).

#### A. Impact de l'allocation des slots sur la précision du positionnement avec P2P-B et le scénario Yoga

D'abord, nous évaluons la performance des différents schémas d'allocation de slots en fonction du niveau de mobilité avec P2P-B dans le scénario de yoga. Ce scénario étant déjà enregistré et non reproductible, on définit un facteur de 1 à 10 afin d'accélérer artificiellement la vitesse des nœuds du modèle de mobilité (la valeur 1 correspond à la vitesse du scénario réel). La Figure 5.14 montre la variation du RMSE sur les positions estimées ( $P_{ref1,i}$ ,  $P_{ref2,i}$  et  $P_{final,i}$ ) avec chaque schéma d'allocation. En premier, nous pouvons observer que le RMSE augmente quasi-linéairement avec la vitesse. En fait, cela confirme les conclusions de nos études précédentes : la distance parcourue au cours des transactions 3-WR change avec la mobilité des nœuds, ce qui génère une erreur sur les estimées et donc, une erreur sur la précision du positionnement. La Figure 5.14(a) montre que NS1 est la meilleure stratégie pour estimer  $P_{ref1,i}$ . Cela est dû au fait que les nœuds plus mobiles sont positionnés au début de la trame et donc, leur estimation de position est plus proche de la position de référence initiale. En outre, les nœuds placés à la fin de la trame ont un niveau de mobilité plus bas, ce qui conduit, mécaniquement, à un impact plus faible sur le RMSE. De même, la Figure 5.14(b) montre que NS3, où les nœuds plus mobiles se placent à la fin de la trame, permet de mieux estimer  $P_{final,i}$ . Enfin, nous

## Chapitre 5. Réduction de l'erreur sur l'estimation de la distance et du positionnement des nœuds

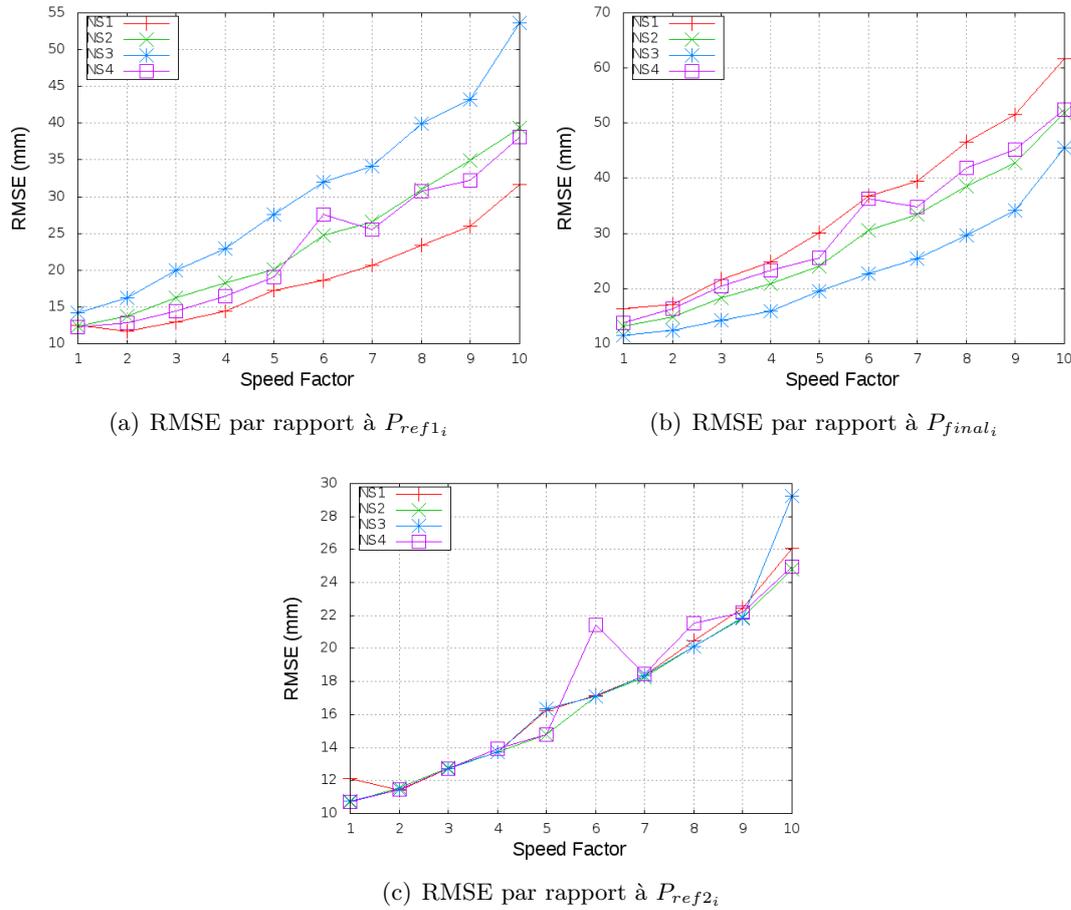


FIGURE 5.14 – Impact de l'allocation de slots par niveau de mobilité sur la précision de positionnement avec P2P-B dans le scénario yoga.

observons dans la Figure 5.14(c) que l'estimation de  $P_{ref2,i}$  présente moins d'écart entre les différents stratégies d'allocation  $NS_k$ . Cela veut dire que l'estimation de  $P_{ref2,i}$  est moins sensible à la répartition de slots par niveau de mobilité. Elle pourra donc être considérée comme un choix de position de référence lorsque le niveau de mobilité des nœuds ne peut pas être classifié, ou varie très rapidement.

### B. Comparaison de l'impact sur le positionnement entre P2P-B et A&B

Dans cette étude, nous comparons les performances de P2P-B et A&B pour estimer les trois positions de référence avec les différents schémas d'allocation en fonction de la mobilité. Cette analyse repose sur le même scénario de yoga (Section 5.3.2). La Figure 5.15 représente la distribution des RMSE pour toutes les stratégies d'allocation ( $NS_i$ ) avec P2P-B et A&B. Cette distribution est modélisée par une boîte à moustaches (en anglais *box plot*) qui montre l'évolution du RMSE suivant la médiane. Les résultats montrent la dispersion du RMSE obtenu avec les différentes  $NS_k$  pour chaque vitesse. Dans le cas d'utilisation de P2P-B (Figure 5.15(a)), nous pouvons observer que l'écart

### 5.3. Étude sur l'allocation de ressources pour l'estimation de distance

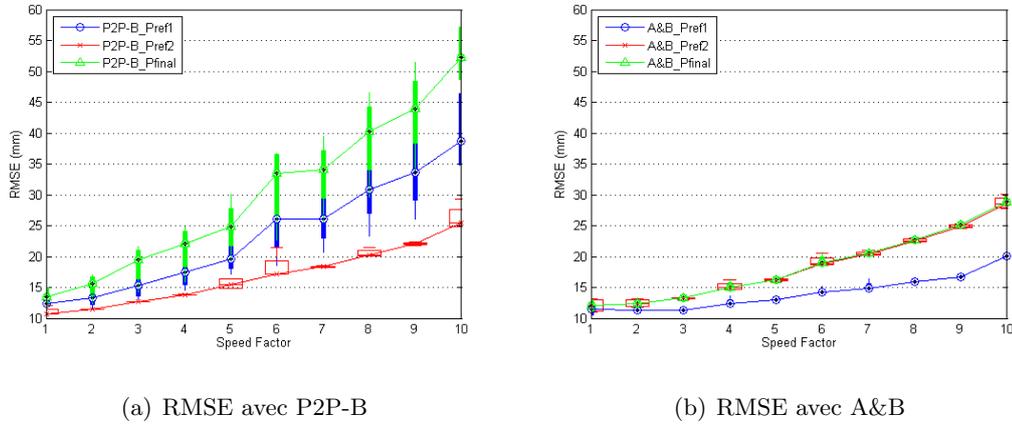


FIGURE 5.15 – Distribution du RMSE pour tous les  $NS_k$  dans le scénario yoga.

du RMSE est important entre les différents schémas d'allocation pour l'estimation de  $P_{ref1,i}$  et  $P_{final,i}$ . De plus,  $P_{ref2,i}$  est celle qui est la mieux évaluée avec P2P-B pour tous les schémas d'allocation. D'autre part, la Figure 5.15(b) montre que A&B n'est pas affecté par les attributions  $NS_k$ . Par conséquent, A&B permet une plus grande liberté dans le choix de l'allocation de slots par niveau de mobilité. Nous pouvons noter également que  $P_{ref1,i}$  bénéficie d'une meilleure estimation avec A&B, grâce à un  $\Delta t_1$  considérablement réduit et aux estimations de distances qui correspondent mieux aux distances de la position initiale. Si nous comparons A&B avec P2P-B, nous pouvons observer que A&B réduit l'erreur moyenne par un facteur de 2 pour l'estimation de  $P_{ref1,i}$  et  $P_{final,i}$ . Ainsi, nous pouvons conclure que la cohérence (ou la faible dispersion) entre les distances estimées (cas A&B) par rapport à la position souhaitée, est plus importante que d'avoir une plus grande précision sur chaque distance individuelle (cas P2P-B).

Sur la base de ces observations, nous pouvons identifier les deux scénarios opposés par rapport au choix de la position de référence et la stratégie d'ordonnancement : le pire cas (PC) et le meilleur cas (MC). Le meilleur cas où A&B (resp. P2P-B) réalise la localisation par rapport à  $P_{ref1,i}$  (resp.  $P_{ref2,i}$ ). Il faut noter que pour le MC, le type allocation de slot utilisée n'a pas d'impact sur la précision avec les deux stratégies d'ordonnancement P2P-B et A&B. Et le pire cas, où A&B et P2P-B effectuent l'estimation de positions par rapport à  $P_{final,i}$  avec l'allocation de slots NS1 (avec les nœuds les plus mobiles placés au début de la trame). Ainsi, MC et PC permettront de connaître l'intervalle d'erreur possible selon le scénario de mobilité étudié.

#### C. Évaluation de l'erreur de positionnement avec P2P-B et A&B pour les scénarios de Yoga et Marche

Dans cette dernière étude, nous proposons d'évaluer plus finement l'erreur du positionnement avec les PC et MC en utilisant deux modèles de mobilité, à partir des scénarios de la marche et du yoga (Section 5.3.2). Les Figures 5.16 et 5.17 représentent la fonction de distribution cumulative (CDF) de l'erreur quadratique moyenne sur tous les nœuds. On peut vérifier que la distribution de l'erreur de positionnement dépend du scénario de mobilité et du protocole d'ordonnancement utilisé. Si nous comparons

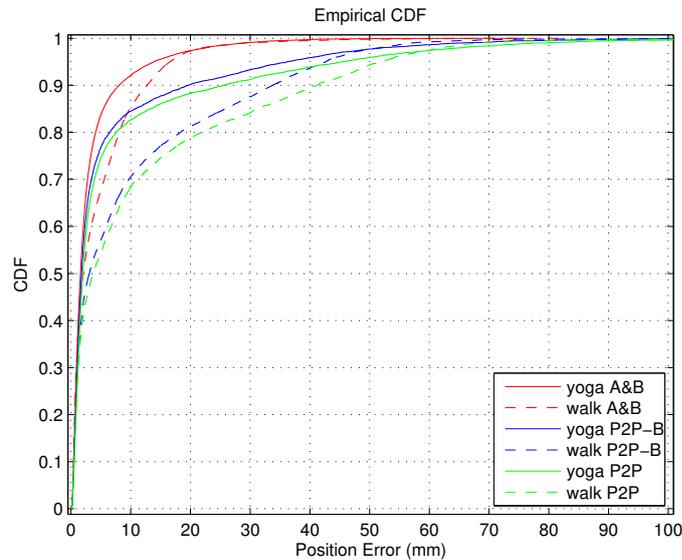


FIGURE 5.16 – CDF du RMSE pour le pire cas : A&B et P2P-B par rapport à  $P_{final_i}$  avec NS1.

les modèles de mobilité, nous observons que le scénario du yoga (caractérisé par une faible mobilité) présente naturellement une erreur de positionnement inférieure à celle du scénario de marche (caractérisé par une plus grande mobilité).

Le Tableau 5.1 résume les résultats sur l'erreur moyenne de positionnement pour toutes les situations. Nous pouvons noter que le niveau de l'amélioration obtenue en utilisant A&B à la place de P2P-B dépend du scénario de mobilité. Dans le cas de l'activité du yoga, le gain avec A&B est faible pour le MC (10%) et plus important pour le PC (50%). Dans le cas de la marche, on obtient un gain de 50% pour les PC et MC. Or, pour l'estimation des positions à la fin de chaque trame ( $P_{final_i}$ ), A&B permet de toujours réduire l'erreur moyenne de 50% avec une erreur maximum de 60 mm pour les deux scénarios de mobilité (Figure 5.16). Si l'on analyse le MC, dans le cas d'une mobilité dynamique (marche), l'utilisation de A&B permet de réduire l'erreur de positionnement liée à la mobilité de 50% et donc, il vaudrait mieux prioriser l'utilisation de A&B. Or, dans le cas d'un scénario à mobilité réduite (yoga), la différence de l'erreur moyenne entre P2P-B et A&B n'est pas très importante. Par conséquent, l'utilisation de P2P-B reste pertinente dans ce cas.

Enfin, pour compléter cette étude, nous avons également comparé nos résultats sur la performance de positionnement avec l'ordonnancement simple P2P (Section 5.2.3, appelée stratégie S7), qui ne fait pas du broadcast et envoie toutes les transmissions de paquets pair à pair. Ainsi, nous pouvons constater que le RMSE de P2P est très proche de celui de P2P-B, ce qui montre que le gain est plus important avec l'agrégation des réponses (A&B) plutôt que par la transmission de requêtes en broadcast (P2P-B). Par conséquent, nous pouvons conclure que pour réduire au maximum l'erreur générée par la mobilité, il vaut mieux utiliser A&B pour estimer les positions des nœuds au début de chaque trame et ceci est possible avec toutes les stratégies d'allocation de slots proposées.

### 5.3. Étude sur l'allocation de ressources pour l'estimation de distance

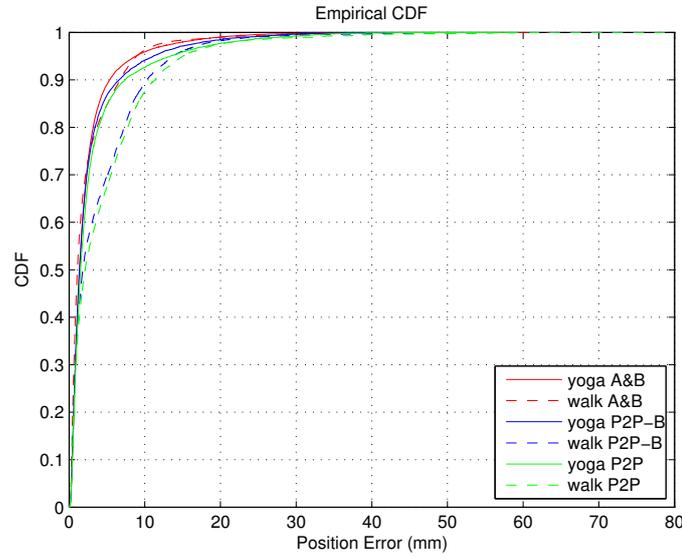


FIGURE 5.17 – CDF du RMSE pour le meilleur cas : A&B (resp. P2P-B) par rapport à  $P_{ref1_i}$  (resp.  $P_{ref2_i}$ ) indépendamment du  $NS_k$ .

TABLE 5.1 – Erreur moyenne sur l'estimation de position avec les PC et MC

Erreur Moyenne (mm)		Yoga	Marche
Pire	P2P-B	6,6	10,6
Cas	A&B	3,4	4,4
Meilleur	P2P-B	2,8	4,1
Cas	A&B	2,5	2,6

#### 5.3.5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons quantifié l'impact de la mobilité sur l'estimation de position avec différents schémas d'allocation de slots dans deux scénarios de mobilité réalistes. Pour cela, nous avons comparé deux stratégies d'ordonnancement (A&B et P2P-B) avec une nouvelle politique de gestion sur l'attribution de slots qui prend en compte le niveau de mobilité des nœuds. Ainsi, nous évaluons l'estimation des positions réelles instantanées ( $P_{ref2,i}$ ), au début ( $P_{ref1,i}$ ) et à la fin ( $P_{final,i}$ ) de chaque trame. Nos résultats préliminaires avec P2P-B montrent que la répartition de slots aux nœuds les plus mobiles au début (resp. à la fin) de la trame permet d'avoir une estimation plus précise de  $P_{ref1,i}$  (resp.  $P_{final,i}$ ). En outre, la politique d'allocation par rapport au niveau de mobilité n'a pas montré un impact lors de l'estimation de la position instantanée ( $P_{ref2,i}$ ) avec P2P-B. D'autre part, nous avons mis en évidence qu'une stratégie d'agrégation et diffusion (A&B) peut réduire l'impact de l'allocation de slots, ce qui permet une plus grande flexibilité dans le déploiement des capteurs sur le corps, et dans les mouvements potentiellement observables. Avec cette même stratégie, nous avons montré que  $P_{ref1,i}$  devient la meilleure position de référence à évaluer du fait du délai réduit pour les premières réponses. Ainsi, si l'on prend en compte uniquement l'erreur générée par la

mobilité, A&B montre une meilleure performance que P2P-B en termes de latence et de précision pour tous les scénarios étudiés.

Cependant, comme expliqué dans l'introduction, la mobilité n'est pas le seul problème pour la localisation. En effet, nous avons fait l'hypothèse d'un canal parfait, alors que dans un WBAN, les variations du canal peuvent également donner à des erreurs de positionnement à deux niveaux. En premier lieu, le canal peut gêner la précision des distances estimées et donc, la position. Or, notre approche de positionnement avec uniquement le TDOA avec LLS n'est pas optimale. Pour ces raisons, nous proposons d'étendre cette étude avec la prise en compte de l'erreur générée par la mobilité et le canal (montrées dans la Section 4.4) pour améliorer le calcul de positions avec une méthode de localisation bayésienne par un filtre de Kalman étendue (EKF) [Yu 12]. C'est l'objet du Chapitre 5.4.

### 5.4 Amélioration de l'algorithme coopératif de calcul des positions

Dans cette dernière partie de chapitre, nous souhaitons analyser et augmenter la précision du positionnement de plusieurs WBANs qui se déplacent en groupe, en utilisant une approche bayésienne pour réduire les erreurs d'estimation. Or, l'estimation de position des nœuds peut s'effectuer par une approche centralisée (où les estimations sont transmises vers un nœud central) ou décentralisée (où chaque nœud collecte les mesures de distance par rapport à des nœuds de référence voisins ayant la connaissance préalable de leur propre position). Dans un WBAN, les nœuds sont généralement limités en capacité de calcul et d'énergie. Pour cela, les approches décentralisées [Ben Hamida 10] [Hamie 14c] sont plus adaptées du fait qu'elles permettent de réduire à la fois le temps de latence de convergence et la complexité de calcul. Cependant, ces critères vont dépendre de la technique utilisée pour estimer la distance, ainsi que de la taille du réseau.

Dans les chapitres 4.2 et 4.3, nous avons montré que le retards des paquets 3-WR peuvent générer une erreur sur les estimations à cause de la mobilité des nœuds sur le corps. Un moyen pour réduire cette erreur est avec une bonne gestion des ressources au niveau MAC, par exemple par la réduction de la latence des réponses avec l'ordonnancement des paquets 3-WR (Chapitre 5.2) et avec l'allocation de slots en fonction de la mobilité (Chapitre 5.3). En outre, il existe une autre source d'erreur évidente mais plus importante qui est générée par le canal de propagation du WBAN, dans lequel le signal transmis peut être affecté par les effets de propagation NLoS, les effets des trajets multiples ou plus simplement, par le bruit additif à faible SNR. La combinaison de ces deux effets nocifs (i.e. la mobilité du corps et la variation du canal), si elle n'est pas traitée correctement, peut générer une erreur sur les distances estimées et par conséquent, une dégradation irréversible sur la précision du positionnement.

Dans le Chapitre 4.4, nous avons adressé ce problème par la quantification de ces deux erreurs de distance spécifiques des WBANs, ainsi que les erreurs de localisation liées au scénario étudié, basé sur des traces de mobilité réalistes obtenues par mesure avec un groupe de WBANs (Chapitre 3.3). Dans ces résultats préliminaires, nous avons montré que l'intervalle de l'erreur due à la mobilité peut être modélisé par une distribution gaussienne pour tous les types de lien (on-body, body-to-body et off-body). Par conséquent, nous proposons d'exploiter cette observation de gaussianité sur l'erreur pour fournir

## 5.4. Amélioration de l'algorithme coopératif de calcul des positions

---

une meilleure précision du positionnement, avec la prise en compte d'une approche de localisation bayésienne, par exemple par un filtre de Kalman adapté.

Or, [Hamie 13a] avait déjà abordé le problème conjoint de positionnement sur la capture de mouvement individuel et la navigation sur des trajectoires en intérieur dans le contexte d'un WBAN hétérogène. Dans ce travail, deux approches ont été présentées pour estimer les positions absolues des nœuds sur le corps dans un système de coordonnées globales. La première approche consiste à calculer la localisation relative des nœuds à l'échelle du corps, pour ensuite appliquer des transformations pour la localisation absolue par rapport aux nœuds placés dans l'infrastructure. De cette manière, la latence de positionnement est réduite pour tous les nœuds. La deuxième approche propose de rendre plus fiable l'estimation de distance lors des obstructions du corps avec la connaissance préalable de la connectivité des liens basée sur les distances estimées précédemment. Pour cela, ils proposent de modéliser le réseau WBAN avec un graphe où les nœuds représentent les sommets et les liens représentent les arêtes. Chaque arête contient l'information sur la connectivité et la distance mesurée à chaque période. Ainsi, les nœuds on-body peuvent calculer les distances des chemins les plus courts pour atteindre les autres nœuds. Puis, lorsqu'une obstruction empêche de calculer la distance directe entre un nœud et une ancre off-body, ce nœud pourra communiquer avec un autre nœud on-body (ayant une meilleure connectivité avec l'ancre) pour estimer sa distance par une approximation triangulaire. Cependant, ce travail a été réalisé sans prendre en compte les différentes contraintes qui peuvent affecter la communication au niveau MAC ou un modèle de mobilité réaliste.

En ce qui concerne les applications de navigation collective en intérieur avec des WBANs, la plupart des travaux avec expérimentations sont basés sur des mesures RSSI dans le cadre des réseaux capteurs et donc, moins réaliste pour la caractérisation nécessaire des liens body-to-body et off-body pour les scénarios CGN. Par exemple, [Dieng 14] propose une approche basée sur un estimateur du maximum du vraisemblance (ML) avec différents critères (par exemple avec l'exclusion des données provenant d'un ou plusieurs repères affectés par les trajets multiples) pour détecter et éliminer les mesures de RSSI aberrantes et les remplacer par des biais constants, et ainsi évaluer la position des nœuds. Ces résultats préliminaires indiquent que la meilleure stratégie de sélection dépend clairement du contexte, et ainsi, la performance sur le positionnement est améliorée par rapport à l'estimation du ML classique. Cependant, cette amélioration n'est pas assez précise pour des cas réalistes. Par conséquent, il est nécessaire de trouver de nouvelles stratégies de sélection améliorées (notamment pour les liens body-to-body). En outre, une approche plus empirique mais qui prend plus en compte des contraintes du contexte WBAN peut être trouvée dans les dernières contributions du manuscrit de thèse de Jihad Hamie [Hamie 13b]. Ce travail aborde le problème de la navigation individuelle en groupe, mais cette fois-ci avec une limitation sur le nombre de capteurs sur le corps. Dans un premier temps, ils ont adapté un algorithme de positionnement coopérative NLLS pour ce contexte avec la prise en compte de différents métriques de radio-localisation (i.e. basé sur le RSSI-NB ou le ToA-IR-UWB) pour les liens off-body et body-to-body. Ensuite, ils ont proposé un nouveau schéma de coopération pour la navigation individuelle qui consiste à estimer directement la position du centre de gravité sur le corps (i.e. sans estimer les distances entre les nœuds on-body), à partir des distances évaluées avec des nœuds dans l'infrastructure et de la connaissance préalable de la dispersion statistique des distances

entre les nœuds sur les corps. Ainsi, cette approche permet d'estimer une seule position (celle du centroïde), ce qui réduit à la fois la complexité du système et la consommation d'énergie. Enfin, pour compléter cette étude, ils comparent cet algorithme avec un EKF centralisé classique [Wann 11], où ils montrent que celui-ci peut être optimisé par la prise en compte des observations biaisées dues au shadowing du corps [Hamie 13c]. Cependant, ils ne prennent pas en compte le biais sur l'erreur générée par la mobilité. En outre, cette étude a été réalisée uniquement sur un focus de l'algorithme de localisation sans considérer un modèle de mobilité réaliste ou les différentes contraintes protocolaires de la couche MAC ou PHY.

Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle adaptation de la version coopérative du filtre de Kalman étendu EKF présenté dans [Hamie 13c]. Le but est de localiser les nœuds sur le corps à des fins de navigation à la fois individuelle et collective et d'atténuer les effets des différentes sources d'erreur (i.e. mobilité et canal WBAN) pour améliorer la précision du positionnement [Ouni 15]. Une idée intuitive est que l'écart type des erreurs de distance en conditions NLoS est beaucoup plus important que dans les conditions LoS [Denis 05] [Wann 11]. Ainsi, nous pouvons imaginer augmenter certains termes marginaux dans l'observation de covariance du filtre, avec la détection préalable des transitions du canal entre LoS et NLoS. Par exemple, nous pouvons envisager l'utilisation des paramètres statistiques (i.e. de l'erreur générée par le canal et la mobilité) pour tous les liens (i.e. on-body, body-to-body et off-body) montrés dans les Tables 4.1 et 4.2 trouvés du Chapitre 4.4.

### 5.4.1 Scénario de suivi et navigation coopérative

Nous considérons un scénario de navigation avec un groupe de WBANs dans un espace en intérieur où l'on déploie un ensemble de nœuds fixes dans l'infrastructure. Ces nœuds ancrés sont placés à des positions connues (et partagées par les différents ancrés) par rapport à un système de coordonnées globales GCS à trois dimensions. Chaque WBAN est défini par un ensemble limité de nœuds placés à des endroits fixes d'une personne dont la position évolue dans un environnement à l'intérieur. Nous considérons que les positions des nœuds sur le corps sont inconnues et doivent être estimées relativement aux ancrés. Pour cela, nous supposons un réseau complètement maillé où l'on distingue trois types de liens (Figure 5.18) : i) on-body ii) body-to-body ou iii) off-body. Les nœuds sur le corps se localisent avec la transmission de paquets pair à pair avec les autres nœuds ou les ancrés, tel que défini par le protocole 3-WR. Par la suite, nous nous référons à la localisation non-coopérative (resp. coopérative) lorsqu'un nœud effectue les transactions 3-WR avec les ancrés uniquement (resp. avec les ancrés et les autres nœuds sur le corps).

Avec ce système, notre objectif est d'estimer les positions des nœuds on-body à des instants consécutifs dans le temps. Par la suite, nous supposons que les mesures sont réalisées toutes les  $\tau$  secondes et nous notons  $\{X_i(k)\}_{i \in \{1..n\}}$  le vecteur qui contient l'ensemble des positions absolues (inconnues) à trois dimensions des  $n$  nœuds on-body à l'instant  $t = k\tau$ . On appelle également  $\{X_i(k)\}_{i \in \{n+1..n+m\}}$ , l'ensemble des positions absolues connues et fixes en 3D des  $m$  ancrés de l'infrastructure. Ainsi,  $\tilde{d}_{ij}(k)$  représente la valeur de la distance (ou pseudo-distance) estimée à l'instant  $t$  entre un nœud on-body  $i \in \{1..n\}$  et un autre nœud on-body ou une ancre  $j \in \{1..n+m\}$ . Ainsi, l'ensemble de distances  $\tilde{d}_{ij}(k)$  peut être obtenue, par exemple, avec une estimation biaisée du ToA du pulse [Hamie 13c] ou dans notre cas, avec une de nos stratégies présentées (P2P, P2P-B

## 5.4. Amélioration de l'algorithme coopératif de calcul des positions

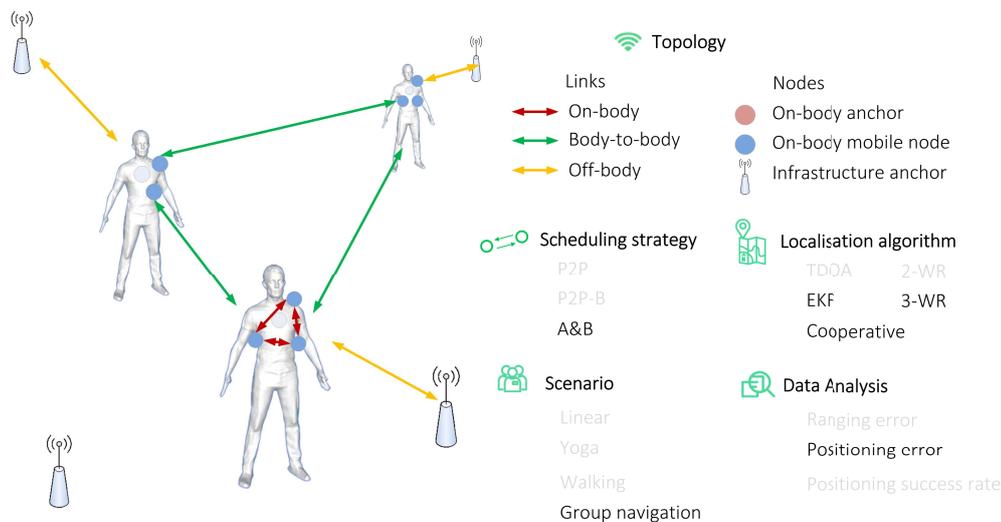


FIGURE 5.18 – Déploiement d'un système de WBANs coopératifs pour la localisation absolue des nœuds sur le corps dans les application de navigation avec trois types de liens : on-body (ligne rouge), inter-body (lignes vertes) et off-body (lignes jaunes).

ou A&B) dans les Chapitres 4.4, 5.2 et 5.3.

L'ensemble des ces estimations au moment  $k$  est regroupé dans un vecteur  $\tilde{d}(k)$  qui peut dynamiquement modifier sa longueur en fonction du nombre de mesures disponibles.

$$\tilde{d}(k) = [\{\{\tilde{d}_{ij}(k)\}_{j=n+1:n+m}\}_{i=1:n} \quad \{\{\tilde{d}_{ij}(k)\}_{j=1:n}\}_{i=1:n}] \quad (5.2)$$

Ainsi, le problème que nous allons résoudre consiste à déterminer les positions absolues des nœuds sur le corps  $\{X_i(k)\}_{i \in \{1 \dots n\}}$  (dans le GCS défini), à partir de la connaissance des positions des ancres de l'infrastructure et des mesures disponibles  $\tilde{d}(k)$  à l'instant  $k$ .

### 5.4.2 Filtres de suivi coopératif proposé

Dans les chapitres précédents (5.2 et 5.3), nous avons calculé les positions des nœuds avec une approche TDOA-LLS à partir des distances estimées avec nos différentes stratégies d'ordonnancement des paquets 3-WR. Cependant, cette approche de positionnement n'est pas très précise car elle ne prend pas en compte les différentes erreurs sur les distances estimées (i.e. liées à la mobilité des nœuds et les variations du canal). Pour cette raison, l'utilisation d'un filtre bayésien, tel que le filtre de Kalman, est souvent proposé pour améliorer le calcul des positions.

Le filtre de Kalman avait été proposé par R. E. Kalman en 1960 pour le filtrage linéaire et répondre au problème de prédiction [Kalman 60]. Le principe de ce filtre est d'estimer un ensemble de variables inconnues (vecteur d'état) à partir d'un ensemble d'observations (bruitées) obtenues dans le temps (vecteur d'observations). Ainsi, le filtrage de Kalman permet de trouver un estimateur linéaire quadratique moyen minimal du vecteur d'état. Pour cela, ce filtrage doit passer par deux étapes intermédiaires (la phase de prédiction et la phase de mise à jour) avant de trouver l'estimateur optimal. A la fin, l'estimateur optimal va essayer de calculer et mettre à jour le gain (nommé matrice gain de Kalman) qui minimise l'erreur.

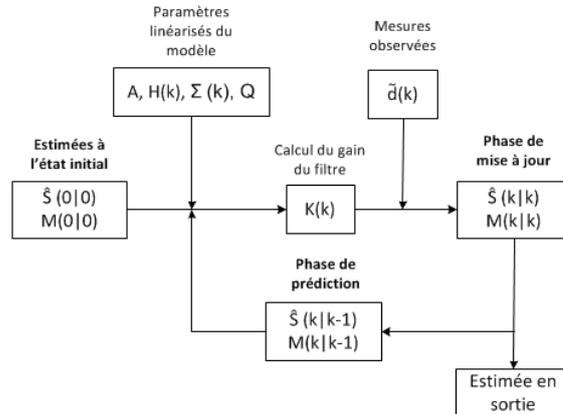


FIGURE 5.19 – Diagramme de blocs du EKF.

Dans le contexte de la localisation, cette technique permet de prendre en compte la connaissance des positions des états précédents pour augmenter la précision des positions futures. Or, le filtre de Kalman est basé sur l'hypothèse d'avoir comme entrée un modèle d'observation (par le vecteur d'observations) linéaire à chaque état et qui peut être affecté par un bruit variable considéré comme gaussien. Ainsi, le filtre de Kalman mène à un positionnement optimal si les critères de linéarité et gaussianité sont remplis. En pratique, la condition de linéarité n'est pas possible dans la plupart des cas soit par la mobilité et la géométrie des nœuds ou soit par des mauvaises mesures qui peuvent se produire par la perte du signal ou les multi-trajets.

Une alternative au problème de linéarité est l'utilisation d'une extension du filtre, tel que le filtre de Kalman étendu (EKF) [Denis 05] [Perälä 07] [Yan 12], qui linéarise les fonctions d'état et des mesures avec la trajectoire courante. Dans la littérature, le filtre de Kalman et ses extensions ont été largement étudiées et appliquées dans le contexte de localisation [Le 03] [Hamie 13a], grâce en partie par sa complexité de calcul raisonnable qui peut être adaptée aux appareils mobiles ou embarqués. Dans notre contexte, nous souhaitons atténuer les effets NLoS sur les distances estimées avec une approche "biaisée" du filtre, proposé par [Le 03], pour détecter et compenser les erreurs de mesure sur les positions. Ainsi, l'idée consiste à ajuster les éléments de la matrice de covariance du bruit mesuré à partir du feedback du filtre après l'étape de mise à jour des positions (Figure 5.19). Par la suite, on présente le modèle du filtre utilisé basé sur celui proposé par [Hamie 14b], puis on décrit l'ajustement sur la matrice de covariance du bruit observé sur les mesures, en prenant en compte les erreurs liées à la mobilité et le canal pour les différents types de liens.

## A. Filtre de Kalman étendu coopératif

Comme expliqué auparavant, les distances estimées par ToA sont définies comme des fonctions non-linéaires des positions de nœuds on-body. Pour cette raison, nous considérons un EKF [Yun 06] [Perälä 07] modélisé par les équations d'état et d'observation

#### 5.4. Amélioration de l'algorithme coopératif de calcul des positions

suivantes (basées en [Hamie 14b]) :

$$\begin{cases} \mathbf{S}(k) = \mathbf{A}.\mathbf{S}(k-1) + \mathbf{u}(k) \\ \tilde{\mathbf{d}}(k) = h(\mathbf{S}(k)) + \mathbf{n}(k) \end{cases}, \quad (5.3)$$

où  $\mathbf{S}(k) = [X_1^\tau(k) \ V_1^\tau(k) \ X_2^\tau(k) \ V_2^\tau(k) \ \dots \ X_n^\tau(k) \ V_n^\tau(k)]^T$  représente le vecteur d'état à  $6n$  dimensions à l'instant  $k$  en temps discret ( $t = k\tau$ ) qui regroupe les positions ( $X_i^\tau(k)$  mesurées toutes les  $\tau$  secondes) et les vitesses ( $V_i^\tau(k)$ ) à trois dimensions des nœuds sur le corps,  $\mathbf{A}$  représente la matrice de transition de l'équation d'état et  $h(\cdot)$  est la fonction qui montre la dépendance non-linéaire entre les mesures observées  $\tilde{\mathbf{d}}(k)$  et les variables du vecteur d'état.  $\mathbf{u}(k)$  et  $\mathbf{n}(k)$  représentent les vecteurs de bruit d'état (ou bruit du procès) et d'observation respectivement, dont leur matrices de covariance sont  $\mathbf{Q}$  et  $\Sigma(k)$ . De plus, il faut noter que  $\mathbf{n}(k)$  peut être ajusté de manière dynamique au cours du temps en fonction de la disponibilité et/ou la qualité des mesures.

Avec ces équations (5.3), on peut noter que l'équation d'observation (2<sup>ème</sup> ligne) doit être linéarisée avec le vecteur d'état, alors que l'équation d'état (1<sup>ère</sup> ligne) est supposée être linéaire localement. Ainsi, la matrice de transition  $\mathbf{A}$  est obtenue en première approximation de mouvements linéaires comme suit :

$$\mathbf{A} = \mathbf{I}_n \otimes \left( \mathbf{I}_6 + \left( \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \tau & 0 & 0 \\ 0 & \tau & 0 \\ 0 & 0 & \tau \end{pmatrix} \right) \right), \quad (5.4)$$

où  $\mathbf{I}_n$  représente la matrice d'identité à  $n$  dimensions (selon le nombre de nœuds sur le corps) et  $\otimes$  est le produit de Kronecker. Ainsi,  $\mathbf{A}$  représente l'information à priori qui relie les positions occupées à deux étapes consécutives  $k$  and  $k+1$ . L'implémentation de ce filtre EKF coopératif est réalisé par la séquence classique d'opérations (Figure 5.19) qui impliquent l'initialisation d'état, puis les phases de prédiction et de mise à jour qui sont calculées itérativement comme suit :

**Phase de prédiction :** cette étape consiste à calculer la prédiction  $\hat{\mathbf{S}}(k|k-1)$  sur les positions occupées à l'instant  $k\tau$  à partir de la dernière estimation disponible  $\hat{\mathbf{S}}(k-1|k-1)$  à l'instant précédent  $(k-1)\tau$  en utilisant l'équation d'état ( $S(k)$ ). Ainsi, les équations de l'état de prédiction sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{S}}(k|k-1) = \mathbf{A}.\hat{\mathbf{S}}(k-1|k-1) \\ \mathbf{M}(k|k-1) = \mathbf{A}.\mathbf{M}(k-1|k-1).\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \end{cases}, \quad (5.5)$$

où  $\mathbf{M}(k|k-1)$  représente la matrice de prédiction de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) et qui est calculée à partir des matrices de covariance de l'erreur de l'état précédent et du bruit de procès  $\mathbf{Q}$  de l'équation d'état ( $u(k)$ ). Il faut noter que ces calculs commencent avec l'estimation initiale  $\hat{\mathbf{S}}(0|0)$  qui correspond aux vitesses et aux positions initiales connues des nœuds. De plus, nous utilisons la même matrice de covariance  $\mathbf{Q}$  qui a été calculée de manière empirique par [Hamie 14b]). Pour cela, ils ont appliqué les positions réelles des nœuds à l'équation d'état (pour calculer  $\mathbf{u}(k) = \mathbf{S}(k) - \mathbf{A}.\mathbf{S}(k-1)$ ,  $\forall k$ ) et ils ont agrégé les résidus du bruit à chaque itération par simulation toutes les 30 ms. Ainsi, la variance a été calculée pour toutes les positions et vitesses de  $S(k)$  comme suit :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I}_n \otimes \begin{pmatrix} 0.004 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.002 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1253 \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

**Phase de mise à jour :** cette phase consiste à corriger l'erreur résultante lors de la prédiction en utilisant la linéarisée de la matrice de mesures de l'état et de la matrice de covariance de l'erreur d'observation. Pour cela, la matrice d'observation est linéarisée localement au premier ordre avec le vecteur d'état de la prédiction comme suit :

$$h(\mathbf{S}(k)) \approx h(\hat{\mathbf{S}}(k|k-1)) + \mathbf{H}(k)(\mathbf{S}(k) - \hat{\mathbf{S}}(k|k-1)),$$

où  $\mathbf{H}(k)$  représente la matrice Jacobienne d'observation :

$$\mathbf{H}(k) = \left. \frac{\partial h(\mathbf{S}(k))}{\partial \mathbf{S}(k)} \right|_{\mathbf{S}(k)=\hat{\mathbf{S}}(k|k-1)},$$

Cette matrice comprend les dérivations partielles de l'équation d'observation par rapport aux variables du vecteur d'état. Ensuite, il faut calculer le gain du filtre  $\mathbf{K}(k)$  qui minimise l'erreur quadratique moyenne sur l'estimation. Ce gain est une matrice calculée a priori à partir des estimations de la prédiction et les mesures observées, donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{M}(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T(k) \cdot \left( \Sigma(k) + \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{M}(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T(k) \right)^{-1}, \quad (5.7)$$

Enfin, l'estimation finale du vecteur d'état  $\hat{\mathbf{S}}(k|k)$  est calculée avec la combinaison des estimations prédites  $\hat{\mathbf{S}}(k|k-1)$  et des mesures observées  $\tilde{\mathbf{d}}(k)$  pondérées par le gain de Kalman, d'où les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{S}}(k|k) = \hat{\mathbf{S}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k) \cdot \left( \tilde{\mathbf{d}}(k) - h(\hat{\mathbf{S}}(k|k-1)) \right) \\ \mathbf{M}(k|k) = (\mathbf{I}_{6n} - \mathbf{K}(k) \cdot \mathbf{H}(k)) \cdot \mathbf{M}(k|k-1) \end{cases}, \quad (5.8)$$

où  $\mathbf{M}(k|k)$  représente la matrice MMSE de l'erreur d'estimation.

## B. EKF corrigé pour l'atténuation des effets intrinsèques de la mobilité

Le modèle précédent a été proposé par [Hamie 14b], pour atténuer les effets NLoS et compenser les erreurs de mesure. Dans ce travail original, la variance du bruit observé a été uniquement ajustée à la variation du canal [Hamie 13c]. Or, comme nous l'avons montré dans le Chapitre 4.4, la mobilité des nœuds affecte également l'estimation des distances selon le type de lien et par conséquent le calcul de positions. Pour cela, nous proposons de compenser ses erreurs par un nouveau ajustement sur les éléments diagonaux de la matrice de covariance du bruit observé  $\Sigma(k) = [\hat{\sigma}_{ii}(k)]$ .

Plus spécifiquement, notre proposition consiste à prendre en compte dans la matrice de covariance, les effets de la mobilité et du canal sur chacun des liens on-, off- et

## 5.4. Amélioration de l'algorithme coopératif de calcul des positions

body-to-body. Ainsi, les écarts-types de la mobilité sont incorporés par le système pour tous les liens (i.e.  $\hat{\sigma}_{on}$ ,  $\hat{\sigma}_{off}$  et  $\hat{\sigma}_{int}$ ) après la phase de mise à jour comme suit :

$$\hat{\sigma}_{ii}(k) = \begin{cases} (\hat{\sigma}_{ch}(k) + \hat{\sigma}_{on})^2, & \text{liens } on - body \\ (\hat{\sigma}_{ch}(k) + \hat{\sigma}_{int})^2, & \text{liens } inter - body , \\ (\hat{\sigma}_{ch}(k) + \hat{\sigma}_{off})^2, & \text{liens } off - body \end{cases}$$

où  $\sigma_{ch}$  représente l'écart type de l'erreur générée par le canal. Il faut noter que ceci est possible car la condition de gaussianité est respectée par la matrice de covariance. En effet, nous avons montré (Chapitre 4.4) que la caractérisation des ces erreurs liées à la mobilité suit une distribution gaussienne.

TABLE 5.2 – L'écart-type sur l'erreur de distance due à la mobilité des nœuds (m).

On-body	Inter-body	Off-body
$\mathcal{N}(0, 0.0042)$	$\mathcal{N}(0, 0.0343)$	$\mathcal{N}(0, 0.0433)$

TABLE 5.3 – L'écart-type sur l'erreur de distance due au bruit du canal (m).

On-body	Inter-body	Off-body
$\mathcal{N}(0, 0.1)$	$\mathcal{N}(0, 0.3)$	$\mathcal{N}(0, 0.3)$

### 5.4.3 Simulation & proposition

Pour valider notre modèle, nous évaluons par simulation les avantages de prendre en compte les effets de la mobilité et du canal selon le type de lien coopératif (on-, off- et inter-body). Pour cela, nous comparons le RMSE des positions calculées de manière coopérative avec un filtre EKF classique et notre filtre EKF ajusté au niveau des termes de la matrice de covariance du bruit observé. Ces termes sont modifiés avec les paramètres des modèles que nous avons trouvés dans le Chapitre 4.4 et qui sont montrés dans les Tables 5.2 et 5.3 pour caractériser les écart-types des erreurs générées par la mobilité et le canal respectivement. Nous considérons le scénario de mobilité pour la navigation en groupe avec trois personnes, tel que décrit dans la Section 5.4.1. Le vecteur  $\tilde{\mathbf{d}}(k)$  qui regroupe les mesures de distance est obtenu par simulation avec WSNNet, ainsi qu'une stratégie A&B pour l'ordonnancement des paquets 3-WR.

La Figure 5.20 montre la fonction de répartition du RMSE pour tous les nœuds entre les deux filtres EKF classique et ajusté. Nous pouvons observer que la solution proposée permet d'améliorer la précision sur la localisation des nœuds sur le corps avec une réduction de l'erreur moyenne de 48,7 à 44,2 cm, soit un gain de 9,1%. Ceci montre que l'intégration de la variance de l'erreur générée par la mobilité peut améliorer l'estimation de la position de 5cm dans le cas de la navigation.

Enfin, pour compléter cette étude, nous avons tracé également dans la Figure 5.21 la moyenne du RMSE des positions des nœuds placés sur chaque corps. Les barres bleues (resp. rouges) représentent le RMSE des positions en utilisant le filtre EKF classique (resp. ajusté). Nous pouvons observer que pour les trois personnes observées, nous avons une amélioration sur l'estimation des positions avec un gain moyen de 10.13% (soit 9.88%, 9.28% et 11.22% pour chaque corps respectivement). Il faut noter que la différence avec

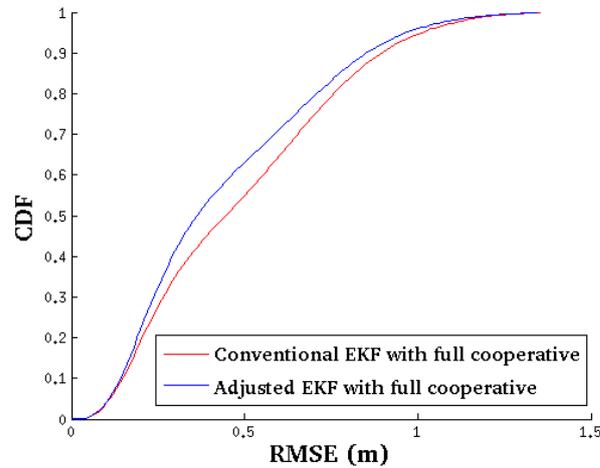


FIGURE 5.20 – CDF du RMSE des positions sur le corps obtenues de manière coopérative dans un scénario de navigation en groupe.

la troisième personne est vraisemblablement liée au fait qu'elle portait uniquement trois capteurs, contrairement aux autres qui portaient quatre nœuds. En effet, avec EKF, la précision sur les positions augmente lorsque nous avons plus de nœuds car la redondance d'information est supérieure. Par conséquent, le gain diminue lorsque le nombre de nœuds augmente. En revanche, le RMSE moyen augmente.

### 5.4.4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons décrit et évalué avec des simulations réalistes, un algorithme d'estimation amélioré qui traite conjointement la détection/capture du mouvement et l'amélioration de la navigation mono-utilisateur et collective avec des WBANs coopératifs et hétérogènes. Ainsi, nous avons proposé de réduire l'erreur de positionnement avec un ajustement simple au niveau d'un filtre EKF. Pour cela, nous avons donné suite à nos premières recherches sur la caractérisation de l'erreur sur la distance liée à la mobilité du corps et le canal. Puis, nous avons utilisé les modèles trouvés de ces erreurs au niveau de la matrice de covariance du bruit observé du filtre. Ainsi, en s'appuyant sur un modèle de filtre conventionnel adapté à notre problème, nous avons réalisé des simulations dans le cas de la navigation d'un groupe coopérative de trois personnes. Les résultats obtenus montrent un gain sur la précision des positions estimées des nœuds et qui dépend de la taille du réseau.

## 5.5 Discussion

Ce chapitre présente trois approches différentes pour réduire l'erreur sur l'estimation des positions générée par la mobilité des nœuds et les variations du canal WBAN, basées sur une couche physique UWB impulsionnelle. Nous avons montré dans le chapitre précédent que le calcul d'une position dépend de la précision sur les distances estimées qui peut être affectée par une mauvaise évaluation du ToF des signaux. Or, la mobilité des nœuds sur le corps et les variations du canal sont les raisons principales des erreurs sur ces estimations. En effet, l'erreur inhérente à la mobilité est générée par un problème

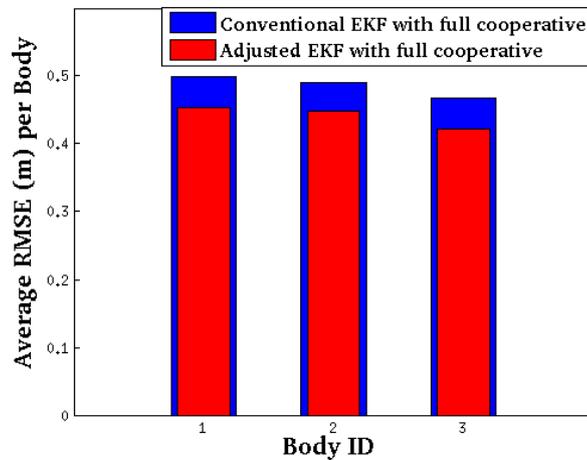


FIGURE 5.21 – RMSE moyenne des positions estimées des nœuds pour chaque corps avec un EKF coopératif classique et amélioré par l’atténuation de l’erreur liée à la mobilité.

de cohérence espace-temps entre les vraies distances et les mesures réalisées par le protocole de communication. L’erreur liée au canal est quand à elle produite par les effets d’obstruction du corps, les interférences et les évanouissements résultants par les multi-trajets. Ainsi, nous traitons ces deux problèmes séparément au niveau du protocole de communication de la MAC et de la couche application. D’abord, nous proposons différents schémas d’ordonnancement des paquets 3-WR et d’allocation de slot pour traiter le problème de l’erreur créée par la mobilité. Puis nous proposons une approche bayésienne qui corrige l’erreur de position avec une prédiction sur la position qui devrait être obtenue avec un filtre de Kalman qui prend en compte la covariance des bruits observés (par la mobilité et le canal) sur les mesures de distance.

Dans la première proposition (Section 5.2), nous considérons différentes stratégies d’ordonnancement des paquets 3-WR pour l’estimation de la position de plusieurs nœuds WBAN placés sur le corps. Ces stratégies ont été conçues spécifiquement pour réduire les délais de réponse qui affectent la précision sur les estimations de distances. Ainsi, nous avons d’abord traité **le cas d’un nœud** qui s’essaie de se positionner relativement avec quatre ancres placés sur le corps. Nos premiers résultats ont montré qu’il existe un compromis au niveau protocole pour améliorer la précision sur l’estimation de la distance et de la position, autrement dit, nous avons trouvé qu’il vaut mieux choisir une stratégie qui estime des distances les plus proches de la position souhaité à estimer temporellement, même si ces distances ne sont pas très précises. Ensuite, nous avons élargi **l’étude avec plusieurs nœuds** mobiles où nous avons trouvé que la stratégie à choisir dépend de l’application de localisation. Par exemple, dans le cas de la capture du mouvement individuel des nœuds, la meilleure stratégie d’ordonnancement consiste à réaliser l’estimation des positions des nœuds un par un (schéma BS7) avec les ancres. Alors que pour une application de détection de postures, il faut plutôt estimer les positions des nœuds d’un seul coup (schéma BS5) avec la transmission des paquets requête en premier et l’envoi des réponses des ancres une à une. Il faut noter que cette étude est importante, car l’ordonnancement classique consistait à découper la transmission des paquets selon le type en trois étapes sans faire distinction sur les délais à tenir en compte

## Chapitre 5. Réduction de l'erreur sur l'estimation de la distance et du positionnement des nœuds

---

pour l'application finale.

Un deuxième mécanisme qui permet de limiter l'erreur générée par la mobilité est avec une politique d'allocation de slots dédiée au niveau MAC. Dans la Section 5.3, nous avons traité et comparé différents schémas de répartition de slots en fonction du niveau de mobilité des nœuds (bas, modéré et haut). De plus, nous avons testé ces schémas avec deux stratégies d'ordonnancement des paquets 3-WR basées sur nos résultats précédents (P2P-B et A&B). Pour cela, nous avons considéré deux scénarios de mobilité réalistes (yoga et marche) avec différentes caractéristiques. En tenant compte d'abord du cas yoga avec une stratégie P2P-B, nous avons trouvé que les schémas d'allocation avaient un impact différent selon la position qu'on souhaitait estimer au cours de la trame. En particulier, nous avons montré qu'il est plus efficace pour une stratégie P2P-B d'estimer  $P_{Ref2_i}$  et ceci est possible avec toutes les schémas d'allocation de slots. Alors que pour A&B, la meilleure précision est obtenue pour  $P_{Ref1_i}$  grâce au délai réduit de la première réponse. De plus, l'impact de la mobilité est négligeable avec A&B pour toutes les allocations de slots testées. De ce premier résultat, nous avons trouvé un pire cas et un meilleur cas d'utilisation d'allocation de slots pour nos deux stratégies d'ordonnancement. Ainsi, nos résultats montrent que dans le cas d'un scénario avec mobilité réduite, par exemple le Yoga, le gain sur la précision est plus faible entre les deux meilleures stratégies d'allocation avec P2P-B et A&B. Ceci peut être un avantage pour utiliser P2P-B dans le cas où la transmission des plusieurs paquets en broadcast (A&B) soit difficile. Or, lorsque l'on considère un scénario plus dynamique où les nœuds se déplacent différemment, par exemple le cas de la marche, la stratégie A&B montre une meilleure précision que P2P-B avec une flexibilité plus importante sur l'allocation de slots indépendamment de la vitesse de nœuds. L'originalité de cette approche est de pouvoir réduire l'erreur sur le positionnement générée par la mobilité avec des stratégies coopératives au niveau de la MAC.

Pour compléter cette étude, nous proposons une optimisation pour estimer les positions des nœuds de plusieurs WBANs dans le cas de la navigation en groupe. Pour cela, nous avons pris en compte notre étude du Chapitre 4.4 où nous avons quantifié et caractérisé l'erreur des différents liens WBAN (on-, inter- et off-body) à partir des traces de mobilité réalistes. En particulier, cette étude avait montré que les erreurs d'estimation sur les distances (générées par la mobilité des nœuds et les variations du canal) peuvent être modélisées avec une distribution gaussienne. Par conséquent, dans la Section 5.4, nous avons proposé de compenser les erreurs avec un filtre de Kalman étendu coopératif qui utilise les paramètres de la distribution gaussien de l'erreur au niveau de la matrice de covariance du bruit observé. Ainsi, cette solution montre une amélioration de 9% à 11% sur la précision de localisation des nœuds.

Enfin, nous pouvons conclure que les solutions de localisation avec des WBAN doivent prendre en compte à la fois les erreurs d'estimation liées à la mobilité et au canal. Cependant, pour créer un protocole inter-couche adéquat et flexible pour la localisation, il faut avoir une idée fine sur le comportement du canal WBAN. En effet, le canal peut aussi générer la perte de paquets qui peuvent être encore plus critiques pour le positionnement. Pour cette raison, nous allons étendre l'étude dans le chapitre suivant en considérant le taux d'erreur de paquet avec des modèles de canaux et des scénarios de mobilité réalistes pour évaluer l'impact des variations du canal à court terme et à long terme sur le taux de réussite de positionnement.

# 6 Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste

*"It doesn't matter how beautiful your theory is,  
it doesn't matter how smart you are.  
If it doesn't agree with experiment, it's wrong"*

— Richard P. Feynman, *American physicist*

## Sommaire du chapitre

---

6.1	Introduction . . . . .	134
6.2	Impact de la perte de paquets de distance sur le positionnement . . . . .	136
6.2.1	Configuration du on-body et scénario d'étude . . . . .	136
6.2.2	Hypothèses et formulation du problème . . . . .	137
6.2.3	Stratégies d'ordonnancement considérées pour la localisation . . . . .	137
6.2.4	Modèles de canal utilisés pour générer la perte de paquets . . . . .	138
6.2.5	Analyse du taux de succès de positionnement . . . . .	139
6.2.6	Discussion . . . . .	142
6.3	Quantification du taux de succès de positionnement . . . . .	142
6.3.1	Hypothèses et formulation du problème . . . . .	142
6.3.2	Évaluation de performance du taux de succès de positionnement . . . . .	143
6.3.3	Discussion . . . . .	145
6.4	Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds . . . . .	146
6.4.1	Formulation de la proposition . . . . .	146
6.4.2	Analyse du positionnement à long terme . . . . .	147
6.4.3	Analyse de la fiabilité du lien à court terme pour un positionnement coopérative et distribué . . . . .	149
6.4.4	Permutation conditionnelle des ancres sur le corps . . . . .	152
6.5	Discussion et perspectives . . . . .	162

---

### 6.1 Introduction

Dans nos chapitres précédents, nous avons considéré un canal sans pertes pour quantifier l'impact de la mobilité sur les estimations de distance et de position. Cependant, les erreurs d'estimation ne sont pas les seuls problèmes pour le positionnement d'un WBAN. En effet, les variations du canal, générées aussi par la mobilité du corps, peuvent produire la perte des paquets. Ceci est un problème critique puisque chaque nœud doit effectuer l'estimation des distances avec plusieurs ancres (au moins 3 ancres (resp. 4 ancres) pour un positionnement à deux (resp. trois) dimensions). Pour cela, la distance est évaluée grâce à la transmission de trois paquets tels que définis par le protocole 3-WR. Cependant, si l'un de ces trois paquets n'est pas correctement reçu, ceci entraîne la perte de l'estimation sur la distance et donc, de la position.

Ainsi, l'instabilité du canal WBAN est une autre caractéristique majeure du positionnement basé sur le système IR-UWB. En effet, la perte de paquets due au shadowing du corps peut être un problème encore plus critique que la précision, car elle conduit à la perte imminente de positionnement des nœuds on-body. Parmi les travaux qui ont traité ce problème, on peut citer [Ben Hamida 10]. Les auteurs montrent une comparaison sur la performance de localisation coopérative (certains nœuds mobiles sont considérés comme ancres virtuelles) et non-coopérative avec IR-UWB. Leurs résultats montrent que les approches de localisation coopérative sont plus robustes à la perte de paquets grâce aux bénéfices de la diversité spatiale et à la redondance des mesures. La coopération permet d'augmenter le *taux de succès de positionnement*, au prix d'une légère augmentation sur l'erreur de positionnement, la latence et la consommation d'énergie. Notez que cette approche coopérative repose sur le positionnement avec des *ancres virtuelles*, c'est à dire que les nœuds peuvent se positionner avec les autres nœuds mobiles de manière opportuniste. Pour cela, un nœud mobile peut devenir une ancre virtuelle uniquement s'il a estimé sa position avec les ancres de base et si le lien avec le nœud (qui souhaite se positionner) est libre d'obstructions. Cependant, ils ne considèrent que le relai opportuniste pour la coopération avec les ancres virtuelles. De plus, le modèle de mobilité du corps a été simulé avec un modèle biomécanique composé par des cylindres qui peut négliger certains aspects de la réalité lors du calcul du canal. Pour cette raison, nous proposons d'étudier la perte de paquets entre les nœuds d'un WBAN pour trouver un mécanisme qui améliore la fiabilité de manière proactive en utilisant des modèles de mobilité et de canal réalistes. Le but est d'augmenter le taux de succès de positionnement avec des stratégies coopératives inter-couche basées sur différents estimateurs de qualité de lien.

L'estimation de qualité du lien (LQE) est une technique fondamentale dans les communications sans fils pour faire face au manque de fiabilité des liens généré par les variations du canal. Cette technique est utilisée par différents protocoles pour différentes applications, tels que les algorithmes de localisation [Ben Hamida 10], le routage [Yang 13] et le contrôle de topologie [Ben Hamida 14]. Dans la littérature [Baccour 09], ces estimateurs sont classés principalement en deux catégories : les estimateurs basés sur le matériel (*hardware-based*) et les estimateurs basés sur le logiciel (*software-based*).

Les estimateurs de type *hardware-based* utilisent des métriques obtenues au niveau de la couche PHY après le traitement du signal, par exemple l'indicateur de qualité de lien (LQI), le rapport signal sur bruit (SNR) ou l'indicateur de puissance de signal reçu (RSSI). Ainsi, ces techniques sont faciles à implémenter et ne nécessitent pas généralement

de calculs supplémentaires. Cependant, ces mesures sont évaluées uniquement lorsque les paquets sont reçus avec succès. Par conséquent, ils peuvent surestimer les performances de transmission.

A l'inverse, les estimateurs de type *software-based* évaluent la qualité du lien en mesurant la bonne réception des paquets ou le nombre moyen de transmissions de paquets requis pour une réception réussie, par exemple le taux de réception de paquets (PRR), le nombre requis de transmissions de paquets (RNP), le nombre de transmission attendues (RNP) ou la moyenne mobile avec pondération exponentielle (EWMA). Le principal avantage de ces mécanismes est l'augmentation de la fiabilité et la précision de l'estimation de qualité du lien. Cependant, la plupart des ces LQEs ont été conçus pour les WSN pour détecter la présence de liens fiables sur le long terme. Par conséquent, ils ne sont pas adaptés pour le contexte spécifique des WBANs. En effet, les liens on-body sont caractérisés par un canal dynamique [Hamie 13c] [Lauzier 13] qui peut avoir un impact sur la stabilité du lien à court terme. Par exemple, les protocoles de routage et de contrôle de topologie, basés sur des estimateurs à long terme, ne recalculent pas l'information pour chaque variation du canal afin de réduire les coûts d'overhead, de complexité et d'énergie. Par conséquent, ils risquent d'ignorer certaines fluctuations transitoires sur la qualité du lien à court terme.

Dans notre contexte de localisation, si nous profitons de ces deux LQEs (à court et à long terme), nous serons en mesure de détecter les nœuds mobiles présentant les meilleures conditions de canal et de les proposer comme ancres virtuelles pour les autres nœuds mobiles. En effet, les LQEs à long terme peuvent aider à évaluer le taux de succès de positionnement pour identifier les nœuds ayant du mal à estimer leur position. Alors que les LQEs à court terme pourront détecter la durée de contact et inter-contact [Hamida 11] entre les nœuds et ainsi prédire la périodicité et la durée des liens fiables. La durée de contact est définie comme la période pendant laquelle un lien est fiable, alors que la durée d'inter-contact représente le temps pendant lequel un lien est perdu avant d'être rétabli. Un exemple d'utilisation de ces deux LQEs pour la localisation peut être trouvé dans [Yang 13], où les auteurs proposent un protocole de routage probabiliste qui exploite les avantages de l'analyse à court et à long terme lors du processus des chemins multi-hop pour relayer l'information inertielle des mouvements du corps. Leurs résultats expérimentaux montrent que le système de routage proposé est plus performant que les approches existantes en termes de taux de réception de paquets et de réduction du retard pour la fusion de données. Cependant, ce système ne peut pas s'appliquer à notre scénario, car il exploite des données inertielles, telles que la vitesse et l'accélération pour la prédiction à long terme de nœuds fiables.

Dans ce chapitre, nous proposons un algorithme coopératif distribué pour augmenter la performance de localisation des nœuds du WBAN. Pour cela, nous quantifions le taux de réussite de positionnement. C'est un LQE à *long terme* qui mesure la probabilité de réaliser l'estimation de distances avec le minimum d'ancres nécessaires pour un positionnement à trois dimensions. Ensuite, nous analysons les variations du canal à *court terme* entre les différents nœuds du WBAN afin d'identifier les nœuds mobiles les plus adaptés pour devenir des ancres virtuelles coopératives pour les nœuds ayant un taux de positionnement faible.

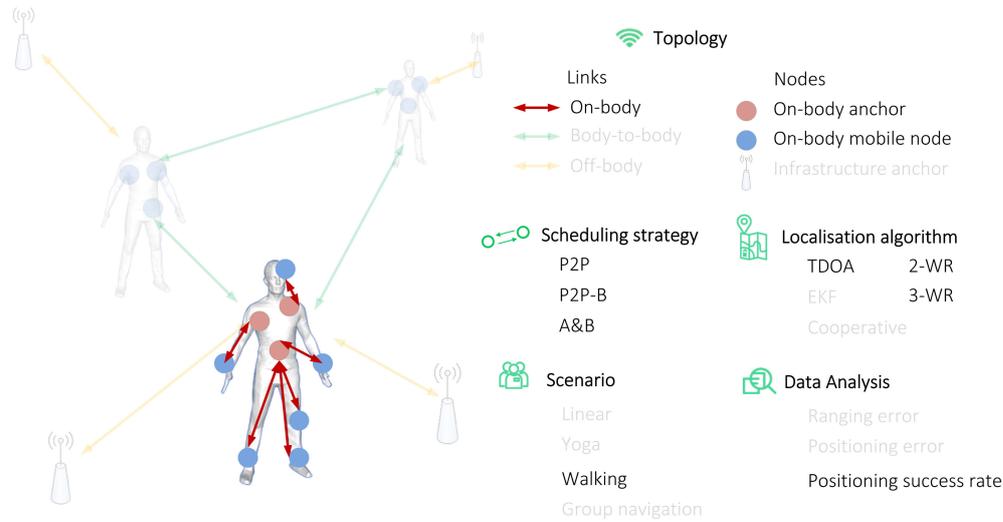


FIGURE 6.1 – Configuration du système pour l'étude de l'impact du canal sur le taux de succès de positionnement.

## 6.2 Impact de la perte de paquets de distance sur le positionnement

Dans un premier temps, nous évaluons le taux de réussite de positionnement des nœuds sur le corps. Le *taux de succès de positionnement* ( $P_{succ}$ ) est une métrique qui permet d'évaluer le rapport entre le nombre de positions estimées et le nombre de positions qui devaient être estimées pour un temps d'observation donné. Dans notre contexte de localisation avec les WBANs, cette métrique permet d'analyser à long terme si un nœud arrive à se positionner correctement.

Nous utilisons trois stratégies d'ordonnancement différentes, basées sur notre étude du chapitre précédent (positionnement individuel des nœuds par ordre (P2P), positionnement des nœuds par ordre en broadcast (P2P-B) et positionnement par agrégation de données et en broadcast (A&B)) [Guizar 15d]. De plus, nous considérons une couche PHY basée sur le IR-UWB avec trois modèles de canal différents obtenus à partir du même scénario de mobilité réaliste (voir chapitre 3) :

- un modèle empirique de l'affaiblissement de propagation du WBAN, tel que défini par le modèle de canal CM3 (en chambre anéchoïque) [Yazdandoost 09],
- un modèle de canal calculé par ray-tracing avec le simulateur PyLayers [Mhedhbi 14]
- et un modèle expérimental obtenue par mesure [Denis 14].

### 6.2.1 Configuration du on-body et scénario d'étude

Afin de compléter l'analyse des études précédentes, nous reprenons notre scénario initial sur la capture de mouvement individuelle pour évaluer l'impact de la perte des paquets sur le positionnement avec  $P_{succ}$ . Ainsi, nous considérons un WBAN complètement maillé où les nœuds ( $N_i$ ) communiquent pair à pair pour estimer leur position. Nous avons toujours les deux types de capteurs : les *ancres* qui ont connaissance de leur position relative et absolue à tout moment et les *nœuds mobiles* qui souhaitent estimer leur position relative. Pour calculer sa position  $\hat{P}_i(t)$ , chaque nœud mobile  $i$  doit estimer

## 6.2. Impact de la perte de paquets de distance sur le positionnement

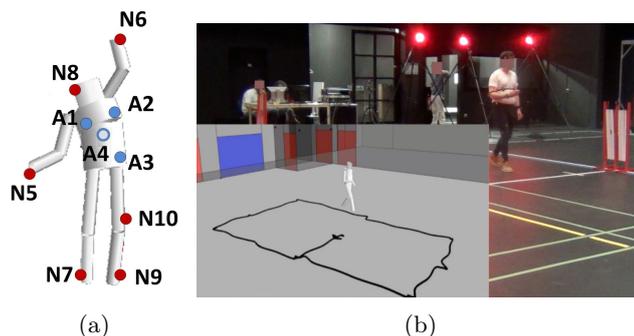


FIGURE 6.2 – (a) Reconstruction multi-cylindrique du corps. (b) Scénario de mobilité de marche et représentation avec PyLayers.

sa distance  $\hat{d}_{ij}(t)$  avec les ancres  $j$ . Pour cela, la distance est estimée avec le protocole 3-WR (voir chapitre 2.3.1). Ainsi, les nœuds mobiles effectuent un positionnement relatif avec le système de coordonnées locales (LCS) associé avec les ancres du corps.

Dans cette étude, nous évaluons la performance de positionnement dans un WBAN utilisant une radio IR-UWB avec un scénario de mobilité réaliste d'un piéton qui marche à vitesse modérée pendant 100 secondes. Pour ce scénario, le WBAN est composé de 4 ancres et 6 nœuds mobiles, tel que montré sur la Figure 6.2. Les ancres sont placées dans les endroits statiques du corps : le torse droit ( $A_1$ ), le torse gauche ( $A_2$ ), la hanche gauche ( $A_3$ ) et le dos ( $A_4$ ). Puis, les nœuds mobiles sont placés sur des zones plus mobiles, tel que le poignet droit ( $N_5$ ), le poignet gauche ( $N_6$ ), le pied droit ( $N_7$ ), la tête ( $N_8$ ), le pied gauche ( $N_9$ ) et le genou gauche ( $N_{10}$ ).

### 6.2.2 Hypothèses et formulation du problème

Nous considérons que l'estimation d'une position repose, au niveau du protocole de communication, sur le succès des distances estimées et des positions des ancres recueillies avec 3-WR à chaque trame. Notez que la performance de localisation dépend de l'algorithme de position utilisé, par exemple à l'aide des algorithmes classiques (par la méthode du moindre carré linéaire (LLSE) ou la différence du temps d'arrivée (TDOA)) ou des techniques statistiques (par le maximum de vraisemblance (ML)). Dans cette étude, nous cherchons à maximiser le nombre de distances estimées avec une stratégie coopérative inter-couche pour augmenter le taux de succès de positionnement (indépendamment de la technique de calcul de position utilisée).

### 6.2.3 Stratégies d'ordonnement considérées pour la localisation

Nous considérons trois stratégies d'ordonnement différentes (Figure 6.3) basées sur notre étude du Chapitre 5.3. Ces stratégies sont implémentées dans une trame TDMA supposée synchronisée par balise, comme suit :

- **Positionnement individuel par ordre (P2P)** où chaque nœud  $i$  envoie des paquets requête  $Q_{ij}$  à chaque ancre  $j$  consécutivement. Puis, à son tour, chaque ancre réponds avec les paquets  $R1_{ji}$  et  $R2_{ji}$  successivement à chaque nœud.
- **Positionnement des nœuds par ordre et en broadcast (P2P-B)** où chaque nœud  $i$  communique son paquet requête  $Q_i$  en broadcast. Ensuite, chaque ancre

## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste

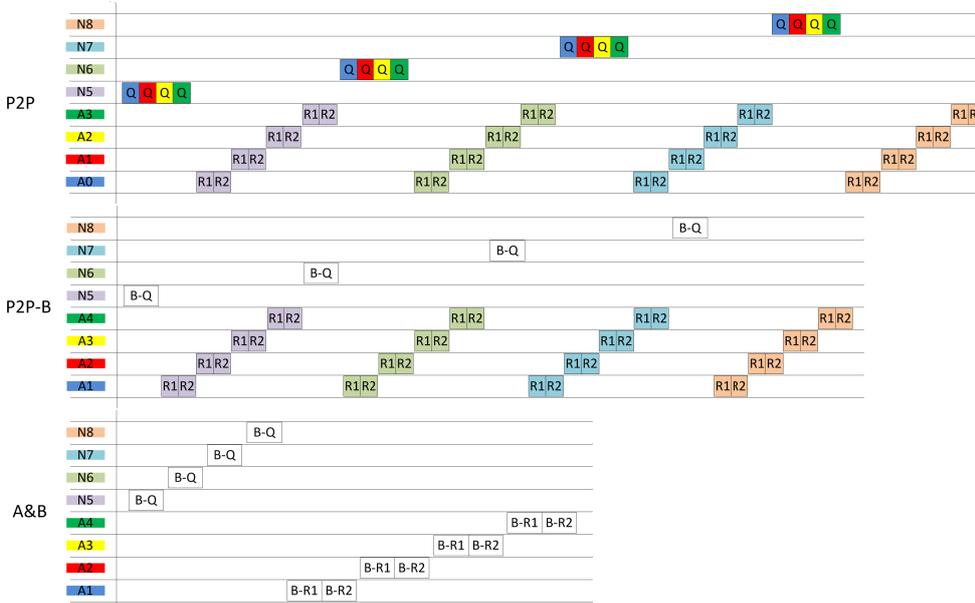


FIGURE 6.3 – Stratégies d'ordonnement : P2P, P2P-B et A&B

répond à chaque nœud avec les deux paquets réponse  $R1_{ji}$  et  $R2_{ji}$ .

- **Aggregated and Broadcast (A&B)** [Macagnano 07] où tous les nœuds transmettent les requêtes  $Q_i$  en broadcast. Puis, chaque ancre collecte les ToA de chaque requête pour envoyer une première réponse  $R1_j$  avec tous les timers agrégés, suivie par la deuxième réponse  $R2_j$ .

### 6.2.4 Modèles de canal utilisés pour générer la perte de paquets

Le taux de succès de positionnement dépend directement de la topologie de la perte de paquets 3-WR, donc de l'évolution corrélée des différents canaux. Pour simuler ce problème et rendre notre étude plus réaliste, nous considérons trois modèles de canal différents. Ils ont été obtenus pour le même scénario de mobilité réaliste (section 6.2.1), avec les caractéristiques suivantes :

**Modèle empirique.** Tout d'abord, nous considérons un modèle théorique empirique spécifiques aux liens on-body. Pour cela, nous utilisons le modèle CM3 de l'affaiblissement de propagation dans la bande de fréquence 3,1-10,6 GHz, tel que défini dans [Yazdandoost 09] :

$$PL_{on-Body}(d)[dB] = a * \log_{10}(d) + b + N \quad (6.1)$$

où  $a$  et  $b$  représentent des paramètres d'ajustement linéaire du modèle,  $N$  est une variable aléatoire qui suit une distribution gaussienne de moyenne nulle avec un écart-type  $\sigma_N$  et  $d$  représente la distance (en mm) entre les nœuds on-body. Dans cette étude, nous utilisons les paramètres définis pour le scénario en chambre anéchoïde qui est proche de notre scénario de mobilité (Section 6.2.1) :  $a = 34,1$ ,  $b = -31,4$  et  $\sigma_N = 4,85$ . La puissance de réception est calculée avec le bilan de liaison classique  $P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - PL(d)$  où la puissance de transmission et les gains d'antenne sont fixés à  $P_{Tx} = -10dBm$  et  $G_{Tx} = G_{Rx} = 0dBi$  respectivement selon le standard [IEEEStd802.15.6 12].

## 6.2. Impact de la perte de paquets de distance sur le positionnement

**Modèle de canal simulé.** Dans ce modèle, nous utilisons la technique de ray-tracing avec PyLayers pour simuler les liens radio à partir des traces de mobilité de notre scénario (Section 6.2.1). Pour cela, nous considérons le modèle d'antenne présenté dans [Mhedhbi 14] couplé avec les positions et orientations du modèle de mobilité pour les capteurs simulés. Il faut noter que ce modèle tient compte du shadowing du corps et les effets des multi trajets. Ainsi, ces effets sont inclus dans les prédictions du RSSI des liens calculées par PyLayers avec la prise en compte de multi-trajets, tel que décrit dans le Chapitre 3.4.

**Modèle de canal expérimental.** Ce modèle repose sur des mesures expérimentales réelles [Denis 14] obtenues avec des capteurs *HiKoB FOX* qui utilisent une couche PHY basée sur le standard [IEEEStd802.15.4 06] (bande ISM 2.45GHz) et une couche MAC basée sur le TDMA. Les traces expérimentales représentent le (RSSI) moyen à partir des 8 derniers symboles modulés. En particulier, le RSSI utilisé prend en compte le shadowing du corps pour la totalité des liens du réseau [Lauzier 13].

Avec ces modèles, on définit le taux d'erreur de paquet ( $PER_r$ ) comme la probabilité de perdre un paquet 3-WR (ou 2-WR). Ceci peut se produire lorsqu'un paquet est reçu avec une puissance de réception ( $P_{Rx}$ ) inférieure à un seuil prédéfini ( $\rho$ ), tel que  $PER = \mathbb{P}(P_{Rx}(d_{ij}) \leq \rho)$ .

### 6.2.5 Analyse du taux de succès de positionnement

Nous évaluons le taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec le simulateur à événements discrets WSNNet en fonction de quatre paramètres : la position des nœuds sur le corps, le modèle de canal, la stratégie d'ordonnancement et le protocole de localisation. Pour cela, nous avons implémenté les trois modèles de canal (empirique, simulé ou expérimental), ainsi qu'une couche MAC basée sur le TDMA avec différentes stratégies d'ordonnancement (P2P, P2P-B et A&B). La durée de la trame est conçue en fonction de la stratégie choisie et du temps symbole défini par la couche PHY basée sur le standard IEEE 802.15.6 en mode par défaut (modulation OOK et 0,4875 Mbps). En ce qui concerne au protocole de localisation, notre modèle permet de comparer le  $P_{succ}$  obtenu avec 2-WR ou 3-WR.

Avec ce framework, nous analysons le  $P_{succ}$  lorsque le seuil de réception est fixé à  $\rho = -91dBm$ . Chaque simulation a une durée de 100s pour le même scénario de mobilité. Les Figures 6.6 et 6.7 (resp.6.4 et 6.5) montrent le taux de succès de positionnement et le nombre de positions estimées lorsque la distance est estimée avec 3-WR (resp. 2-WR) selon le modèle de canal utilisé. Ces deux métriques se complètent car le nombre d'estimations varie en fonction de la stratégie MAC utilisée. Ainsi, nous allons évaluer 4 paramètres (le modèle de canal, la position des nœuds, la stratégie d'ordonnancement et l'algorithme de localisation) et l'impact de chacun d'eux sur le  $P_{succ}$ .

### A. Taux de positionnement en fonction du modèle de canal

Lorsque l'on compare nos résultats selon les différents modèles de canal (Figures 6.4 et 6.5), nous pouvons observer que  $P_{succ}$  varie. Nous rappelons que dans le canal empirique, un lien est affecté par l'affaiblissement lié à la distance entre les nœuds, alors que dans le cas du canal simulé et expérimental, les liens sont également affectés par les multi-trajets et surtout par le shadowing du corps. Cependant, nous pouvons observer que dans le cas empirique et expérimental, le  $P_{succ}$  obtenu est similaire pour tous les nœuds. Ceci

## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste

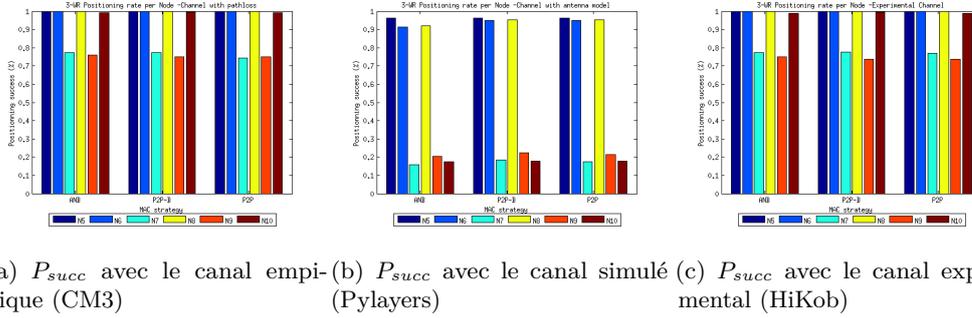


FIGURE 6.4 – Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d'ordonnancement (A&B, P2P-B et P2P), avec  $\rho = -91dBm$ .

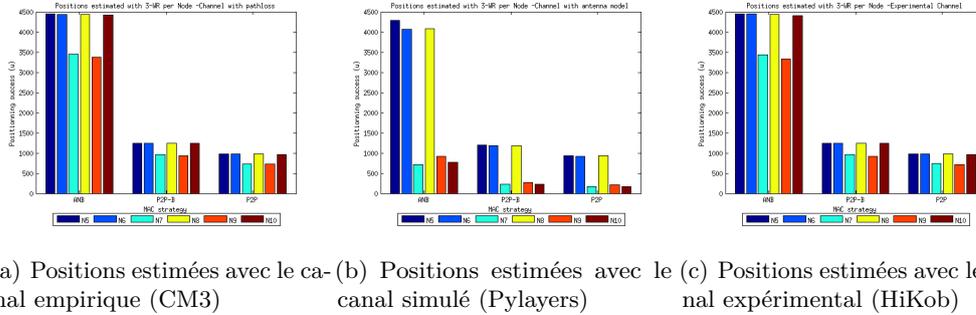


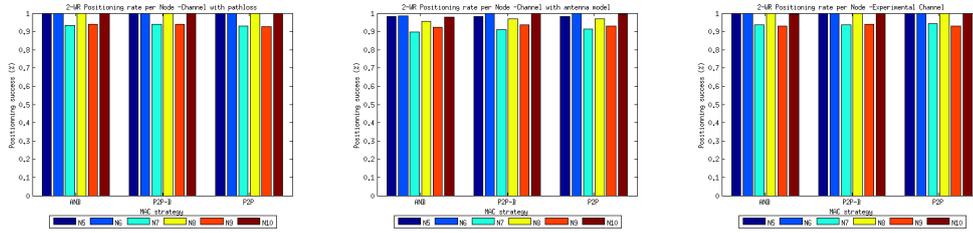
FIGURE 6.5 – Nombre de positions estimées avec 3-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d'ordonnancement (A&B, P2P-B et P2P), avec  $\rho = -91dBm$ .

est dû au fait que le niveau de perte est du même ordre avec ces deux canaux, même si les conditions de perte sont différentes. En effet, l'évolution de la puissance de réception montre que les variations de canal pour ces deux modèles sont supérieures au seuil de sensibilité ( $\rho = -91dBm$ ). Si l'on compare ces résultats avec le  $P_{succ}$  obtenu avec le canal simulé, nous pouvons observer un taux de positionnement plus faible pour les nœuds  $N_7$ ,  $N_9$  et  $N_{10}$ . Cela veut dire que le canal simulé est caractérisé par des évanouissements plus forts que le canal expérimental.

### B. Performance de localisation entre les nœuds

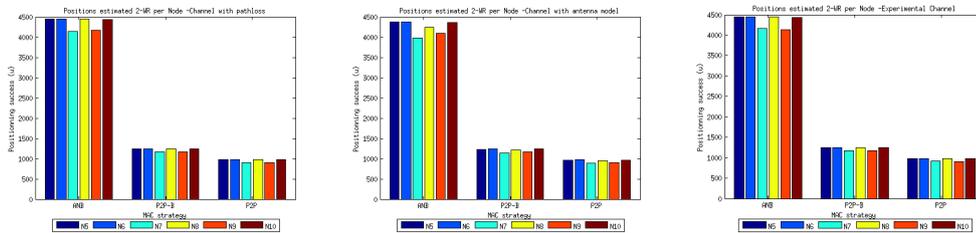
Si l'on compare le taux de positionnement entre les nœuds avec 3-WR (Figures 6.4 et 6.5), on observe que les nœuds placés sur les pieds ( $N_7$  et  $N_9$ ) sont les plus affectés pour tous les canaux et toutes les stratégies. Ceci est dû à leur position plus éloignée par rapport aux ancres et à la forte mobilité de ces nœuds. D'une part, l'impact de la distance peut être observé avec les résultats obtenus par le canal empirique où la perte est directement lié à l'affaiblissement de propagation. Si l'on compare le  $P_{succ}$  des pieds avec les nœuds qui sont plus proches des ancres (la tête ( $N_8$ ) ou les poignets ( $N_5$  et  $N_6$ )), nous pouvons observer que les nœuds proches des ancres arrivent à mieux se positionner. D'autre part, les nœuds sur les pieds bougent de manière plus dynamique.

## 6.2. Impact de la perte de paquets de distance sur le positionnement



(a)  $P_{succ}$  avec le canal empirique (CM3) (b)  $P_{succ}$  avec le canal simulé (Pylayers) (c)  $P_{succ}$  avec le canal expérimental (HiKob)

FIGURE 6.6 – Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 2-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d’ordonnement (A&B, P2P-B et P2P), avec  $\rho = -91dBm$ .



(a) Positions estimées avec le canal empirique (CM3) (b) Positions estimées avec le canal simulé (Pylayers) (c) Positions estimées avec le canal expérimental (HiKob)

FIGURE 6.7 – Nombre de positions estimées avec 2-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d’ordonnement (A&B, P2P-B et P2P), avec  $\rho = -91dBm$ .

Par conséquent, ces nœuds subissent une forte dynamique du shadowing qui diminue le  $P_{succ}$ . Il faut noter que la perte de positionnement du nœud placé sur le genou ( $N_{10}$ ) dans le cas du canal simulé est lié au fait que les variations du canal sont plus fortes pour ce modèle.

### C. Positionnement selon la stratégie d’ordonnement utilisée

Quant aux performances entre les différentes stratégies MAC, nous pouvons noter un taux de succès de positionnement similaire (Figure 6.4) pour tous les nœuds. Cependant, si nous analysons le nombre de positions estimées avec chaque stratégie (Figure 6.5), nous observons que A&B est le meilleur choix car il permet d’estimer plus de positions en moins de temps. D’autre part, s’il faut choisir entre P2P et P2P-B, il faut privilégier l’utilisation de P2P-B pour réduire le délai au niveau des paquets reçus.

### D. Différences entre 2-WR et 3-WR

Pour compléter cette étude, nous proposons de comparer le  $P_{succ}$  en utilisant le 2-WR et 3-WR. Il faut noter que pour le cas du 2-WR, nous considérons toujours un échange du type 3-WR, avec un paquet requête et deux paquets réponse. Ainsi, nous exploitons la redondance des paquets réponse pour l’estimation de la distance. Si au moins un de

ces deux paquets réponse est reçu par le nœud, on considère que la transaction 2-WR est réussie.

Pour 2-WR, nous pouvons observer dans les Figures 6.6 et 6.7 que le niveau de perte de positionnement est faible et similaire sur tous les nœuds. Ceci est dû à la redondance des paquets réponse pour l'estimation des distances avec 2-WR. En effet, si l'on compare ces résultats avec le cas du 3-WR (Figures 6.4 et 6.5), le 2-WR est plus robuste aux pertes que le 3-WR. Par exemple, cela peut être observé dans le cas des nœuds sur les pieds ( $N_7$  et  $N_9$ ). Cependant, pour une comparaison équitable, il est nécessaire d'évaluer également les erreurs d'estimation liées à la dérive d'horloge qui n'est pas pris en compte par le 2-WR. Cette analyse reste intéressante puisque cela montre qu'il est possible d'augmenter le taux de positionnement des nœuds avec uniquement du 2-WR.

### 6.2.6 Discussion

Dans cette étude préliminaire, nous avons présenté une analyse du taux de succès de positionnement des nœuds d'un WBAN avec une radio IR-UWB. Nous considérons un scénario de mobilité réaliste basé sur une activité de marche où les nœuds communiquent avec les ancres pour se positionner individuellement. Pour cela, nous utilisons trois modèles de canaux différents pour simuler la perte de paquets avec un seuil de sensibilité fixe à une valeur optimale ( $\rho = -91dBm$ ). Nous montrons que le taux de positionnement peut être affecté par quatre paramètres : les variations du canal, la position des nœuds, la stratégie d'ordonnancement et l'algorithme de localisation. Ainsi, nous avons montré que le canal affecte différemment le  $P_{succ}$  des nœuds en fonction de leur position sur le corps, notamment lorsqu'ils sont placés sur les pieds. En particulier, la performance de localisation diminue considérablement avec la présence du shadowing du corps. De plus, nous avons observé que A&B arrive à estimer plus de positions que les autres stratégies proposées même lorsque les trois stratégies montraient un  $P_{succ}$  similaire. Enfin, nous avons montré que le  $P_{succ}$  peut être amélioré avec l'utilisation du 2-WR en bénéficiant de la redondance des paquets réponse du 3-WR. Ainsi, il est possible d'estimer les positions même si un des paquets réponse est perdu. Par la suite, nous souhaitons étendre cette étude pour quantifier le taux de perte du positionnement en fonction du seuil de sensibilité avec les mêmes conditions de canal.

## 6.3 Quantification du taux de succès de positionnement

Dans notre étude précédente, nous avons considéré qu'un paquet était perdu lorsqu'il était reçu avec une puissance de réception inférieure à un certain seuil de sensibilité correspondant au cas optimal. Par la suite, nous souhaitons étendre cette étude pour quantifier le taux de perte du positionnement en fonction du seuil de sensibilité avec les mêmes conditions de canal et le même scénario de mobilité. Ainsi, nous allons pouvoir mesurer les bornes supérieures et inférieures du taux de succès de positionnement. Ceci dans le but d'identifier les limites de la localisation des nœuds à partir desquelles la coopération pourrait être nécessaire [Guizar 16a].

### 6.3.1 Hypothèses et formulation du problème

Pour cela, nous analysons les effets du canal (par exemple la présence du path loss, du shadowing ou des évanouissements) pour chaque paquet 3-WR transmis. Dans cette étude, la qualité d'un lien  $l_{ij}(t)$  est caractérisée par la puissance de réception des

### 6.3. Quantification du taux de succès de positionnement

paquets. Lorsque le signal traverse de mauvaises conditions de canal, la probabilité de perte sur une estimation de distance augmente. On suppose que les nœuds peuvent estimer la qualité de tous les liens. Ainsi, on note le vecteur de qualité des liens par  $l(t) = [l_{11}(t), l_{12}(t), \dots, l_{1N_A}(t), l_{21}(t), \dots, l_{N_M N_A}(t)]$ . Il faut noter que les liens peuvent ne pas être symétriques  $l_{ij}(t) \neq l_{ji}(t), \forall i \neq j$ . On définit le taux d'erreur de paquet ( $PER_r$ ) comme la probabilité de perdre un paquet 3-WR. Ceci se produit lorsqu'un paquet est reçu avec une puissance de réception ( $P_{Rx}$ ) inférieure à un seuil prédéfini ( $\rho$ ), tel que  $PER = \mathbb{P}(P_{Rx}(d_{ij}) \leq \rho)$ . Ainsi, nous mesurons le  $P_{succ}$  en fonction de la perte des paquets 3-WR  $PER_r$ .

#### 6.3.2 Évaluation de performance du taux de succès de positionnement

Nous considérons le même scénario décrit dans la Section 6.2.1 avec un WBAN composé de 4 nœuds ancrés et 6 nœuds mobiles qui évaluent leur  $P_{succ}$ . Nous considérons le modèle de mobilité de marche sur 100s, les trois modèles de canal (empirique, simulé et expérimental), et les trois stratégies d'ordonnement (P2P, P2P-B et A&B). Avec ce framework, nous évaluons le  $P_{succ}$  pour chaque nœud en fonction du seuil de réception ( $\rho \in [-91, -60]$  dBm).

##### A. Évolution du $P_{succ}$ en fonction du seuil

Les Figures 6.8, 6.9 et 6.10 montrent le  $P_{succ}$  en fonction du seuil de réception  $\rho$  pour chaque stratégie d'ordonnement, et chaque modèle de canal. Nous pouvons observer que  $P_{succ}$  diminue lorsque le seuil augmente pour tous les nœuds et tous les scénarios. En effet, à chaque fois que le seuil augmente, pour une même répartition de puissance, plus de paquets déclarés perdus. Donc, les nœuds mobiles n'arrivent pas à obtenir le nombre minimal de distances requis pour le positionnement.

##### B. Impact du shadowing du corps sur le positionnement

Si nous comparons le  $P_{succ}$  obtenu avec les différentes configurations, nous pouvons observer que la perte de positionnement dépend de la position des nœuds sur le corps et du canal utilisé. Dans le cas du canal empirique (Figures 6.8(a), 6.9(a) et 6.10(a)), nous pouvons observer qu'il existe une réduction plus importante du  $P_{succ}$  avec les nœuds qui sont plus éloignés des ancrés, par exemple, les nœuds sur les pieds ( $N_7$  et  $N_9$ ). Pour ces deux nœuds, nous pouvons observer que la performance de positionnement diminue rapidement et de manière similaire pour atteindre une perte totale à partir de  $-80$  dBm. On aurait pu s'attendre à avoir le même comportement entre les nœuds sur les mains ( $N_5$  et  $N_6$ ), mais la différence des  $P_{succ}$  est due au fait que la main droite ( $N_5$ ) restait plus statique que la main gauche ( $N_6$ ) (simulation du geste de navigation avec un téléphone en GPS) et donc, il y avait moins d'éloignements avec les ancrés.

Dans le cas du canal simulé (Figures 6.8(b), 6.9(b) et 6.10(b)), nous pouvons remarquer que les effets du shadowing affectent plus le positionnement des nœuds. En particulier, les nœuds sur les jambes ( $N_7$ ,  $N_9$  et  $N_{10}$ ) sont les plus affectés avec un  $P_{succ}$  inférieur à 20% dans le meilleur cas de réception pour les trois stratégies d'ordonnement. Notons que dans ce canal, le  $P_{succ}$  de la main droite diminue plus vite que celui de la main gauche. Ceci est lié au shadowing du torse avec l'ancre sur le dos et ces deux nœuds. En effet, la main droite reste statique et donc le shadowing est toujours présent, alors que ce même shadowing varie pour la main gauche car ce nœud bouge périodiquement

## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste

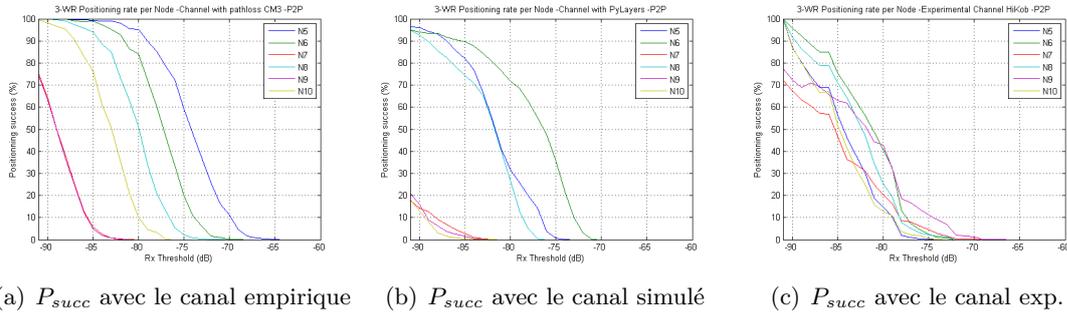


FIGURE 6.8 – Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR et P2P en utilisant les différents canaux.

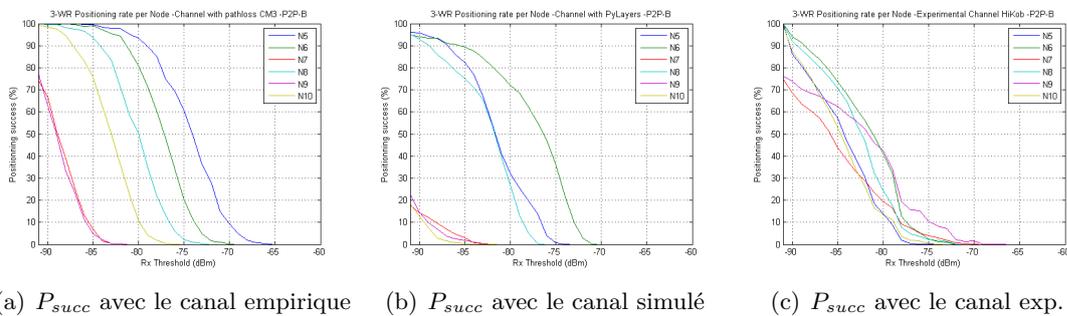


FIGURE 6.9 – Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR et P2P-B en utilisant les différents canaux.

et suit le mouvement de la marche. Ceci montre l'importance de prendre en compte le shadowing pour l'évaluation du protocole de positionnement, notamment si l'on compare ces résultats avec le cas empirique, où le taux de positionnement des mains est trop optimiste.

Enfin, dans le cas du canal expérimental (Figures 6.8(c), 6.9(c) et 6.10(c)), nous pouvons observer que le  $P_{succ}$  des nœuds sur le jambes ( $N_7$ ,  $N_9$  et  $N_{10}$ ) est toujours le plus bas. Cependant, la différence de  $P_{succ}$  entre les autres nœuds est très marginale comparée avec les autres modèles de canal. Ceci peut être expliqué par le fait que les canaux empirique et simulé ne sont pas réalistes et donc, ne tiennent pas compte de certains paramètres, tels que la transmission de puissance des nœuds et l'impact élevé des multi-trajets en bande étroite (du canal expérimental) comparé au UWB (des canaux empiriques et simulés). De cette analyse, nous pouvons conclure que les effets du shadowing généré par le corps (canaux simulé et expérimental) ont un impact plus important sur le positionnement des nœuds comparé aux effets du path loss (canal empirique).

### C. Robustesse des stratégies d'ordonnancement pour le positionnement

Avec ces résultats, nous pouvons noter également une différence du  $P_{succ}$  obtenu selon la technique d'ordonnancement utilisée. Si l'on compare le  $P_{succ}$  entre P2P et P2P-B, nous observons que la différence est très marginale. Ceci est dû au fait que les conditions du

### 6.3. Quantification du taux de succès de positionnement

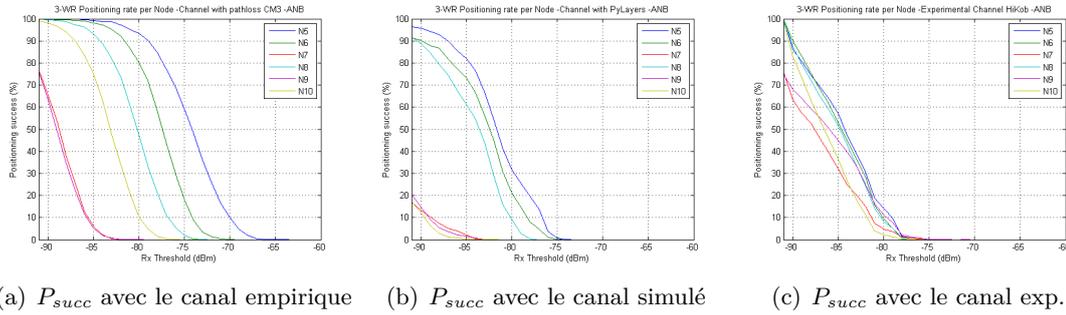


FIGURE 6.10 – Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR et A&B en utilisant les différents canaux.

canal à court terme ne changent pas assez rapidement pour générer une perte importante des paquets requête des deux stratégies. Ceci est intéressant puisque cela veut dire que même si l'on transmet les paquets requête en broadcast à la place de plusieurs paquets pair à pair, on ne perd pas en fiabilité. Ainsi, P2P-B devient plus intéressant car il réduit les délais de réponse avec le même taux de positionnement que P2P. En outre, si l'on compare P2P ou P2P-B avec A&B, nous observons que le  $P_{succ}$  est plus bas avec A&B à partir d'un certain seuil de réception. Ceci est plus visible avec le canal simulé (Figures 6.8(b), 6.9(b) et 6.10(b)). En fait, nous avons montré (Section 6.2.5) que dans le cas où le seuil est moins contraignant à la réception ( $\rho = -91$  dBm), la transmission des paquets 3-WR avec A&B permettait d'estimer plus de positions avec un délai plus réduit comparé à P2P et P2P-B. Cependant, lorsque les récepteurs deviennent plus sensibles aux variations du canal, la perte des paquets en broadcast devient plus critique et donc, le  $P_{succ}$  diminue considérablement avec A&B. Ce qui veut dire que à partir d'un certain seuil de réception, P2P et P2P-B ont un meilleur taux de positionnement que A&B. Ceci est important à considérer sur le choix du protocole selon l'activité de la personne, les capacités des capteurs et les différentes régulations d'utilisation du UWB entre les pays. Par exemple, P2P-B est plus performant pour la localisation des nœuds lorsque le canal est très dynamique (comme dans le cas de la course). Alors que A&B est plus intéressant dans les cas où la personne bouge à une vitesse modérée ou lente (comme le yoga ou la marche).

#### 6.3.3 Discussion

Dans ces travaux, nous avons utilisé le  $P_{succ}$  pour identifier à la fois les nœuds qui n'arrivent pas à se positionner correctement et la stratégie d'ordonnancement à utiliser en fonction des paramètres du canal. D'une part, le choix de la stratégie est important pour réduire le délai de transmission des paquets et augmenter la précision des estimations, par exemple avec A&B. Cependant, nous avons montré que réduire la latence avec des paquets agrégés augmente aussi la criticité de perte du positionnement lorsque les paquets agrégés ne sont pas reçus. En effet, le fait d'envoyer un seul paquet vers plusieurs nœuds sur le corps demande que le canal soit stable pour tous les liens. Ce qui n'est toujours pas possible dans un WBAN notamment lorsque le canal est très dynamique. En pratique, un capteur devrait être capable de choisir la meilleure stratégie à utiliser pour un scénario donné. Ainsi, le  $P_{succ}$  peut être utilisé pour comparer la fiabilité d'une stratégie pour le

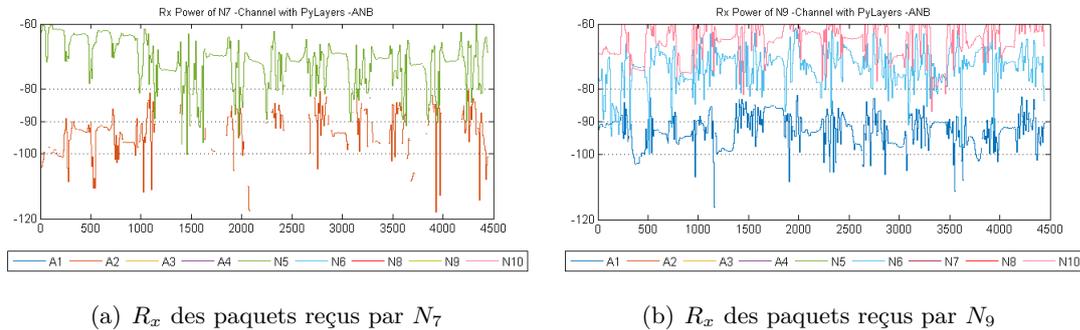


FIGURE 6.11 – Évolution de la puissance de réception ( $R_x$ ) pour les nœuds  $N_7$  et  $N_9$  ayant le pire  $P_{succ}$  (avec A&B et le canal simulé par PyLayers).

positionnement et permettre aux capteurs du WBAN de choisir la meilleure stratégie selon le contexte.

D'autre part,  $P_{succ}$  permettait également d'identifier les nœuds ayant un mauvais positionnement. Dans le scénario étudié, nous avons montré que les nœuds placés dans les extrémités étaient les plus affectés. Cependant, même si intuitivement on estime que le shadowing présent entre les nœuds et les ancres pourrait être une des causes du problème, le  $P_{succ}$  n'est pas un indice suffisant pour déterminer si les liens sont suffisamment robustes, pour que le capteur puisse prendre une décision fiable pour améliorer son positionnement. Pour cela, il faudrait imaginer d'autres mécanismes avec des métriques qui prennent en compte également le taux d'estimation de distances et l'évolution des pertes à court terme.

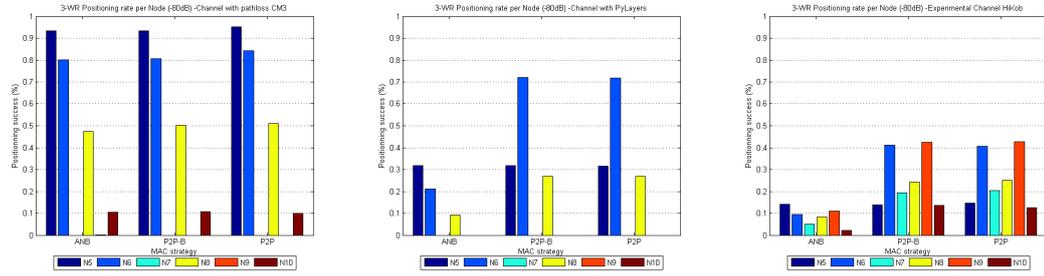
## 6.4 Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds

Cette dernière étude s'intéresse à la coopération pour augmenter le taux de positionnement des nœuds [Guizar 16a] [Guizar 16b]. Pour illustrer cela, la Figure 6.11 montre l'évolution de la puissance de réception des nœuds placés sur les pieds ( $N_7$  - droit et  $N_9$  - gauche) lorsqu'ils recevaient des paquets avec les ancres et les autres nœuds mobiles en utilisant A&B et le canal simulé. Nous pouvons observer que pour les deux nœuds, il y a toujours une ancre avec une mauvaise réception, alors que la communication avec d'autres nœuds mobiles semble être plus fiable. En particulier, le nœud  $N_7$  (Figure 6.11(a)) devrait considérer de remplacer l'ancre  $A_2$  (torse gauche) et s'appuyer plutôt avec le nœud  $N_5$  (poignée droit) pour se positionner. Alors que le nœud  $N_9$  (Figure 6.11(b)) pourrait remplacer l'ancre  $A_1$  (torse droit) et coopérer avec les nœuds  $N_6$  (poignée gauche) ou  $N_{10}$  (genou gauche).

### 6.4.1 Formulation de la proposition

Nous proposons d'augmenter le taux de succès du positionnement avec un algorithme coopératif et distribué basé sur l'analyse de différentes LQEs à court et à long terme. Pour cela, nous divisons cette analyse en deux phases principales. La première consiste à observer la stabilité du positionnement à long terme avec deux LQEs : i) le *taux de*

## 6.4. Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds



(a)  $P_{succ}$  avec le canal empirique (b)  $P_{succ}$  avec le canal simulé (c)  $P_{succ}$  avec le canal exp.

FIGURE 6.12 – Taux de succès de positionnement ( $P_{succ}$ ) avec 3-WR en utilisant les différents canaux et stratégies d’ordonnement (A&B, P2P-B et P2P), avec  $\rho = -80dBm$ .

*succès de positionnement* ( $P_{succ}$ ) pour identifier les nœuds avec la pire performance pour se localiser et ii) le *taux de succès d’estimation de distances* ( $R_{succ}$ , R pour *ranging*) pour indiquer les ancres qui doivent être remplacées par d’autres nœuds mobiles.

Ensuite, dans la deuxième phase, chaque nœud analyse la fiabilité du canal à court terme avec tous les nœuds du réseau. Pour cela, les nœuds collectent la qualité du lien des paquets 3-WR pour identifier les nœuds mobiles qui présentent le meilleur taux de réception de paquets (PRR). Puis, à partir de ces données, ils calculent la probabilité de succès de positionnement avec ces nœuds pour augmenter la stabilité à long terme.

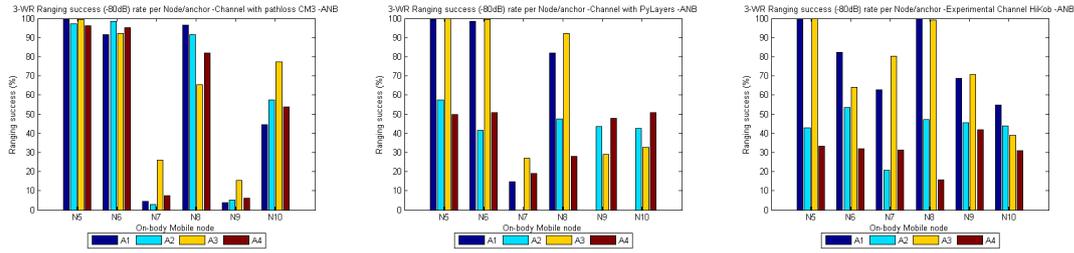
Le résultat de ces deux phases peut être vu comme une matrice qui varie dans le temps et qui représente les meilleurs nœuds mobiles pour devenir des ancres virtuelles pour chaque nœud. Avec cette matrice, nous proposons également un algorithme de permutation conditionnelle d’ancres pour choisir les ancres virtuelles qui maximisent la probabilité de positionnement.

### 6.4.2 Analyse du positionnement à long terme

Dans cette phase, nous évaluons la stabilité de positionnement à long terme pour chaque nœud. Nous avons montré avec nos résultats précédents (Section 6.3.2) que le taux du positionnement ( $P_{succ}$ ) permettait d’identifier les nœuds ayant un mauvais positionnement. Par contre, cette métrique ne précisait pas la source du problème. Pour ce faire, il faut également analyser la performance des nœuds pour estimer les distances avec les ancres et identifier les ancres qui posent un problème pour la localisation du nœud. Dans ce but, nous proposons de mesurer le taux d’estimation de distances ( $R_{succ}$ ).

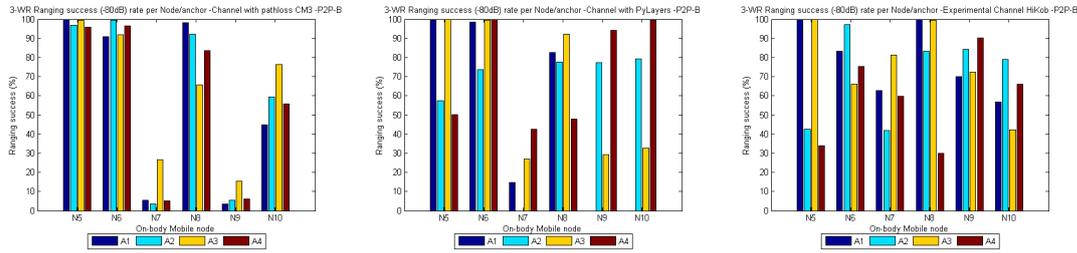
Ainsi, le but de l’analyse de  $P_{succ}$  et  $R_{succ}$  est de trouver les ancres qui ont besoin d’être remplacées pour certains nœuds. Toutefois, il faut noter que ce remplacement ne sera pas toujours possible. En effet, le remplacement des ancres ne peut pas se faire pour tous les nœuds au cours d’une même trame. Il faut qu’il y ait un minimum de nœuds qui arrivent à se positionner avec les ancres de base, pour ensuite devenir des ancres relais (virtuelles) pour les autres nœuds. Pour illustrer cela, prenons le cas où le  $P_{succ}$  est très faible pour tous les nœuds, par exemple lorsque le seuil de réception ( $\rho$ ) est fixé entre  $-75$  et  $-65$  dBm (Figures 6.8, 6.9 et 6.10). Nous pouvons observer que la plupart des nœuds n’arrivent plus à se positionner et ceux qui arrivent (par exemple ceux placés

## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste



(a)  $R_{succ}$  avec le canal empirique (b)  $R_{succ}$  avec le canal simulé (c)  $R_{succ}$  avec le canal exp.

FIGURE 6.13 – Taux de succès de l'estimation de distance  $R_{succ}$  entre les différents modèles de canal avec A&B et  $\rho = -80dBm$ .



(a)  $R_{succ}$  avec le canal empirique (b)  $R_{succ}$  avec le canal simulé (c)  $R_{succ}$  avec le canal exp.

FIGURE 6.14 – Taux de succès de l'estimation de distance  $R_{succ}$  entre les différents modèles de canal avec P2P-B et  $\rho = -80dBm$ .

dans les mains) présentent un  $P_{succ}$  inférieur à 40% avec tous les modèles de canal et stratégies. Cela veut dire que dans ce cas, il serait difficile d'augmenter le  $P_{succ}$  parce qu'il n'y aura pas assez de nœuds fiables pour devenir des ancres virtuelles.

Pour la suite de cette étude, nous allons nous concentrer sur le cas où il y a toujours quelques nœuds capables de se positionner avec les ancres, par exemple lorsque le seuil est fixé à  $-80$  dBm. La Figure 6.12 montre que la plupart des nœuds présentent un  $P_{succ}$  inférieur à 50% avec les trois canaux. Dans ces cas, on peut observer au moins un nœud avec un  $P_{succ}$  suffisant pour aider les autres. Si l'on analyse le taux d'estimation de distances ( $R_{succ}$ ) avec cette configuration (Figures 6.13 et 6.14), nous pouvons observer que les statistiques sur l'estimation de distance dépendent de la position du nœud par rapport aux ancres. Par exemple, dans le cas du canal empirique (Figures 6.13(a) et 6.14(a)),  $N_7$  et  $N_9$  présentent un  $R_{succ}$  inférieur à 30% avec tous les ancres, spécialement avec  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_4$ . Par conséquent, il faudrait remplacer au moins ces trois ancres pour augmenter le  $P_{succ}$  des nœuds sur les pieds. Ceci peut être possible par exemple avec  $N_5$ ,  $N_6$  et  $N_8$ . Dans le cas du canal simulé (Figures 6.13(b) et 6.14(b)), les nœuds  $N_7$ ,  $N_9$  et  $N_{10}$  montrent un  $R_{succ}$  de 0% avec une ancre. Ceci explique pourquoi ces nœuds n'arrivaient pas à se positionner (Figure 6.12(b)). Dans ce cas, il suffit de remplacer une seule ancre. A l'inverse, pour le canal expérimental (Figures 6.13(c) et 6.14(c)), nous avons noté une différence marginale du  $P_{succ}$  entre tous les nœuds. Ceci est dû au fait que l'ancre  $A_4$  (nœud sur le dos) a le pire taux de succès sur l'estimation de distance avec tous les nœuds à cause du shadowing. Par conséquent, il faudrait envisager de trouver

un meilleur emplacement pour ce nœud ancre. De ces résultats, nous pouvons confirmer que même si un nœud est capable d'estimer sa distance parfaitement avec différentes ancrs, le problème vient souvent d'une seule mauvaise ancre.

### 6.4.3 Analyse de la fiabilité du lien à court terme pour un positionnement coopérative et distribué

A la fin de la première phase, l'analyse des LQEs à long terme nous a permis de déterminer les nœuds ayant le pire et meilleur taux de positionnement, ainsi que le nombre d'ancres à remplacer pour chaque nœud. Par contre, rien ne garantit avec ces métriques que les liens entre les nœuds mobiles sont suffisamment fiables pour la mise en place d'une coopération avec des ancrs virtuelles. Pour cette raison, nous allons utiliser d'autres LQEs à court terme pour trouver les nœuds ayant une meilleure qualité de lien que celle des ancrs. Ainsi, ces nœuds pourront être considérés comme ancrs virtuelles potentielles une fois qu'ils ont estimé leurs propres positions. Il faut noter que chaque nœud du réseau peut être une ancre pour un autre nœud, tant que ces nœuds ne sont pas des ancrs entre eux. Pour éviter ce problème, ces sont les nœuds ayant le pire  $P_{succ}$  qui vont commencer à choisir leurs ancrs virtuelles.

Dans la deuxième phase de notre algorithme, chaque nœud collecte et met à jour l'information sur la qualité des liens des paquets 3-WR reçus. Ainsi, nous proposons une approche bayésienne pour augmenter la probabilité de succès du positionnement  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$  basée sur deux paramètres ( $\theta$ ) : la distribution sur la qualité des liens et le taux de succès d'estimation de distance des nœuds (calculée pendant la première phase). Notons  $\theta_{ik} = \{L_{ik}, (R_{succ})_{ik}\}$ , le vecteur qui contient ces deux paramètres pendant une période d'activité ( $T_L > \tau$ ) supérieure à la durée de la trame MAC ( $\tau$ ).

Comme  $P_{succ}$  diminue conjointement à  $R_{succ}$ , chaque nœud doit analyser quelle ancre présente le  $R_{succ}$  le plus faible. Puis, chaque nœud va chercher les liens ayant une meilleure qualité de réception. Ainsi, on définit la probabilité de réception de paquets (PRR) comme suit :

$$\mathbb{P}_x(X \geq \rho) = \begin{cases} \int_{\rho}^{\rho_{max}} L_{ik}^{(r)}(x) dx & \text{for } r = Q_{ik} \\ \int_{\rho}^{\rho_{max}} L_{ki}^{(r)}(x) dx & \text{for } r \in \{R1_{ki}, R2_{ki}\} \end{cases} \quad (6.2)$$

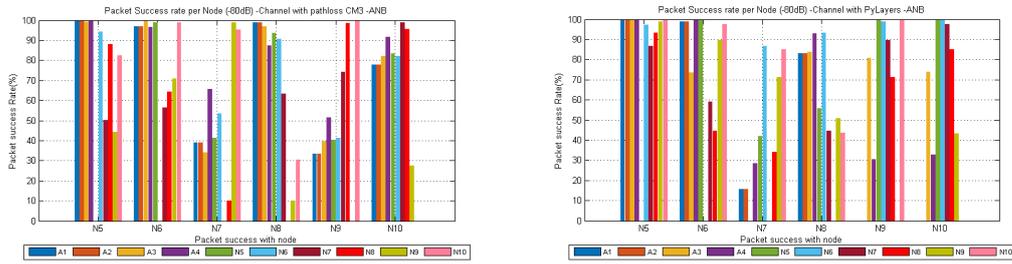
où  $X$  représente la variable aléatoire de la qualité du lien obtenue à chaque  $T_L$  et  $\rho_{max}$  est la puissance de réception maximale. On suppose que le décodeur de canal fonctionne correctement au-dessus du seuil. Ainsi, nous pouvons estimer la probabilité de  $R_{succ}$  entre un nœud  $i$  et une ancre virtuelle  $k$  par :

$$\mathbb{P}(R_{succ}|\theta)_{ik} = \prod_{r \in \{Q_{ik}, R1_{ki}, R2_{ki}\}} (\mathbb{P}_x^{(r)}(X \geq \rho)) \quad (6.3)$$

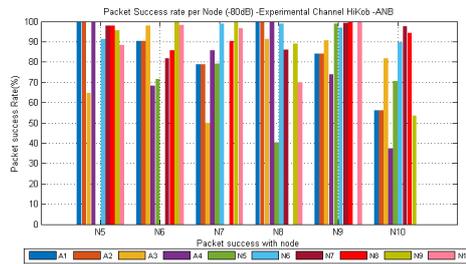
De même, nous définissons la probabilité de  $P_{succ}$  du nœud  $i$  avec  $N_A$  ancrs par l'expression suivante :

$$\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)_i = \prod_{k=1}^{N_A} \prod_{r \in \{Q_{ik}, R1_{ki}, R2_{ki}\}} (\mathbb{P}_x^{(r)}(X \geq \rho)) \quad (6.4)$$

## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste



(a) Taux de réception de paquet avec le canal empirique (b) Taux de réception de paquet avec le canal simulé



(c) Taux de réception de paquet avec le canal expérimental

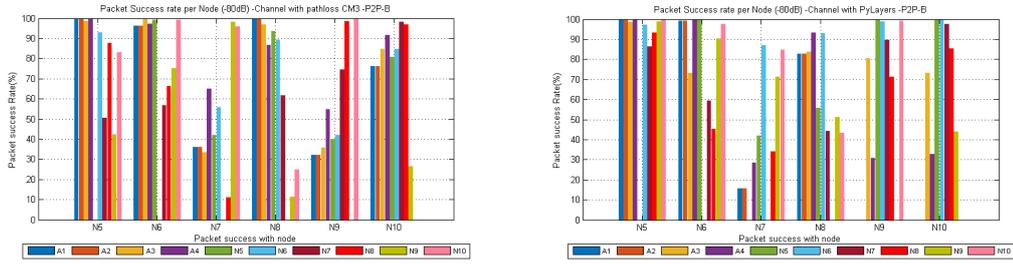
FIGURE 6.15 – Taux de réception de paquet de l'estimation de distance entre les différents modèles de canal avec A&B et  $\rho = -80dBm$ .

Les Figures 6.15 et 6.16 présentent le taux de réception de paquets (PRR) avec A&B et P2P-B lorsque le seuil de réception est fixé à  $\rho = -80dBm$  pour les trois canaux. Nous pouvons observer que pour tous les canaux et toutes les stratégies, les nœuds ayant un taux de réception bas avec certaines ancres (par exemple  $N_7$ ,  $N_9$  et  $N_{10}$ ) montrent une meilleure qualité de lien avec d'autres nœuds. Ceci permet d'imaginer la possibilité de choisir ces nœuds comme des ancres virtuelles.

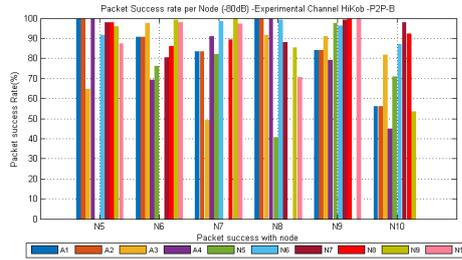
Dans le cas du canal empirique (Figures 6.15(a) et 6.16(a)), les nœuds  $N_5$ ,  $N_6$  et  $N_8$  sont les seuls à avoir un PRR supérieur à 80% avec les ancres de base et donc, on n'a pas intérêt à les remplacer. Ainsi, ces nœuds sont des ancres virtuelles potentielles. Par contre, nous avons vu avec l'analyse à long terme que  $N_7$  et  $N_9$  avaient le pire  $R_{succ}$  avec les ancres. Cependant, lorsque l'on analyse la probabilité de réception de paquet (Figures 6.15(a) et 6.16(a)), nous pouvons remarquer que seulement deux nœuds mobiles (les nœuds sur le pied opposé et le nœud du genou ( $N_{10}$ )) ont une qualité de lien suffisante ( $PRR > 70\%$ ) pour devenir des ancres virtuelles de  $N_7$  et  $N_9$ . Ceci peut poser un problème car  $N_7$  et  $N_9$  ont besoin de remplacer minimum trois ancres ( $R_{succ}$  inférieur à 10% avec  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_4$ ) pour améliorer sa position.

Dans le cas du canal simulé (Figures 6.15(b) et 6.16(b)), ce sont toujours les nœuds  $N_5$ ,  $N_6$  et  $N_8$  qui sont bien connectés avec les ancres. Par contre, nous pouvons remarquer que dans ce canal, certains nœuds présentent un PRR de 0% avec au moins une ancre. Ceci veut dire qu'il faut absolument trouver au moins une ancre virtuelle pour ces nœuds. En particulier, si l'on analyse le  $R_{succ}$  de  $N_9$  et  $N_{10}$ , nous observons que  $A_1$  devrait être

## 6.4. Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds



(a) Taux de réception de paquet avec le canal em- (b) Taux de réception de paquet avec le canal sim-  
piriqueulé



(c) Taux de réception de paquet avec le canal ex-  
périmental

FIGURE 6.16 – Taux de réception de paquet de l'estimation de distance entre les différents modèles de canal avec P2P-B et  $\rho = -80dBm$ .

remplacée. Pour cela, nous pouvons noter que  $N_5$  et  $N_6$  montrent un bon PRR (supérieur à 90%) avec ces nœuds. Par conséquent, ces nœuds sont les meilleurs candidats pour remplacer  $A_1$ .

Enfin, dans le cas du canal expérimental, nous avons trouvé que  $P_{succ}$  était impacté par le fait d'un taux  $R_{succ}$  bas entre la plupart des nœuds et l'ancre  $A_4$ . Si l'on analyse le taux de réception de paquet (Figures 6.15(c) et 6.16(c)), nous pouvons noter que chaque nœud peut avoir différents choix d'ancres virtuelles pour remplacer  $A_4$ . Ceci peut poser un problème car le nombre d'ancres virtuelles augmente, et donc l'ordonnancement de ces ancres pour relayer l'information devient important. Ces résultats expérimentaux sont intéressants puisque contrairement aux deux scénarios précédents (avec le canal empirique et simulé), une ancre virtuelle peut être fiable pour quelques nœuds mais pas pour tout le réseau. De plus, comme tous les nœuds sont impactés par la même ancre, nous ne pouvons pas la remplacer pour tous les nœuds. En effet, il nous faut toujours au moins un nœud qui arrive à se positionner avec les ancres de base, pour ensuite commencer la phase de coopération pour la localisation.

Avec ces résultats, nous pouvons conclure que le nombre d'ancres à remplacer n'est pas un nombre fixe ou homogène pour tous les nœuds. Certains nœuds n'ont pas intérêt à remplacer les ancres alors que d'autres ont besoin de remplacer toutes les ancres. Cependant, l'algorithme pour choisir les ancres virtuelles est très important et dépend de ce qui a été estimé pendant cette phase.

#### 6.4.4 Permutation conditionnelle des ancrs sur le corps

Pour résoudre le problème de remplacement d'ancres, nous proposons un mécanisme conditionnel pour augmenter le  $\mathbb{P}(P_{succ})$  calculé à chaque période d'activité. Notons  $\{s_i | i = 1 \dots N_M\}$  et  $\{s_j | j = 1 \dots N_A\}$  les ensembles des nœuds et ancrs respectivement, où  $\{s_{-i}\}$  représente l'ensemble des nœuds différents de  $s_i$ . Chaque nœud  $s_i$  est attaché à un ensemble de  $N'_A$  ancrs notée par  $A_i = \{a_i^k | k = 1 \dots N'_A\}$ , où  $a_i^k$  peut être une ancre  $s_j$  ou un nœud mobile  $s_{-i}$  qui agit comme une ancre virtuelle pendant une certaine période. Ainsi, on définit une *stratégie unique* [Wang 13] de changement d'ancre pour le nœud  $s_i$  comme la permutation du  $a_i^k$ , donné par  $\phi_i^w \in \Phi_i$ , où  $w$  est l'indice de l'ensemble des  $N_\phi$  stratégies uniques possibles  $\Phi_i$ . De plus, la fonction d'utilité pour  $s_i$  est calculée par :

$$u_i(s_i, \phi_i^w) = \mathbb{P}(P_{succ} | \theta)_i^w \quad (6.5)$$

où  $\mathbb{P}(P_{succ} | \theta)_i^w$  représente la probabilité de  $P_{succ}$  en utilisant la stratégie de permutation  $\phi_i^w$ . Dans ce contexte, chaque nœud va chercher la stratégie qui maximise sa  $\mathbb{P}(P_{succ} | \theta)$  dans  $\Phi_i$ . Par conséquent, la stratégie de notre algorithme de permutation conditionnelle d'ancres correspond à trouver la meilleure stratégie qui maximise la fonction d'utilité pour tous les nœuds :

$$\theta^+ = \arg \max_{w \in \{1 \dots N_\phi\}} \sum_{i=1}^{N_M} u_i(s_i, \phi_i^w) \quad (6.6)$$

Notez que l'implémentation de cet algorithme a besoin d'une période de découverte à la fin de chaque période d'activité pour mettre à jour l'allocation de slots. En effet, lorsque l'on considère des ancrs virtuelles, il est nécessaire d'augmenter le nombre de slots à la fin de chaque trame pour laisser la possibilité aux ancrs virtuelles d'envoyer leurs paquets de réponse aux autres nœuds mobiles pour les aider à calculer leurs positions. Par conséquent, cela peut introduire un compromis entre la latence et le taux de succès de positionnement. En termes de latence, le nombre de paquets à transmettre avec les ancrs virtuelles dépend de la stratégie MAC utilisée. Dans le cas de A&B, le nombre de paquets est en fonction du nombre des ancrs virtuelles disponibles pour tout le réseau (or,  $N_{paquets} = 2 * (N_M - 1)$  étant le pire cas lorsque nous avons  $N_M$  nœuds mobiles dans le réseau). Alors que pour P2P-B, le nombre de paquets dépend du nombre de remplacements à faire (or,  $N_{paquets} = 2 * (6 + 4 * (N_M - 4))$  au pire cas pour  $N_M \geq 4$ ).

#### A. Performance de la permutation avec la meilleure configuration

Le but de notre méthode est d'améliorer l'estimation du positionnement des nœuds ayant le pire  $P_{succ}$ . Pour cela, chaque nœud compare son  $P_{succ}$  avec un seuil de qualité de positionnement ( $\alpha$ ). Si le  $\{P_{succ}\}_i$  courant est inférieur au seuil, alors le nœud  $i$  déclenche la recherche de nouvelles ancrs. Il faut noter que le même seuil est utilisé pour sélectionner les ancrs à remplacer. Ainsi, l'objectif est d'augmenter son  $\{P_{succ}\}_i$  grâce à notre mécanisme de positionnement coopératif avec les autres nœuds mobiles, tout en évitant les permutations qui ne sont pas nécessaires. De plus, pour éviter le cas où deux nœuds mobiles se retrouvent ancrs mutuellement, nous commençons par ceux qui ont le pire taux de positionnement. Ainsi, si un nœud mobile A trouve un nœud B comme sa nouvelle ancre, alors le nœud B ne pourra pas choisir A comme ancre. Dans cette étude,  $P_{succ}$  est représenté en rouge (Normal PoS) et la probabilité de  $P_{succ}$  calculée avec l'algorithme de permutation est représenté en bleu (Cooperative PoS). Notez que cette dernière analyse a été faite théoriquement et non pas par simulation.

## 6.4. Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds

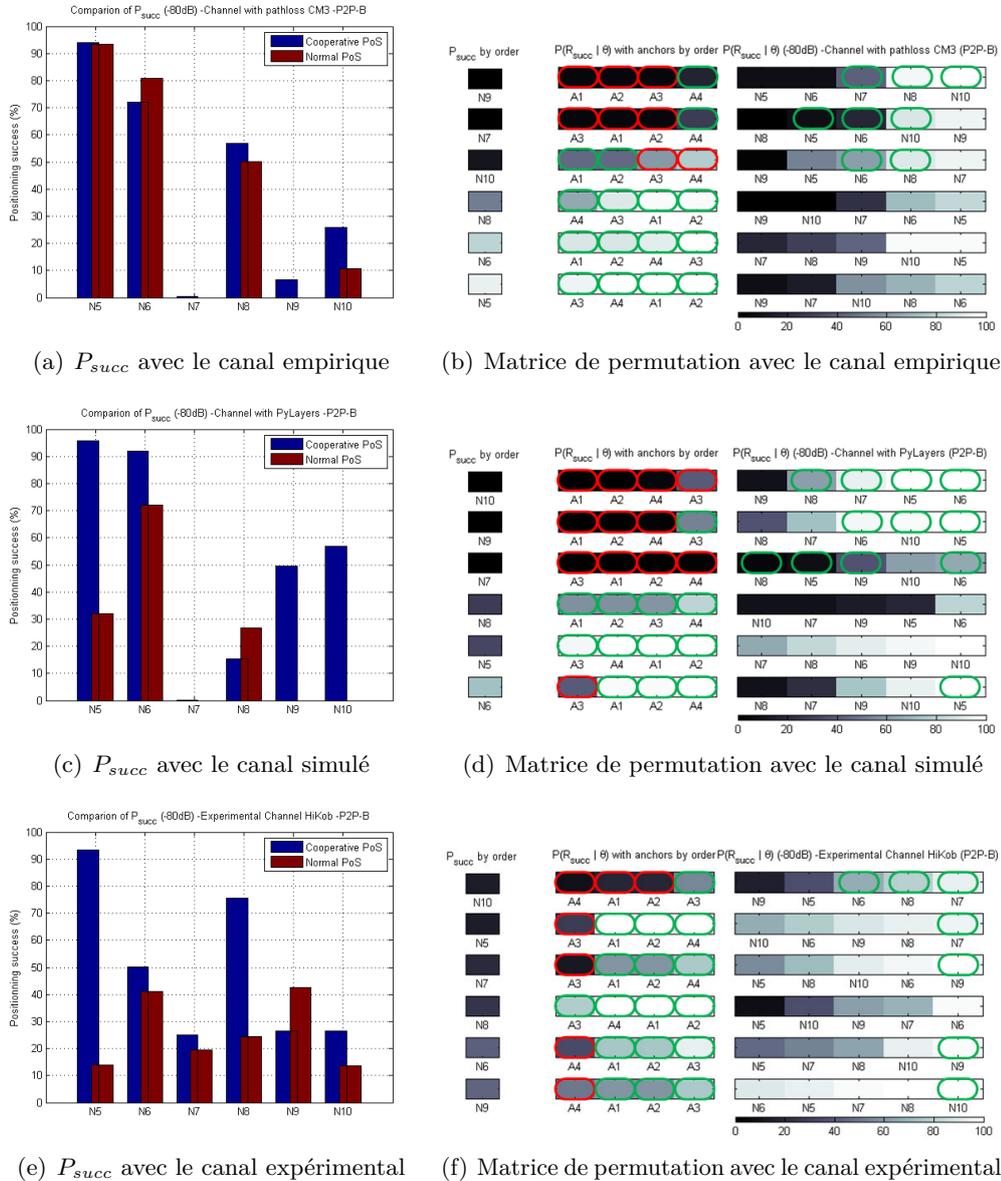


FIGURE 6.17 – Taux de succès de positionnement avec P2P-B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et la stratégie avec la meilleure permutation des ancres (bleue) pour chaque nœud (avec la contrainte où deux nœuds ne peuvent pas être ancres mutuellement). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du  $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du  $P_{succ}$ . Les ancres et les candidats d'ancres virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de  $R_{succ}$ . Les ancres marquées en rouge représentent les ancres remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancres virtuelles choisies pour chaque nœud.

## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste

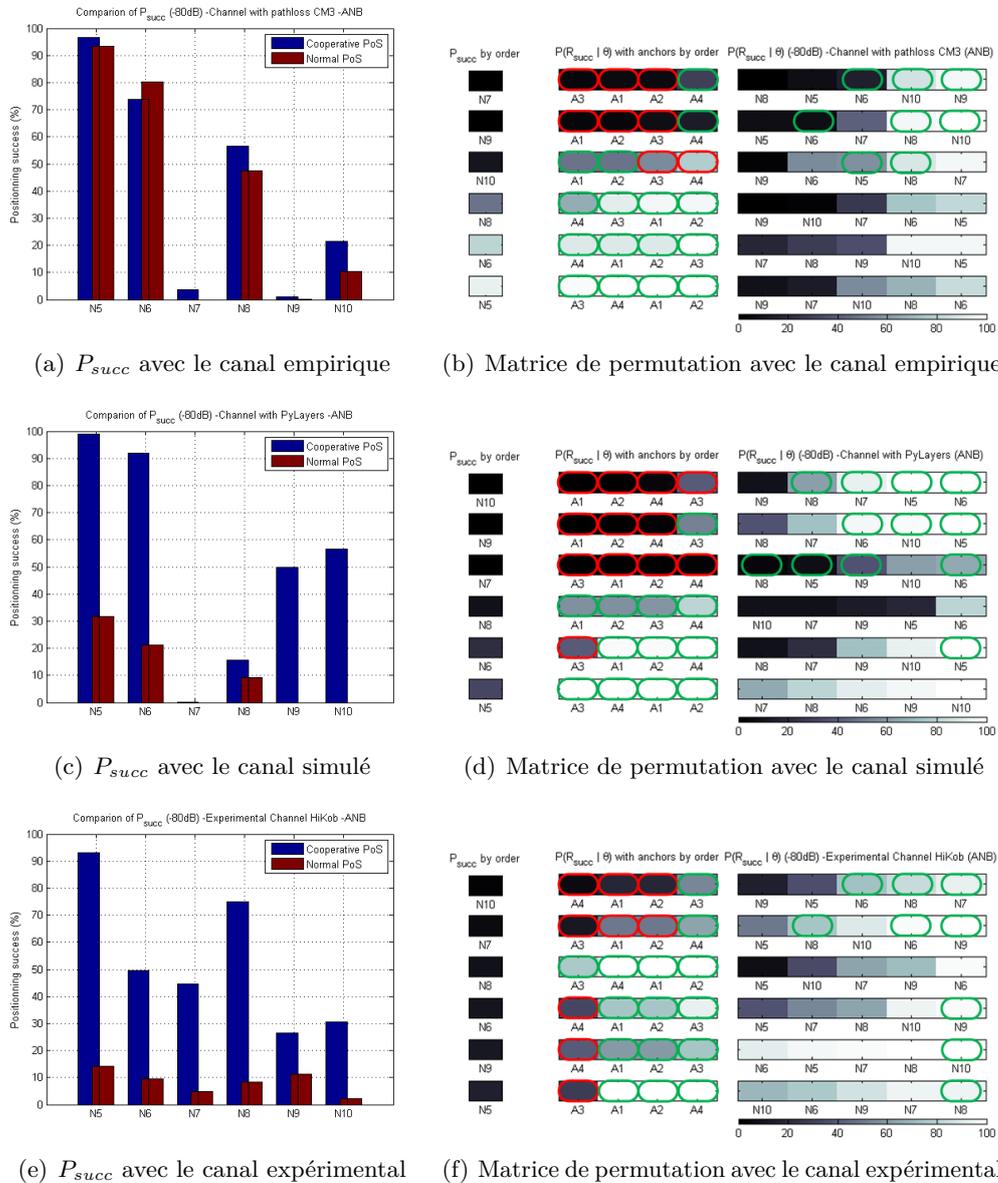


FIGURE 6.18 – Taux de succès de positionnement avec A&B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et la stratégie avec la meilleure permutation des ancres (bleue) pour chaque nœud (avec la contrainte où deux nœuds ne peuvent pas être ancres mutuellement). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du  $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du  $P_{succ}$ . Les ancres et les candidats d'ancres virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de  $R_{succ}$ . Les ancres marquées en rouge représentent les ancres remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancres virtuelles choisies pour chaque nœud.

#### 6.4. Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds

Les Figures 6.17 et 6.18 montrent la comparaison entre le  $P_{succ}$  initial sans le mécanisme coopératif (en rouge) et la  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$  calculée en utilisant la meilleure stratégie de permutation (en bleue) lorsque le seuil de réception est fixé à  $\rho = -80dBm$  et le seuil de qualité est  $\alpha = 50\%$ . Les schémas à droite de chaque Figure correspondent à la matrice de permutation utilisée pour calculer la  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$ . Dans ces schémas, les ancres marquées en rouge sont les ancres remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancres virtuelles de la meilleure stratégie de permutation. De plus, il faut noter que les nœuds sont classés par ordre décroissant en fonction du  $P_{succ}$ . Ainsi, les nœuds ayant le pire positionnement se trouvent en haut et choisissent leur ancres virtuelles en premier. L'ordre d'affichage des ancres et des potentielles ancres virtuelles est donnée également par ordre décroissant en fonction de la probabilité d'estimation de distance ( $\mathbb{P}(R_{succ}|\theta)$ ). Ainsi, les meilleures ancres se trouvent toujours à droite du schéma. Notez que la couleur de chaque nœud représente une valeur entre 0 (noir) et 100% (blanc) pour toutes les métriques présentées ( $P_{succ}$ ,  $R_{succ}$ ,  $PRR$ ). Ainsi, nous pouvons observer de manière générale que notre stratégie de choix d'ancre favorise les nœuds avec un faible  $P_{succ}$  pour tous les canaux et stratégies d'ordonnancement, mais il permet également d'augmenter le  $P_{succ}$  pour tous les autres nœuds où il y avait 1 ou 2 ancres à remplacer.

Dans le cas du canal empirique (Figures 6.17(a), 6.17(b), 6.18(a) et 6.18(b)), nous pouvons observer que le  $P_{succ}$  augmente très peu comparé aux autres canaux. L'ordre de choix d'ancres (Figure 6.18(b) (resp. 6.17(b))) pour A&B (resp. P2P-B) a été  $[N_7, N_9, N_{10}, N_8, N_6, N_5]$  (resp.  $[N_9, N_7, N_{10}, N_8, N_6, N_5]$ ). Par conséquent,  $N_7$  (resp.  $N_9$ ) choisit ses ancres en premier avec A&B (resp. P2P-B) et les gains de performance entre ces deux nœuds sont intervertis. En effet, ceci est dû au fait que deux nœuds ne peuvent pas être ancres mutuellement et donc, si  $N_7$  a choisi  $N_9$  comme ancre virtuelle,  $N_9$  devra trouver une ancre différente de  $N_7$ . Cependant, il faut noter que même avec notre stratégie, le  $P_{succ}$  de  $N_7$  et  $N_9$  reste très faible par le manque d'ancres fiables. Ceci peut s'expliquer parce que leur  $\mathbb{P}(R_{succ}|\theta)$  est faible avec toutes les ancres virtuelles. Cela signifie que même si 3 ancres montrent un bon  $\mathbb{P}(R_{succ}|\theta)$ , si la 4ème ancre a un faible  $\mathbb{P}(R_{succ}|\theta)$ , alors le  $P_{succ}$  est conditionné à être faible aussi. D'autre part, nous pouvons noter une légère diminution du  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$  de  $N_6$ , même lorsqu'il n'a pas fait de permutation. Cela est dû à une erreur statistique dans notre calcul de  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$ , contrairement au  $P_{succ}$  réel où l'effet temporel de canal est pris en compte pour toute une période d'activité.

Dans le cas du canal simulé (Figures 6.17(c), 6.17(d), 6.18(c) et 6.18(d)), les deux stratégies MAC utilisent la même permutation d'ancres pour tous les nœuds. De plus, l'ordre de choix est similaire, étant  $[N_{10}, N_9, N_7, N_8, N_6, N_5]$  pour A&B et  $[N_{10}, N_9, N_7, N_8, N_5, N_6]$  pour P2P-B. Par conséquent,  $N_{10}$  et  $N_9$  sont favorisés pour augmenter leur  $P_{succ}$ . Par contre,  $N_7$  ne peut pas augmenter son  $P_{succ}$  à cause du taux de réception de paquet qui n'est pas suffisamment fiable avec tous les ancres, même après le remplacement. D'autre part, nous pouvons noter une différence du  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$  par rapport au  $P_{succ}$  pour  $N_8$  avec P2P-B (Figure 6.17(c)), même lorsqu'il n'a pas fait de permutation. Cela est dû à une erreur statistique (tel que  $N_6$  pour le canal empirique) avec le  $P_{succ}$  réel où l'effet de canal temporel est pris en compte.

Enfin, dans le cas du canal expérimental (Figures 6.18(e), 6.18(f), 6.17(e) et 6.17(f)), on observe que notre algorithme augmente la probabilité du  $P_{succ}$  pour la plupart des nœuds (sauf  $N_9$  avec P2P-B), même si cette amélioration est moins important avec

P2P-B. Ceci est intéressant car nous avons remplacé seulement une ancre pour la plupart des nœuds. Pour ce cas, le choix d'ancres a été  $[N_{10}, N_7, N_8, N_6, N_9, N_5]$  avec A&B et  $[N_{10}, N_5, N_7, N_8, N_6, N_9]$  avec P2P-B. D'autre part, nous pouvons noter que c'est toujours  $N_{10}$  et  $N_7$  qui ont besoin de la coopération pour se localiser. Ainsi, on peut conclure que les nœuds placés sur les mains ont généralement besoin d'une ancre virtuelle, alors que les nœuds placés sur les jambes auront besoin de plusieurs ancres virtuelles. D'autre part, nous pouvons noter une différence importante du  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$  par rapport au  $P_{succ}$  pour  $N_9$  avec P2P-B (Figure 6.17(c)). Dans ce cas, notre algorithme avait calculé qu'il était nécessaire de faire un remplacement de l'ancre  $A_4$  avec  $N_{10}$ , mais cela n'a pas amélioré le taux de succès de positionnement. Cela est dû au fait que le  $(R_{succ}|\theta)$  calculé pour les autres trois ancres était proche du seuil de remplacement ( $\alpha$ ) mais elles n'ont pas été remplacées et l'erreur statistique de cette métrique ne prend pas compte de l'effet de canal temporel du  $P_{succ}$  réel.

Du point de vue de la mise en œuvre, il faut que chaque stratégie de permutation soit cohérente par rapport à l'ordonnement des paquets des ancres virtuelles à la fin de chaque trame. En effet, il faudrait d'abord que les nœuds qui arrivent à se positionner avec les ancres initiales, commencent à transmettre ses paquets réponse 3-WR pour aider aux prochaines ancres virtuelles à se positionner et puis aider aux nœuds manquants. Dans le cas du canal empirique (Figures 6.18(b) et 6.17(b)), nous observons que cette logique est respectée avec les deux stratégies MAC où  $N_5$ ,  $N_6$  et  $N_8$  peuvent être ordonnés en premier comme ancres virtuelles pour aider  $N_{10}$ , puis  $N_{10}$  pourra envoyer ses paquets pour aider  $N_7$  et  $N_9$ . Par contre, dans le cas du canal simulé (Figures 6.18(d) et 6.17(d)), nous pouvons noter que cette cohérence ne suit plus l'ordonnement des ancres pour les deux stratégies MAC. Par exemple, il faut que  $N_5$  commence à transmettre les réponses 3-WR pour aider  $N_6$ , puis  $N_6$  et  $N_8$  pourront aider les autres nœuds. Par contre, nous pouvons observer qu'il y a un problème entre les nœuds  $N_{10}$ ,  $N_9$  et  $N_7$  pour mettre en œuvre ces permutations. En effet, les trois dépendent les uns des autres pour se positionner, ce qui est impossible du point de vue de l'ordonnement et la localisation. Cette observation est importante à considérer car cela veut dire que la meilleure stratégie de permutation n'est pas toujours possible du point de vue pratique. Pour corriger cela, il faudrait mettre un ajustement sur l'algorithme de choix d'ancres pour éviter qu'un nœud choisisse une ancre virtuelle ayant un pire  $P_{succ}$  que lui.

De cette étude, nous pouvons conclure que notre algorithme permet d'augmenter la probabilité de succès de positionnement pour tous les nœuds (même lorsque le  $P_{succ}$  était bas) avec les deux protocoles MAC et tous les canaux. Avec ces résultats, nous estimons que l'algorithme est générique. C'est qui est un avantage pour la localisation des WBANs où la corpulence et le comportement de la personne génère un impact important sur la topologie du réseau. Cependant, pour pouvoir le mettre en place, il faut considérer quelques ajustements sur le choix des ancres pour pouvoir les ordonner dans la trame.

### B. Ajustement sur le choix des ancres virtuelles pour l'ordonnement

Avec cette deuxième stratégie de permutation, nous souhaitons ajuster notre algorithme précédent pour pouvoir l'implémenter au niveau de l'ordonnement MAC. Pour cela, nous ajoutons quelques critères de sélection en plus sur le choix d'ancres. La première amélioration consiste à ne jamais choisir un nœud mobile ayant un pire  $P_{succ}$  que soi-même. Puis, nous ajoutons une deuxième amélioration sur le calcul de la

#### 6.4. Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds

probabilité de succès positionnement ( $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$ ) de l'équation (6.7) pour la fonction d'utilité (éq. 6.5) du nœud  $s_i$  comme suit :

$$\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)_i^w = \prod_{\{s_j^k \in \phi_i^w\}} (R_{succ})_{ik} \prod_{\{s_{-i}^k \in \phi_i^w\}} \mathbb{P}(R_{succ}|\theta)_{ik} \quad (6.7)$$

où  $s_j$  et  $s_{-i}$  représentent respectivement les ancrs et les ancrs virtuelles de la stratégie unique de permutation  $\phi_i^w$  du nœud  $s_i$ . Ainsi, nous prenons en compte les variations temporelles connues pour les ancrs avec  $R_{succ}$  et les prédictions sur la probabilité de  $R_{succ}$  pour les ancrs virtuelles. Enfin, le choix d'ancrs commence toujours par les nœuds ayant le pire taux de positionnement.

Les Figures 6.19 et 6.20 montrent une comparaison entre la  $\mathbb{P}(P_{succ}|\theta)$  calculée avec notre ajustement (vert) et les résultats obtenus précédemment. Nous pouvons observer que pour tous les canaux et stratégies MAC, notre stratégie ajustée améliore ou ne modifie pas le taux de positionnement comparé au  $P_{succ}$  obtenu initialement (rouge). De plus, nous pouvons noter que notre permutation ajustée augmente également le nombre d'ancrs virtuelles communes, ce qui peut réduire le nombre des paquets à relayer pour le positionnement. Ceci est dû au fait que les nœuds considèrent toujours les nœuds avec le meilleur  $P_{succ}$  comme des ancrs virtuelles et donc, la probabilité que les nœuds choisissent les mêmes ancrs virtuelles augmente.

Dans le cas du canal empirique (Figures 6.19(a) et 6.20(a)), nous pouvons noter que avec l'ajustement les nœuds  $N_5$ ,  $N_6$  et  $N_8$  n'ont pas besoin de remplacer aucune des ancrs de base. Cependant, même si nous avons trois ancrs virtuelles disponibles,  $N_{10}$  est le seul nœud qui améliore sa performance de positionnement par le remplacement de l'ancre  $A_1$  avec  $N_8$  (pour P2P-B et A&B). En effet, nous observons que le positionnement des nœuds  $N_7$  et  $N_9$  ne peut pas être amélioré même après l'ajustement par le manque d'ancrs virtuelles fiables. Si l'on analyse les stratégies de permutation (Figures 6.20(b) et 6.19(b)), nous pouvons observer que pour un ordonnancement des ancrs virtuelles au niveau de la trame, c'est  $N_8$  qui doit transmettre en premier pour aider  $N_{10}$ . Ensuite, l'ordonnancement des ancrs pour  $N_7$  et  $N_9$  change en fonction de la stratégie MAC (A&B ou P2P-B). Dans le cas de A&B, la configuration finale (Figure 6.21(a)) devrait être  $(N_8, N_5, N_6, N_{10}, N_9)$ , ce qui donne un total de 10 paquets en plus à transmettre (soit 2 paquets réponses en broadcast par ancre virtuelle (5)). Dans le cas de P2P-B, l'ordre de transmission (Figure 6.21(b)) doit être  $(N_8, N_5, N_6, N_{10}, N_7)$  avec 18 paquets (soit 2 paquets réponses point à point par remplacement (9)). De ces observations, nous pouvons conclure que pour le cas empirique, l'ajout des ancrs virtuelles n'est pas une bonne solution pour augmenter le taux de positionnement, surtout si cela entraîne une latence importante sans amélioration sur le positionnement des nœuds. Éventuellement, nous pouvons considérer juste une ancre virtuelle ( $N_8$ ) dans la trame pour améliorer le positionnement de  $N_{10}$ , ce qui ajouterait uniquement deux paquets de plus avec les deux stratégies MAC.

Dans le cas du canal simulé (Figures 6.19(c) et 6.20(c)), nous observons que notre ajustement peut améliorer le positionnement pour la plupart des nœuds, notamment ceux qui sont placés dans les pieds. Lorsque l'on considère la stratégie P2P-B (Figures 6.19(c) et 6.19(d)), ce sont les nœuds placés dans les mains ( $N_5$  et  $N_6$ ) qui démarrent le procès de coopération. C'est pour cela qu'ils se positionnent d'abord avec les ancrs initiales et donc, leur  $P_{succ}$  n'évolue pas. Dans ce cas, nous avons besoin uniquement de

## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste

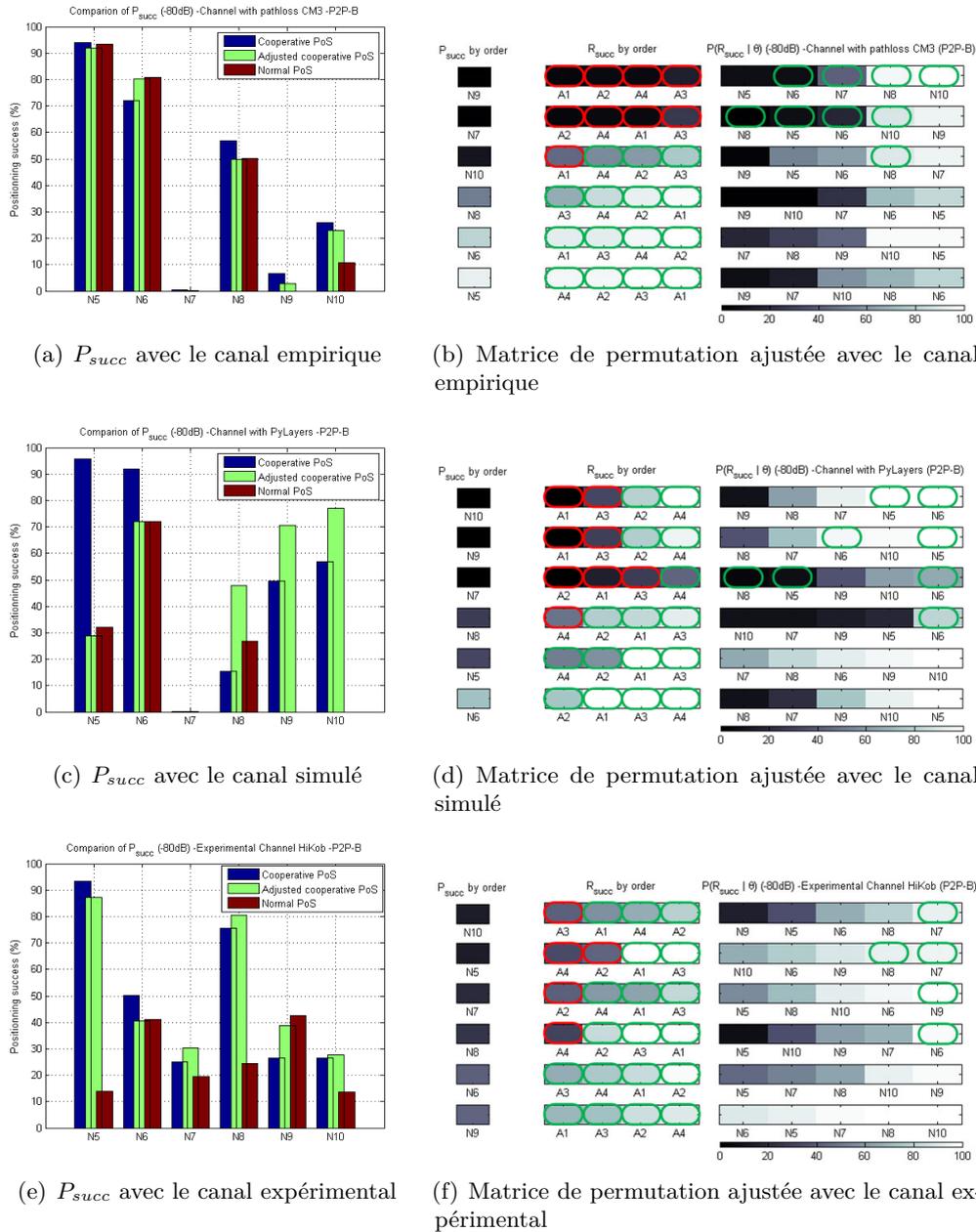


FIGURE 6.19 – Taux de succès de positionnement avec P2P-B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et les stratégies de permutation conditionnelle des ancres initial (bleue) et ajustée (vert). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du  $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du  $P_{succ}$ . Les ancres sont triés par ordre décroissant en fonction du  $R_{succ}$  et les candidats d'ancres virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de  $R_{succ}$ . Les ancres marquées en rouge représentent les ancres remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancres virtuelles choisies pour chaque nœud.

## 6.4. Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds

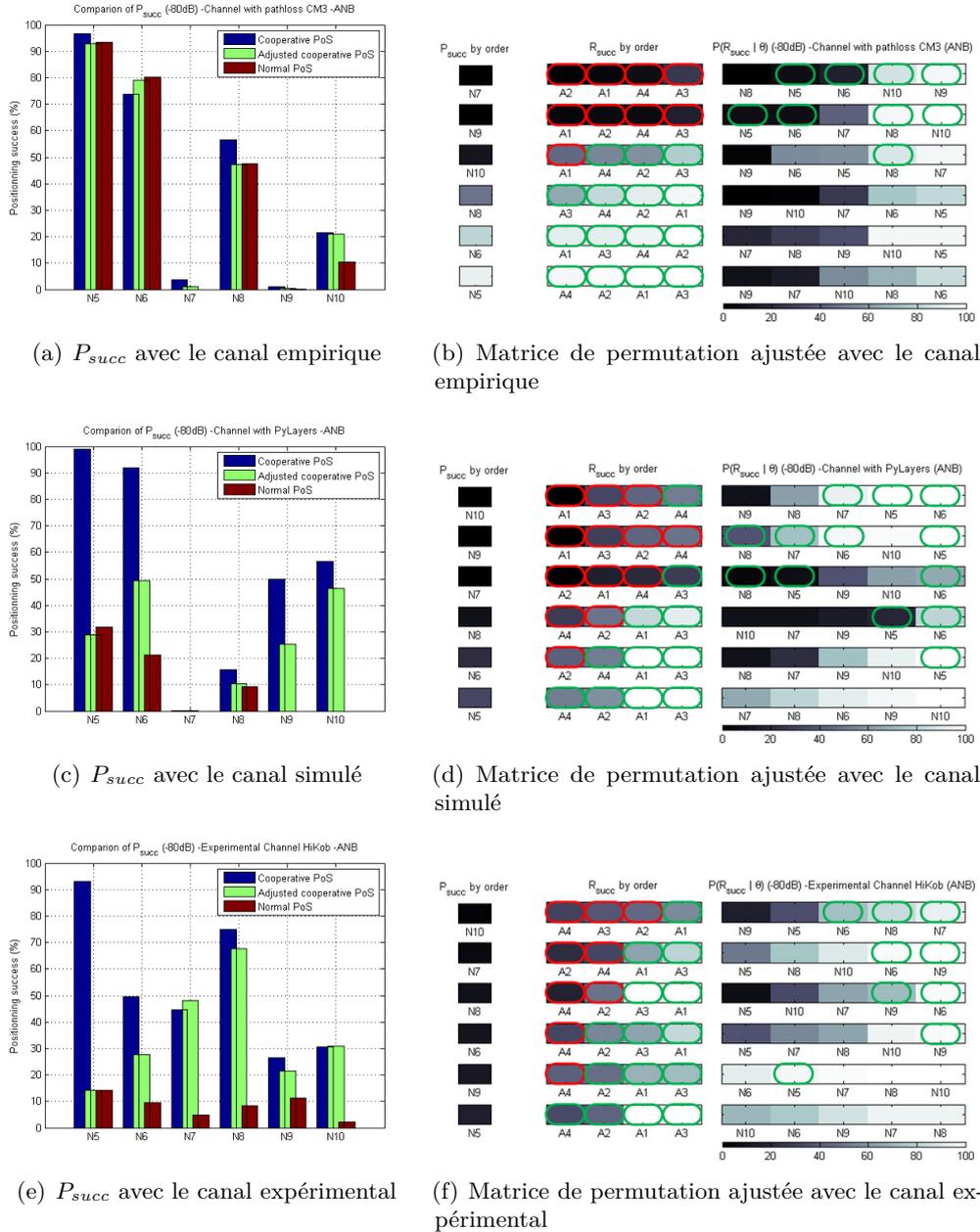
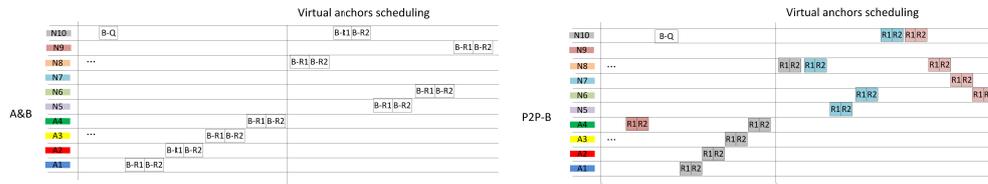
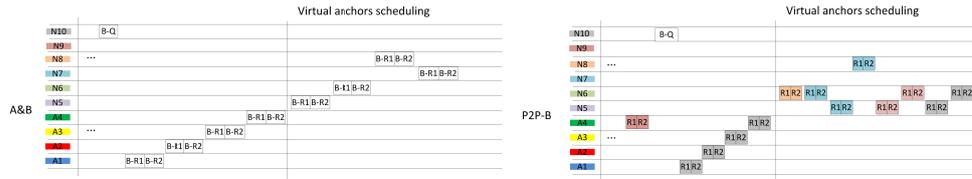


FIGURE 6.20 – Taux de succès de positionnement avec A&B entre la stratégie de positionnement TDOA classique (rouge) et les stratégies de permutation conditionnelle des ancres initial (bleue) et ajustée (vert). Pour chaque Figure, les schémas à droite représentent les stratégies de permutation uniques qui maximisent la probabilité du  $P_{succ}$ . Les nœuds sont classés par ordre croissant en fonction du  $P_{succ}$ . Les ancres sont triés par ordre décroissant en fonction du  $R_{succ}$  et les candidats d'ancres virtuelles sont triés par ordre décroissant en fonction de la probabilité de  $R_{succ}$ . Les ancres marquées en rouge représentent les ancres remplacées et les nœuds marqués en vert représentent les ancres virtuelles choisies pour chaque nœud.

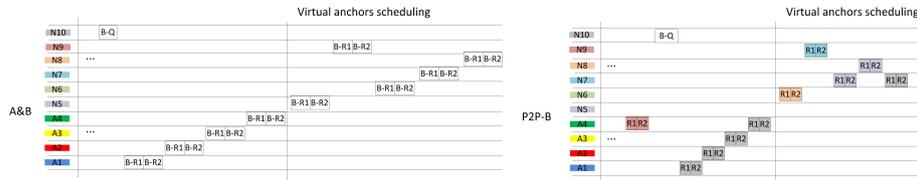
## Chapitre 6. Performance des protocoles de localisation inter-couche avec prise en compte d'un canal réaliste



(a) Ordonnement des ancres virtuelles avec A&B et le canal empirique (b) Ordonnement des ancres virtuelles avec P2P-B et le canal empirique



(c) Ordonnement des ancres virtuelles avec A&B et le canal simulé (d) Ordonnement des ancres virtuelles avec P2P-B et le canal simulé



(e) Ordonnement des ancres virtuelles avec A&B et le canal expérimental (f) Ordonnement des ancres virtuelles avec P2P-B et le canal expérimental

FIGURE 6.21 – Comparaison des différents schémas d'ordonnement des ancres virtuelles en utilisant la permutation ajustée avec avec A&B et P2P-B.

ces deux nœuds comme ancres virtuelles (Figure 6.21(d)) pour augmenter le taux de positionnement des nœuds  $N_8$ ,  $N_9$  et  $N_{10}$ . Cependant, le  $P_{succ}$  du nœud  $N_7$  n'est pas amélioré car nous n'avons pas des ancres virtuelles fiables. Ainsi, l'ordonnement des ancres virtuelles avec P2P-B est ( $N_5$ ,  $N_6$  et  $N_8$ ), soit un total de 16 paquets (Figure 6.21(d)) pour aider tout le réseau ou 10 paquets si l'on considère de ne pas aider  $N_7$ . D'autre part, avec A&B (Figures 6.20(c) et 6.20(d)), nous observons une amélioration moins importante avec notre ajustement. Dans ce cas, l'ordonnement des ancres virtuelles est ( $N_5$ ,  $N_6$ ,  $N_8$ ,  $N_7$ ) avec 8 paquets (Figure 6.21(c)) à considérer dans la trame. Ainsi, c'est  $N_5$  qui doit commencer l'ordonnement pour aider  $N_6$ . Puis,  $N_5$  et  $N_6$  deviennent ancres virtuelles pour aider  $N_8$ . Cependant, nous pouvons observer à nouveau que  $N_7$  ne peut pas améliorer son  $P_{succ}$ . Par conséquent, même si l'on observe une amélioration pour les nœuds  $N_9$  et  $N_{10}$ , celle-ci dépend du  $P_{succ}$  de  $N_7$  qui est très bas. Ceci peut être amélioré si  $N_9$  et  $N_{10}$  utilisent  $A_4$  ou  $N_8$  à la place de  $N_7$ . Puis  $N_9$  et  $N_{10}$  pourraient aider  $N_7$  à se positionner.

Dans le cas du canal expérimental (Figures 6.19(e) et 6.20(e)), nous pouvons observer que les résultats sont très similaires à ceux de notre permutation sans ajustement et les différences dépendent de la stratégie MAC utilisée. Dans le cas du A&B (Figures 6.20(e) et 6.20(f)), l'ordonnement des ancres virtuelles (Figure 6.21(e)) pourrait être [ $N_5$ ,  $N_9$ ,  $N_6$ ,  $N_7$ ,  $N_8$ ]. En effet,  $N_5$  doit être le premier à se positionner avec les ancres pour

#### 6.4. Algorithme coopératif pour améliorer le positionnement des nœuds

ensuite aider  $N_9$ . Après,  $N_9$  devient ancre virtuelle pour  $N_6$  et avec ces deux nœuds on peut aider  $N_8$  et  $N_7$ . Par contre,  $N_{10}$  a besoin de  $N_8$  et  $N_7$  pour se positionner et par conséquent, cela augmente le nombre d'ancres virtuelles. L'avantage de A&B est que même avec 5 ancres virtuelles, cette configuration reste réalisable avec 10 paquets réponse à transmettre en broadcast. Si l'on compare cette configuration avec celle qui pourrait être obtenue sans notre ajustement (Figure 6.17(f)), nous observons que ça serait  $N_8$  qui devrait être la première ancre virtuelle car la prédiction sur la probabilité de  $P_{succ}$  (Cooperative Pos) est forte avec les ancres initiales. En pratique, ce résultat n'est pas très réaliste pour l'ordonnancement car son  $P_{succ}$  est très bas (Normal PoS) et donc, la coopération peut être difficile s'il arrive pas à se positionner. C'est pour cela que la permutation ajustée est plus adaptée, car elle montre avec les variations temporelles de  $R_{succ}$  que ça devrait être  $N_5$  la première ancre virtuelle, puisqu'il a un meilleur  $P_{succ}$  que  $N_8$ . De plus, notre permutation ajustée a permis d'augmenter le nombre d'ancres virtuelles communes (sauf pour  $N_{10}$ ), ce qui est utile pour réduire le nombre de paquets à transmettre. Dans le cas du P2P-B (Figures 6.19(e) et 6.19(f)), nous pouvons observer que l'amélioration du  $P_{succ}$  est très marginale avec notre permutation ajustée. Par contre, on arrive à améliorer au niveau de l'ordonnancement. En effet, avec notre permutation initiale (Figure 6.17(f)), il fallait envoyer 14 paquets avec 5 ancres virtuelles. Avec notre permutation ajustée (Figure 6.19(f) et 6.21(f)), il faut juste 10 paquets avec 4 ancres virtuelles [ $N_6, N_9, N_7, N_8$ ]. Ceci est un avantage, car on réduit le nombre de ancres relais (1 ou 2 pour tous les nœuds) et le nombre de paquets à transmettre.

De ces résultats, nous pouvons conclure que notre stratégie ajustée améliore le  $P_{succ}$  de manière plus réaliste car cela donne un indice sur l'ordonnancement à utiliser au niveau de la MAC. Cependant, il faudrait considérer dans notre calcul le cas où une ancre virtuelle peut avoir un mauvais  $P_{succ}$ . En effet, dans notre algorithme, on souhaite que chaque nœud puisse choisir ses ancres virtuelles. Par contre, il ne connaît pas forcément le taux de positionnement de ces nœuds candidats pour devenir ancres virtuelles. Pour cela, nous pouvons imaginer deux solutions, une centralisée ou une distribuée. Dans le cas centralisé, toute la connaissance des LQEs à court et long terme devrait être relayée par période vers un nœud central qui pourrait trouver la meilleure stratégie de permutation tout en gardant une cohérence sur l'ordonnancement. Puis, ce nœud devra transmettre la nouvelle configuration de la trame vers tous les nœuds. Par contre, ceci implique une phase de prédiction et une phase de mise à jour pour tout le réseau, ce qui peut ajouter une latence importante pour le positionnement. Dans le cas distribué, il faudrait que chaque nœud ait une connaissance du  $P_{succ}$  de tous les nœuds, ainsi il pourrait savoir quels sont les nœuds prioritaires pour choisir ses ancres et éviter des choisir des ancres virtuelles qui ont du mal à se positionner. Ensuite, chaque nœud devra annoncer les ancres virtuelles à tout le réseau pour pouvoir mettre à jour l'ordonnancement du réseau.

## **6.5 Discussion et perspectives**

Dans ce Chapitre, nous proposons un algorithme coopératif pour augmenter le taux de positionnement des nœuds d'un WBAN. Pour cela, nous avons analysé l'impact du canal sur le taux de succès de positionnement en utilisant un WBAN avec une radio impulsionnelle. De plus, nous avons considéré un scénario de marche réaliste où les nœuds communiquent avec des ancres placées sur le corps pour faire la capture du mouvement. Nous utilisons trois modèles de canal différents : i) un modèle théorique basé sur l'affaiblissement sur le trajet du canal CM3 défini par le standard IEEE 802.15.6, ii) un modèle calculé par simulation ray-tracing avec PyLayers et iii) un modèle de canal obtenu par mesures expérimentales.

Dans les sections 6.2 et 6.3, nous avons quantifié les effets du canal sur la réception des paquets 3-WR en fonction du seuil de sensibilité du récepteur. En particulier, nous avons montré que le shadowing du corps est la principale cause de perte de paquets et donc, du taux de succès de positionnement. Cette perte étant plus importante pour les nœuds placés sur les pieds. Dans cette étude, nous avons également comparé la performance de positionnement en utilisant trois stratégies d'ordonnancement au niveau de la MAC (P2P, P2P-B et A&B). Ainsi, nous avons trouvé que même si les trois stratégies montraient un taux de positionnement similaire, A&B estimait plus de positions dans les mêmes conditions de canal et mobilité. Cependant, lorsque la perte de paquets devient importante, A&B est le plus affecté et donc, P2P-B devient l'ordonnancement le plus robuste pour les scénarios dynamiques.

A partir de ces résultats, dans la section 6.4, nous avons implémenté et testé un algorithme coopératif basé sur des LQEs à court et long terme pour augmenter le nombre de positions estimées avec une stratégie de permutation conditionnelle d'ancres. Ainsi, l'analyse à long terme permet d'identifier les nœuds avec le pire taux de positionnement, ainsi que les ancres avec le pire taux d'estimation de distances et qui sont susceptibles d'être remplacées. Puis, avec l'analyse à court terme, on analyse les traces de réception avec les autres nœuds mobiles pour trouver des nouvelles ancres virtuelles. De ces analyses, nous proposons deux stratégies de permutation. La première consistait à trouver la meilleure stratégie de permutation qui maximise la fonction d'utilité de positionnement des nœuds. Pour cela, notre algorithme est capable de calculer la meilleure configuration des ancres et ancres virtuelles pour chaque nœud et tous les scénarios. Ainsi, nous avons montré que notre premier algorithme améliorait le taux de succès de positionnement en priorisant les nœuds avec la pire performance de localisation. Cependant, cette permutation "optimale" (du point de vue du nœud) n'est pas toujours possible, notamment dans le cas où certaines ancres virtuelles, considérées dans la meilleure stratégie, n'arrivent pas à estimer sa propre position. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une deuxième stratégie de permutation basée sur la première pour pouvoir trouver un ordonnancement des ancres virtuelles au niveau de la couche MAC. Nos résultats montrent une amélioration plus réaliste sur le taux de positionnement des nœuds moins performants. De plus, on obtient un ordonnancement cohérent dans la trame en fonction de la stratégie utilisée. En particulier, le nombre de paquets à transmettre est plus bas que notre permutation initiale grâce à l'augmentation des ancres virtuelles communes. Ainsi, on montre que notre ajustement permet de réduire la latence de la coopération.

Notez que l'analyse de performance de nos algorithmes de permutation a été effectué par la théorie. Par la suite, nous aimerions étudier le comportement de nos algorithmes

par simulation avec notre co-simulateur et par expérimentation. De plus, il pourrait être intéressant de regarder les performances de nos algorithmes dans d'autres scénarios comme la navigation de groupe. En effet, il faudrait analyser si notre algorithme est capable d'améliorer le taux de succès de positionnement des nœuds en considérant les liens off-body et body-to-body. Pour cela, il faudrait considérer une étude pour évaluer l'impact de la coopération sur l'erreur d'estimation de distances et positions avec nos différentes stratégies de permutation. Or, nous avons expliqué que la localisation avec des ancres virtuelles demande la transmission de paquets supplémentaires à la fin de la trame. Ceci implique que le calcul de la position soit retardé et donc, nous pouvons attendre une augmentation de l'impact de la mobilité sur l'estimation des distances avec les ancres virtuelles qui peut avoir induire à des erreurs sur le positionnement. Ainsi, cette étude permettrait d'évaluer le compromis entre la latence et la précision des nos algorithmes et on pourra identifier les scénarios où la coopération est nécessaire ou pas. En outre, un aspect qu'il faudra regarder aussi est la fusion de données pour faire le choix des ancres virtuelles. Pour cela, nous pourrions imaginer deux approches (centralisée ou distribuée) qui lancent une période de découverte au début de chaque période d'activité (composée par un nombre modulable de trames) pour évaluer et mettre à jour son stratégie de permutation. Lors de cette période de découverte, les nœuds pourraient partager leur information sur leur taux de succès de positionnement et leurs stratégies de permutation. Ainsi, lors de la construction de la trame, on pourra choisir la stratégie la plus adaptée avec les meilleures permutations en fonction de la qualité des liens observés.



# 7 Conclusion et perspectives

*"Science works on the frontier between knowledge and ignorance ... We are not afraid to admit what we don't know, there is no shame on that, the only shame is to pretend that we have all the answers"*

*Cosmos : A Spacetime Odyssey*  
— Neil deGrasse Tyson, *American astrophysicist*

## Sommaire du chapitre

---

7.1	Synthèse des travaux et conclusions . . . . .	166
7.1.1	Études préliminaires . . . . .	166
7.1.2	Outils développés pour l'étude de localisation avec des WBANs . .	168
7.1.3	Caractérisation de l'erreur d'estimation de distance générée par la mobilité et le canal . . . . .	170
7.1.4	Réduction de l'erreur d'estimation de la distance et des positions .	171
7.1.5	Amélioration du protocole de localisation avec une approche co- opérative inter-couche . . . . .	173
7.2	Perspectives . . . . .	174
7.2.1	Développement d'un co-simulateur en temps réel . . . . .	174
7.2.2	Impact de l'erreur sur le temps d'arrivée . . . . .	174
7.2.3	Modélisation des interférences et coexistence multi-WBAN . . . .	175
7.2.4	Communication coopérative pour la localisation multi-WBANs . .	175

---

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'étude des communications coopératives avec les WBANs pour faire la capture du mouvement et la navigation de groupe. Pour cela, nous utilisons et exploitons les avantages d'une radio IR-UWB pour l'estimation précise des distances. La difficulté réside dans la communication du WBAN autour du corps pour assurer la localisation. En effet, les liens de ce type de réseau sont affectés principalement par la mobilité du corps qui génère des effets de masque entre les nœuds. Par conséquent, cela peut entraîner de la perte de paquets et des erreurs d'estimation ayant un impact sur le positionnement des nœuds. Pour cela, nous avons traité le problème avec deux approches : proposer différents mécanismes coopératifs inter-couche qui font une meilleure gestion sur l'allocation de ressources pour réduire l'impact de la mobilité sur les estimations et proposer un algorithme coopératif distribué basé sur l'analyse des estimateurs de qualité de liens pour augmenter le taux de positionnement des nœuds. De plus, ces études ont été réalisées et évaluées avec nos propres outils. En particulier, grâce à la campagne de mesures, nous avons obtenu des modèles de mobilité réalistes que nous avons couplé avec trois modèles de canal : empirique, déterministe et expérimental.

### 7.1 Synthèse des travaux et conclusions

Cette thèse s'est déroulée en 3 ans dans le cadre du projet ANR CORMORAN, plus 8 mois de rédaction du manuscrit en parallèle d'un contrat ATER. Le travail réalisé s'est découpé chronologiquement en une année d'étude de l'état de l'art pour déterminer le positionnement du problème, une année de développement et d'expérimentation et une année de conception et analyse des algorithmes coopératifs. Ce travail a permis de contribuer avec différentes publications avec comité de lecture : une publication dans une revue internationale [Guizar 16a], sept publications dans des conférences internationales [Guizar 14a] [Guizar 14b] [Denis 14] [Guizar 15a] [Ouni 15] [Guizar 15b] [Guizar 15d] et trois publications dans des conférences nationales [Guizar 15e] [Guizar 15c] [Guizar 16b]. Par la suite, nous allons synthétiser les travaux réalisés chronologiquement pour comprendre les différents réflexions qui nous ont permis d'avancer et faire ces contributions dans cette thèse.

#### 7.1.1 Études préliminaires

La première année de thèse a été consacrée à se positionner par rapport au problème de la localisation en fonction du contexte centré sur l'utilisateur. Grâce à l'étude réalisée avec différents partenaires industriels et académiques (Chapitre 2), nous avons identifié deux scénarios d'application, ainsi que les différentes spécifications techniques à considérer pour chacun : la capture de mouvement individuelle (LSIMC) et la navigation en groupe (CGN). Dans le premier scénario (LSIMC), on s'est intéressé à la capture de mouvement avec des capteurs autonomes placés sur le corps capables de se positionner de manière distribué avec un accès limité aux éléments d'une infrastructure. Pour cela, les nœuds mobiles se positionnent par l'estimation de la distance avec des nœuds ancrés (placés sur le corps) ayant connaissance de sa propre position. Dans ce scénario, nous avons déterminé deux niveaux de qualité de service (haute et faible) où l'on fait varier la résolution (1 à 25 cm), la précision (90% à 50%) et le taux de rafraîchissement (10 à 100 ms). Le deuxième scénario (CGN) consistait à assurer la navigation en groupe à l'intérieur des bâtiments. Pour cela, chaque personne du groupe est équipée de plusieurs capteurs

sur leur corps pour former un groupe d'utilisateurs mobiles qui doivent se repérer de manière coopérative. En termes de besoins techniques du CGN, un seul niveau de qualité de service était nécessaire pour la résolution (0,3 à 1 m), la précision (90% à 50%), le taux de rafraîchissement (1 s), le nombre de personnes par groupe (5 à 10) et la distance maximale entre les personnes (1 à 50 m). Pour chaque scénario (LSIMC et CGN), nous avons également déterminé différents paramètres physiques en termes du nombre de nœuds sur le corps, de la densité des ancrs, de l'emplacement des nœuds sur le corps et de l'environnement d'application.

Grâce à cette étude, nous avons comparé différentes technologies de capture en fonction de leurs avantages et inconvénients. En particulier, nous avons retenu l'utilisation des systèmes optiques et des systèmes radio dans le cadre de cette thèse. D'une part, les systèmes optiques ont été choisis pour nous aider dans la création d'une base de données expérimentale et comme systèmes de calibration pour nos mesures. Puis, nous avons identifié que les systèmes radio basés sur l'UWB impulsionnelle étaient les plus adaptés pour nos besoins de localisation. En effet, les signaux UWB reposent sur une grande largeur de bande passante ( $> 500\text{MHz}$ ) qui leur permet d'être plus robustes aux multi-trajets, ce qui est nécessaire pour les scénarios à l'intérieur. De plus, ils permettent d'estimer les distances avec une précision centimétrique grâce à sa haute résolution temporelle de quelques nanosecondes.

Nous avons expliqué que UWB permet d'estimer la distance avec l'évaluation du temps de trajet (basé sur le ToA) des impulsions entre deux nœuds. Ceci est possible avec les protocoles délimiteurs de distance (*n-way ranging*) qui mesurent le temps de vol d'aller-retour (RT-ToF) des signaux UWB. En particulier, nous avons retenu les protocoles *2-way ranging* (2-WR) et *3-way ranging* (3-WR) qui calculent la distance avec l'échange de deux paquets transmis entre un nœud mobile et une ancre. De son côté, le 3-WR permet en plus de compenser la dérive d'horloge avec la transmission d'un troisième paquet. Ces protocoles ont pour avantage d'être simples et faciles à implémenter mais leur précision peut être dégradée par des phénomènes physiques tels que la désynchronisation de nœuds, le canal WBAN et la mobilité des nœuds. En effet, la synchronisation des nœuds est importante pour la bonne détection des impulsions et pour éviter les interférences inter-symbole et multi-utilisateur. De plus, la mobilité du corps varie en fonction de l'activité de la personne, ce qui provoque des variations du canal. Ces variations, dues à l'affaiblissement des trajets et aux effets de masque du corps, peuvent générer des erreurs d'estimation et de la perte de paquets. Par conséquent, l'estimation précise du ToA des impulsions dépend du type de récepteur choisi. Pour traiter ces problèmes, nous avons travaillé avec quatre hypothèses de base au niveau de la radio : i) l'acquisition de synchronisation à la réception est toujours faite ; ii) les ancrs de référence sont toujours synchronisés et partagent la même horloge ; iii) les capteurs sont capables de détecter le premier pic des impulsions avec un récepteur non cohérent ; et iv) les nœuds sont à portée radio les uns des autres.

Nous avons ensuite pris en compte la mobilité du corps qui peut également affecter la conception de la couche MAC. En effet, lors des échanges des paquets 2-WR et 3-WR, les nœuds se déplacent à différentes vitesses et donc le temps vol détecté pour chaque paquet varie, ce qui entraîne à des erreurs sur l'estimation de la distance. De plus, si l'on considère que chaque paquet peut arriver avec un délai supplémentaire, les erreurs peuvent augmenter en fonction de la vitesse des nœuds. Nous avons expliqué

que ce problème pouvait s'agrandir lors de l'estimation de distances avec toutes les ancres et donc, cela peut avoir un impact sur l'estimation de la position finale. Dans la littérature, la plupart des travaux qui ont traité la localisation avec les WBANs, se sont concentré principalement sur les problématiques de la radio (pour modéliser le canal) et l'optimisation des algorithmes de positionnement, sans prendre en compte les différents aspects au niveau de la MAC. Pour ces raisons, nous nous sommes intéressé à l'étude de ce problème avec une approche inter-couche en proposant des nouveaux mécanismes coopératifs et distribués capables d'optimiser la communication du réseau pour augmenter à la fois le taux de positionnement et la précision des estimations. Dans cette thèse, nous avons utilisé une couche MAC basée sur le principe du TDMA où l'on suppose que la synchronisation de la trame est faite avec des paquets balise.

### 7.1.2 Outils développés pour l'étude de localisation avec des WBANs

Le chapitre 3 était consacré à détailler ce que nous avons fait pour la conception d'une base de données de mesures (pour avoir des modèles de mobilité et de canal réalistes) et la création d'un simulateur dédié à l'étude des WBAN. D'abord, nous avons analysé différents outils proposés dans la littérature et nous avons trouvé que la plupart n'étaient pas créés à la base pour étudier les problématiques du WBAN ou bien ils étaient destinés pour traiter un problème spécifique sans considérer tous les aspects des différentes couches. De cette analyse, nous avons retenu deux simulateurs, PyLayers pour traiter les aspects de la couche physique et WSNNet pour simuler nos scénarios et évaluer nos stratégies proposées. En ce qui concerne aux modèles de canal, nous avons choisi quelques modèles statistiques de base [Yazdandoost 09] [D'Errico 09] pour pouvoir comparer analytiquement nos résultats avec d'autres modèles que nous avons obtenus par des outils déterministes [Amiot 13] ou par des plateformes expérimentales [Lauzier 13].

Pour la base de données expérimentale, nous avons opté pour créer nos propres modèles avec une approche multi standard en utilisant un système optique (vicon) pour la capture du mouvement et différentes plateformes radio pour la mesure du canal. Dans la campagne de mesures, nous avons considéré plusieurs scénarios pour représenter la capture du mouvement et la navigation en groupe. En particulier, nous avons exploité les mesures obtenues avec la plateforme Hikob [Lauzier 13] qui permet de mesurer le RSSI des signaux NB et nous l'avons adapté pour le cas d'un réseau complètement maillé de 12 capteurs on-body et 4 nœuds off-body. Le post-traitement de ces mesures a consisté à synchroniser nos mesures radio avec celles de la mobilité. Pour cela, nous avons calculé de manière empirique le décalage temporel pour tous les liens entre les traces de radio (avec le RSSI en dB) et de mobilité (avec l'inverse de la vérité-terrain en dB). Puis, nous avons synchronisé nos mesure avec le décalage temporel du lien où le coefficient de corrélation des traces était le plus haut. Ainsi, nous avons ajusté les traces avec le même taux d'échantillonnage temporel des traces de mobilité (100 Hz). Cette procédure a été développée dans le simulateur PyLayers et la base de données a été mise en open source pour la communauté scientifique qui travaille dans les WBANs.

Le deuxième outil développé a été le co-simulateur entre PyLayers et WSNNet. Pour cela, nous avons imaginé deux approches d'interface, soit en temps réel ou bien par l'intermédiaire d'une base de données. Dans la première approche, WSNNet devient maître du temps pour gérer les événements et la synchronisation des horloges des deux simulateurs. Ainsi, pendant la simulation, l'abstraction de la couche physique en WSNNet

fait appel à PyLayers pour simuler le canal instantané pour chaque paquet transmis et puis, envoyer les valeurs du RSSI, ToA et BER vers WSNNet. Nous avons expliqué que cette approche a l'avantage de gérer les ressources en temps réel avec peu utilisation de la mémoire. En revanche, étant donné que ces deux simulateurs travaillent avec deux bases de temps différentes, le temps de simulation peut être plus long et donc, on perd l'intérêt de travailler avec une simulation à événements discrets. Pour ces raisons, nous avons développé la deuxième approche qui consistait à mettre en place une base de données intermédiaire qui stocke les positions des nœuds avec les résultats statistiques du canal calculés avec PyLayers. Ainsi, WSNNet est libre d'accéder à ces données à la convenance des événements créés.

Dans la version actuelle du simulateur, PyLayers permet de fournir le RSSI en réception à partir des traces expérimentales Hikob ou des prédictions avec du *ray tracing*. Pour le calcul des prédictions, PyLayers fait une abstraction du corps avec un modèle multi-cylindrique qui est attaché à différents systèmes de coordonnées à quatre niveaux (antennes, capteurs, membres du corps et le centre de gravité de la personne) et faciliter le calcul de propagation locale. Cette abstraction du corps est animée avec nos modèles de mobilité obtenus par mesure et elle est indépendante de l'environnement utilisé. Cela permet de calculer le RSSI avec différents scénarios modulables. Le calcul du ToA, du SNR et du BER avec l'abstraction d'une radio non-cohérente n'a pas été développé par manque de temps. En revanche, nous avons implémenté en WSNNet un modèle statistique [Hamie 13c] de l'erreur sur l'estimation de distance pour les liens on-body, body-to-body et off-body. Du côté WSNNet, nous avons implémenté différents modules pour chaque couche protocolaire :

- Au niveau de l'application, nous avons implémenté les protocoles 2-WR et 3-WR pour l'estimation de la distance paramétrée sans ou avec erreurs (modèle statistique [Hamie 13c]). Puis, les positions des nœuds peuvent être calculées soit par un algorithme géométrique (TDOA [Xiao 10]) ou par une méthode statistique (basée sur le filtre de Kalma étendu [Ouni 15]). Ainsi, pour chaque scénario simulé, nous avons évalué et comparé nos algorithmes coopératifs en fonction de l'erreur d'estimation sur la distance, l'erreur de positionnement et le nombre de positions estimées. De plus, c'est à ce niveau qu'il est possible d'évaluer les estimateurs de qualité de lien à long terme (le taux de succès de positionnement et le taux de succès d'estimation de distances).
- Au niveau de la couche MAC, la communication a été développée avec le principe du protocole TDMA où la stratégie d'ordonnancement est choisie soit par une approche de transmission point à point (P2P) ou en broadcast (A&B). Ainsi, nous avons dimensionné la trame en fonction du nombre de nœuds et la taille des slots qui varie en fonction du paquet 3-WR transmis. Par conséquent, chaque nœud avait son temps de transmission dans la trame pour éviter les interférences intra-WBAN (entre les nœuds d'un WBAN) et inter-WBAN (entre différents WBANs). Notez que cette couche permet de tracer un nombre important d'informations pendant la simulation, ce qui nous a permis de vérifier la pertinence de données calculées (notamment le ToA des transmissions, le délai des paquets et l'ordonnancement de la trame), pour ensuite déboguer et corriger certaines erreurs de développement.
- Au niveau de la couche PHY, nous avons implémenté une radio basée sur le protocole [IEEEStd802.15.6 12] en IR-UWB avec une modulation OOK (en mode par défaut

ou à haut débit) suivant les quatre hypothèses de base mentionnées avant. Ce choix a été fait pour pouvoir travailler avec un protocole standard dédiée au contexte WBAN avec une radio impulsionnelle et garder une liberté sur l'implémentation des hautes couches. De plus, toutes nos études ont été évaluées avec le mode par défaut (0.487 Mbps avec une sensibilité en réception de -91 dBm), ce qui permet d'avoir une durée de symbole de 2054 ns qui est suffisamment grande pour éviter l'interférence inter-symbole. La réception des paquets a été évaluée en fonction du RSSI. Ainsi, nous avons récupéré l'historique du RSSI des paquets reçus par chaque nœud pour estimer la qualité des liens à court terme et l'utiliser pour le choix des ancres virtuelles (chapitre 6).

- Au niveau du canal, nous avons implémenté trois modèles calculés en fonction du modèle de mobilité. Le premier suivait une approche empirique basé sur le canal CM3 [Yazdandoost 09] qui calcule l'affaiblissement de propagation des liens on-body. Le deuxième modèle permet de simuler le canal (on-body, off-body et body-to-body) avec les prédictions ray-tracing de PyLayers. Enfin, le troisième modèle permet de rejouer les traces expérimentales de Hikob synchronisées avec le modèle de mobilité.

Pour ce simulateur, nous avons principalement contribué pour le développement des modules WBAN pour WSN et l'interfaçage avec PyLayers. L'IEETR de l'Université de Rennes 1 a été le principal contributeur sur PyLayers. Avec ce framework, nous avons pu simuler nos deux applications (LSIMC et CGN) avec les différents scénarios de mobilité obtenus dans la campagne de mesures. De la même manière que pour notre base de données, ce simulateur a été mis en open source.

### 7.1.3 Caractérisation de l'erreur d'estimation de distance générée par la mobilité et le canal

Nos premiers travaux avec le simulateur (chapitre 4) ont traité l'impact de la mobilité sur l'estimation de la distance avec 2-WR et 3-WR. Pour cela, nous avons évalué le niveau d'erreur sur les distances estimées en fonction de la vitesse des nœuds et les délais de transmission pour notre scénario LSIMC. D'abord, nous avons montré avec un modèle de mobilité linéaire entre deux nœuds (représentant deux bras qui s'éloignent et se rapprochent) que la distance entre un nœud mobile et une ancre n'est pas constante lors de la transmission des paquets 2-WR ou 3-WR. Par conséquent, la latence pour recevoir ces paquets pouvait générer une erreur sur l'estimation de la distance qui dépend de la vitesse du nœud mobile. Ainsi, nous avons montré que l'erreur induite par la latence était supérieure à celle générée par la vitesse. De plus, nous avons montré que le délai du premier paquet réponse avait un impact plus important sur l'erreur que le délai de la deuxième réponse. Ensuite, nous avons élargi cette étude dans le cas d'un réseau avec plusieurs nœuds on-body en modélisant théoriquement l'impact de la mobilité dans le cas d'un scénario réaliste du Yoga. Pour cela, nous avons utilisé deux stratégies d'ordonnancement (P2P) et A&B) avec des délais connus. Dans cette étude, nous avons confirmé avec des mesures réalistes que l'erreur sur la distance augmente en fonction du délai des paquets et de la vitesse des nœuds. De plus, nous avons observé que l'erreur cumulée par les distances estimées avec les ancres a un impact sur l'estimation de la position. Par conséquent, lors de la conception d'un protocole MAC, nous devons considérer de réduire au maximum les délais de réponses pour réduire l'erreur générée par la mobilité. En outre, nous avons

montré que l'erreur sur la distance était négative (resp. positive) lorsque la distance entre le nœud mobile et l'ancre augmente (diminue). Cette observation est intéressante car elle pourrait être utile pour réduire l'erreur. En effet, un nœud peut savoir s'il se rapproche ou pas d'une ancre en regardant son historique de distances estimées. Ainsi, en appliquant un modèle d'erreur (par exemple obtenue empiriquement) sur la distance estimée, nous pouvons améliorer la précision de l'estimation.

Nous avons ensuite étendu cette étude pour quantifier statistiquement l'erreur sur la distance générée par la mobilité des nœuds et le canal WBAN. Pour cette étude, nous avons considéré un scénario de navigation en groupe réaliste pour évaluer l'erreur sur différents types de liens : on-body, body-to-body et off-body. La distance a été estimée avec 3-WR entre les nœuds sur les personnes du groupe et les ancres placées dans l'infrastructure. D'abord, nous avons analysé l'effet de la mobilité sur les différents liens en utilisant A&B et nous avons montré que l'erreur des liens on-body était négligeable comparé à l'erreur des liens off-body et body-to-body. A partir de ces résultats, nous avons quantifié l'erreur de manière empirique et nous avons observé que l'erreur de la mobilité suivait une distribution gaussienne pour les trois liens. Enfin, pour compléter notre étude, nous avons comparé l'erreur de la mobilité avec l'erreur générée par le canal (à partir du modèle statistique [Hamie 13c]). Les résultats ont montré que l'erreur générée par le canal avait des variations plus rapides et était plus importante (par un facteur de 10) que l'erreur de mobilité pour tous les liens. En revanche, l'erreur de la mobilité varie entre 0,5 à 10 cm, ce qui n'est pas négligeable, notamment pour la capture du mouvement. Ces résultats sont importants car dans une approche de localisation coopérative multi-WBAN, ces erreurs peuvent avoir un impact important sur la position. En effet, comme nous l'avons montré dans l'étude précédente, les erreurs cumulées sur la distance génèrent une erreur supérieure sur la position estimée. Par conséquent, cela a un impact sur la conception du protocole MAC pour réduire les délais de réponse 3-WR, mais aussi sur l'algorithme de localisation pour améliorer la précision des positions estimées.

### 7.1.4 Réduction de l'erreur d'estimation de la distance et des positions

Nos contributions pour réduire l'erreur générée par la mobilité et le canal sont exposées dans le chapitre 5. Pour cela, nous avons proposé trois approches pour améliorer la précision du positionnement. Au niveau de la couche MAC, nous avons traité l'erreur générée par la mobilité avec différentes stratégies d'ordonnancement et une nouvelle politique d'allocation de slots en fonction de la mobilité des nœuds. Au niveau de la couche application, nous avons considéré les deux erreurs observées (mobilité et canal) sur l'estimation de la distance pour corriger la prédiction des positions estimées avec un filtre de Kalman.

Dans la première approche, nous avons proposé et évalué différents schémas d'ordonnancement des paquets 3-WR conçus pour réduire les délais de réponse et améliorer la précision du positionnement. Dans cette étude, la position était estimée par TDOA. Comme la position des nœuds varie au cours de la trame, nous avons considéré trois positions de référence à estimer : au début, au cours et à la fin de la trame. Pour cela, nous avons d'abord traité le cas d'un nœud (placé sur le poignet) avec quatre ancres (placées sur le corps) en utilisant deux modèles de mobilité : un modèle linéaire et un modèle réaliste basé sur le scénario du Yoga. Nos résultats ont montré une meilleure précision sur l'estimation de la position avec une stratégie qui estime les distances plus

proches de la position de référence à estimer, même lorsque ces distances sont moins précises. Contrairement à l'approche classique où il est alloué trois périodes pour la transmission de chaque type de paquet (sans gérer les délais de réponse), la meilleure stratégie proposée envoyait toutes les requêtes en premier puis chaque ancre répondait consécutivement avec les deux réponses. Grâce à ces résultats, nous avons ensuite évalué le cas de positionnement de plusieurs nœuds avec trois stratégies basées sur le même principe (transmission des requêtes au début). Pour cette étude, nous avons considéré uniquement le scénario du Yoga réaliste. Les simulations montrent deux meilleures stratégies en fonction de l'application visée. Dans le cas d'une application pour la détection de postures, il vaut mieux utiliser une stratégie où les ancres répondent une par une à tous les nœuds (S5 - BS5) et le calcul des positions se fait à la fin de la trame. Alors que dans le cas d'une application de capture de mouvement, la stratégie qui permet d'estimer la position de nœuds individuellement (S7 - BS7) est plus adaptée. Comme nous cherchons à réaliser la capture de mouvement avec la meilleure précision possible, nous avons continué nos études avec S7 et BS7, nommées dans ce travail de thèse comme P2P et P2P-B.

La deuxième approche consistait à réduire l'erreur de mobilité sur le positionnement avec un nouveau mécanisme pour gérer l'attribution de slots en fonction du niveau de mobilité des nœuds (haut, modéré et bas). Pour cela, nous avons testé différents schémas d'attribution de slots avec deux stratégies d'ordonnement (P2P-B et A&B). La position était ensuite estimée par TDOA et comparée avec les mêmes positions de référence de notre étude précédente. D'abord, nous avons évalué nos schémas avec le scénario de Yoga. Lors de l'utilisation de P2P-B, nous avons observé que l'allocation de slots avait un impact en fonction de la position estimée. En effet, nous avons montré que l'estimation des positions au début (resp. à la fin) de la trame était plus précise avec une allocation de slots aux nœuds les plus mobiles au début (resp. à la fin) de la trame. Alors que pour l'estimation des positions instantanées, l'allocation de slots n'avait pas d'impact et l'estimation de cette position était la plus précise. Dans le cas de A&B, l'impact sur la précision entre les différents schémas d'allocation était très faible. De plus, nous avons montré que l'estimation des positions au début de la trame était plus précise que les autres, grâce au délai réduit pour la première réponse. Ceci montre que A&B permet d'avoir une certaine flexibilité pour l'allocation de slots indépendamment du niveau de mobilité des nœuds. Pour compléter cette étude, nous avons comparé P2P-B et A&B avec les meilleur et pire cas d'utilisation des schémas d'allocation dans le cas d'un scénario de marche. Ainsi, nous pouvons conclure que dans le cas d'un scénario avec mobilité réduite (cas du Yoga), la différence de précision avec nos deux stratégies est faible. Par conséquent, P2P-B peut avoir un avantage lorsque la transmission avec A&B soit difficile. A l'inverse, dans le cas d'un scénario dynamique (cas de la marche), A&B permet d'estimer les positions au début de la trame avec plus de précision et ceci avec toutes les schémas d'allocation de slots proposés.

Pour finir ce chapitre, la troisième approche a permis d'optimiser l'algorithme de positionnement au niveau de la couche application. Pour cette étude, nous avons considéré le cas de la navigation en groupe (de trois personnes) pour faire du positionnement coopératif avec tous les liens (on-/body-to-/off- body) en utilisant A&B. Notre contribution consistait à faire un ajustement au niveau de l'estimation des positions avec un filtre de Kalman étendu. Contrairement aux approches classiques qui considèrent uniquement le

bruit du canal pour réduire l'erreur, nous avons pris en compte l'erreur de la mobilité et du canal dans la matrice de covariance du bruit observé sur les distances estimées. Pour cela, nous avons utilisé nos résultats du chapitre 4.4 où l'on montrait que les erreurs d'estimation de distance pouvaient être modélisées avec une distribution gaussienne pour tous les liens. Nos résultats montrent que pour les trois personnes observées, l'estimation des positions était plus précise avec un gain de 9% à 11%. Avec ces résultats, on montre l'intérêt de prendre en compte l'erreur générée par la mobilité au niveau de la couche MAC et de la couche application pour améliorer la précision de positions.

### 7.1.5 Amélioration du protocole de localisation avec une approche coopérative inter-couche

Pour compléter nos études de ce travail de thèse, le chapitre 6 était consacré l'évaluation de la performance de localisation des nœuds en considérant un canal avec pertes, pour ensuite proposer un algorithme coopératif pour augmenter le taux de succès de positionnement des nœuds WBAN. Le but était de maximiser le nombre de distances à estimer indépendamment de la méthode de calcul des positions. Pour cela, la distance était estimée par 3-WR avec trois stratégies d'ordonnancement différentes (P2P, P2P-B et A&B). Dans cette étude, nous avons considéré le cas d'un scénario de marche réaliste avec trois modèles de canal : i) un modèle empirique basé sur l'affaiblissement de propagation défini par le standard CM3 ([Yazdandoost 09]), ii) un modèle simulé par ray tracing avec PyLayers et iii) un modèle expérimental basé sur nos mesures expérimentales obtenues avec Hikob. L'étude préliminaire nous a permis de quantifier par simulation le taux de succès de positionnement de nœuds avec les trois stratégies et les trois canaux. Nous avons ainsi observé que le shadowing du corps était la cause principale de perte du positionnement et les nœuds placés sur les extrémités du corps étaient les plus affectés. En outre, nous avons montré que A&B était la stratégie la plus performante. Cependant, cette performance était réduite considérablement à partir d'un seuil où la perte des paquets réponse en broadcast devient importante. Dans ces conditions, P2P-B montrait une meilleure performance. Ces deux approches combinées pourraient être utiles pour augmenter le nombre de positions estimées lorsque le canal n'est pas trop bruité ou basculer vers une stratégie "best-effort" lorsque le canal présente plus de pertes.

Nous avons ensuite évalué notre algorithme coopératif pour améliorer le taux de positionnement avec les autres nœuds mobiles (considérés comme des ancres virtuelles). Pour cela, notre algorithme était découpé en deux phases pour analyser différents LQEs à court et long terme. Dans la première phase (dédiée à l'analyse du long terme), nous avons évalué le taux de succès de positionnement des nœuds pour identifier ceux ayant la pire performance. Puis, nous avons évalué le taux de succès d'estimation de distances avec les ancres pour identifier les ancres susceptibles d'être remplacées. La deuxième phase était consacrée à l'analyse à court terme. Pour cela, les nœuds devaient analyser le taux de réception de paquets avec les autres nœuds mobiles pour identifier ceux qui pouvaient devenir des ancres virtuelles. De ces analyses, nous avons observé que même si un nœud est capable d'estimer sa distance parfaitement avec différentes ancres, il suffit d'une seule mauvaise ancre pour que son taux de positionnement soit faible. De plus, le nombre d'ancres à remplacer varie en fonction de la position du nœud sur le corps et le nombre d'ancres virtuelles disponible peut être limité. En nous inspirant de ces résultats, nous avons proposé un algorithme de permutation conditionnelle qui calcule les

meilleures stratégies pour le choix d’ancres pour chaque nœud. Nous avons ainsi analysé deux approches de permutation par la théorie. La première approche utilisait la meilleure stratégie possible. Pour cela, c’étaient les nœuds mobiles avec la pire performance qui choisissaient leurs ancres virtuelles en premier, en évitant que deux nœuds puissent être ancres mutuellement. Cette approche a permis d’augmenter le taux de succès de positionnement pour tous les nœuds, notamment pour ceux avec le pire positionnement. Cependant, les stratégies de permutation trouvées avec cette approche n’étaient pas très réalistes du point de la MAC car l’ordonnement des ancres virtuelles dans la trame n’était pas possible. Pour résoudre ce problème, la deuxième stratégie de permutation était basée sur une amélioration (pour réduire les erreurs statistiques sur le calcul du taux de positionnement) et une contrainte (pour que les nœuds choisissent uniquement les nœuds avec le meilleur taux de positionnement). Le taux de succès de positionnement était plus réaliste avec cette approche et dans certaines situations le résultat était meilleur que dans la première approche. De plus, le choix des ancres virtuelles communes entre les nœuds avait augmenté, ce qui montrait un ordonnancement cohérent au niveau de la MAC avec une latence relativement acceptable (en fonction de la stratégie utilisée (A&B et P2P-B)). Avec ces résultats, on montre l’intérêt de la coopération pour augmenter le taux de succès de positionnement. Cependant, il reste à évaluer le compromis adjacent avec la latence liée à la coopération et l’erreur de positionnement qui pourrait s’ajouter. De plus, nous avons montré que le choix d’ancre ne doit pas être basé sur la meilleure stratégie de permutation, mais plutôt avec une stratégie cohérente pour le système.

## 7.2 Perspectives

En trois ans, nous avons réussi à donner les bases pour l’étude de la capture du mouvement avec UWB. De plus, nous avons mis en place un co-simulateur capable d’exploiter des traces réalistes avec différents scénarios de mobilité individuel et en groupe. Cependant, ce simulateur reste très générique, ce qui permet d’ajouter des nouvelles fonctionnalités pour l’étude des WBANs. De plus, un certain nombre de questions restent encore ouvertes sur le plan scientifique de cette thèse, notamment sur nos études sur la coopération du chapitre 6.

### 7.2.1 Développement d’un co-simulateur en temps réel

L’idée est de permettre de faire une approche *maître-slave* entre WSNET et PyLayers pour réduire la taille des bases de données fourni pour PyLayers et se concentrer sur le jeu de données demandé pour un scénario défini au départ par WSNET. Même si on peut viser une réalisation dans le deux sens (PyLayers en maître et WSNet en esclave), il est préférable de permettre à WSNET d’être le maître du co-simulateur et laisser PyLayers calculer l’état du canal des liens utilisés pendant la simulation avec WSNet. Ceci pourra accélérer le processus de calcul et la réduction de l’espace de mémoire utilisé, spécialement pour PyLayers qui prend beaucoup de temps de calcul pour l’approche base de données.

### 7.2.2 Impact de l’erreur sur le temps d’arrivée

Une des hypothèses clés de ce travail a été de considérer un canal parfait pendant la transmission des paquets du protocole 3-WR. Cette hypothèse est vraie et nécessaire si l’on veut isoler l’impact de la mobilité des nœuds WBAN sur l’estimation de distances

avec UWB. Dans cette thèse, nous avons calculé avec WSNNet le temps d'arrivée en fonction du temps de propagation des impulsions sans pertes liées ni interférences au canal et avec une synchronisation parfaite. Ainsi, on est capable d'identifier et quantifier l'erreur liée à la mobilité des nœuds tel qu'expliqué dans le chapitre 4. Dans ce même chapitre, nous avons montré avec un modèle statistique que l'erreur sur la distance liée au canal est plus importante que l'erreur liée à la mobilité du corps. Ceci peut être rassurant dans le sens qu'on peut simplifier les techniques de traitement et d'estimation pour le positionnement du corps. De plus, on a montré que la prise en compte de ces erreurs pour le calcul des positions peut améliorer la précision des estimations avec un filtre de Kalman. Cependant, pour que cela marche, le modèle du bruit observé doit suivre une distribution gaussienne. Or, le canal WBAN est très dynamique et la homogénéité de l'erreur sur le temps d'arrivée n'a pas été encore étudié complètement pour tous les liens. Cela pourrait avoir un impact sur les estimation si l'erreur du ToA n'est pas gaussienne. Donc, il pourrait être intéressant de répéter cette même étude avec un canal plus réaliste et avec des capteurs non synchronisés.

### 7.2.3 Modélisation des interférences et coexistence multi-WBAN

Un autre problème à prendre compte avec les réseaux WBAN basés sur un système radio est la prise en compte d'interférences. Dans notre travail, nous n'avons pas considéré cette problématique. Nous avons supposé que l'interférence inter-symbole était réduite en considérant une durée de symbole grande ([IEEEStd802.15.6 12] IR-UWB en mode par défaut). De plus, la communication entre les nœuds était faite avec une trame basée sur le TDMA et donc, on n'avait pas de l'interférence inter-utilisateur. Mais dans la réalité, il est impérative de modéliser et traiter les différentes interférences qui pourraient gêner la localisation que ça soit avec du UWB ou NB. Dans le cas d'une application multi-WBAN, il faudra veiller à que chaque groupe de WBANs utilise son propre canal pour communiquer. On pourrait imaginer l'utilisation d'une approche multi-band OFDM (en anglais *orthogonal frequency-division multiplexing*) en UWB [Balakrishnan 03]. Pour cela, il est possible de modéliser ce problème en PyLayers en fonction du scénario à traiter : multi-BAN, couche MAC utilisée (TDMA ou CSMA).

### 7.2.4 Communication coopérative pour la localisation multi-WBANs

Un aspect que nous n'avons pas abordé dans cette thèse est la coopération au niveau réseau, par exemple en utilisant un tableau de routage ou des adresses. Au niveau d'un WBAN, la couche réseau n'a pas trop d'impact, car l'on considère que les nœuds peuvent communiquer par un saut et la communication peut être gérée facilement par la couche MAC et PHY. Cependant, dans le cas de plusieurs WBANs, le nombre de sauts peut augmenter en fonction de la distance entre les personnes et des obstructions dans l'environnement. Dans ce cas, il pourrait être intéressant de trouver la route la plus courte pour atteindre les ancres pour se localiser. Cette approche ajoute une question supplémentaire du point vu algorithmique pour la localisation et du point vu communication pour l'ordonnancement. En effet, dans ce contexte, un WBAN trop éloigné des ancres, devra atteindre à que d'autres WBANs plus proches se positionnent pour ensuite considérer ces WBANs comme des *ancres virtuelles*. Or, nous avons vu que la mobilité des nœuds avait un impact sur tous les liens (on-/ body-to-/ off-body). Par conséquent, la latence ajoutée par la coopération pourrait ajouter des délais

## Chapitre 7. Conclusion et perspectives

---

supplémentaires sur les estimations de distances et donc, sur la position également. Dans ce contexte, il serait intéressant de évaluer notre algorithme coopératif pour le choix des ancres virtuelles et le comparer avec d'autres approches de coopération multi-WBAN.

# Bibliographie

- [Aggarwal 11] J.K. Aggarwal. *Motion Analysis : Past, Present and Future*. In Bir Bhanu, China V. Ravishankar, Amit K. Roy-Chowdhury, Hamid Aghajan & Demetri Terzopoulos, éditeurs, Distributed Video Sensor Networks, pages 27–39. Springer London, 2011. (p. 19)
- [Aghayi 14] E. Aghayi, M. Khansari & H. Memarzadeh-Tehran. *A new back-off mechanism for the S-MAC protocol with applications in healthcare*. In Telecommunications (IST), 2014 7th International Symposium on, pages 569–573, Sept 2014. (p. 49)
- [Akyildiz 02] I.F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam & E. Cayirci. *A survey on sensor networks*. Communications Magazine, IEEE, vol. 40, no. 8, pages 102–114, Aug 2002. (p. 4)
- [Alam 14] M.M. Alam & E. Ben Hamida. *Towards accurate mobility and radio link modeling for IEEE 802.15.6 wearable body sensor networks*. In Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2014 IEEE 10th International Conference on, pages 298–305, Oct 2014. (p. 78)
- [Alasti 14] M. Alasti, M. Barbi & K. Sayrafian. *Uncoordinated strategies for inter-BAN interference mitigation*. In 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), pages 2150–2154, Sept 2014. (p. 49)
- [Aldeer 13] M.M.N. Aldeer. *A summary survey on recent applications of wireless sensor networks*. In Research and Development (SCO-ReD), 2013 IEEE Student Conference on, pages 485–490, Dec 2013. (p. 4)
- [Aloui 11] S. Aloui, C. Villien & S. Lesecq. *A framework for motion capture system design using Cramer-Rao lower bound*. In Communications, Computers and Signal Processing (PacRim), 2011 IEEE Pacific Rim Conference on, pages 79–84, Aug 2011. (p. 22)
- [Amiot 13] N. Amiot, M. Laaraiedh & B. Uguen. *PyLayers : An open source dynamic simulator for indoor propagation and localization*. In Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on, pages 84–88, June 2013. (p. 47, 63, 168)
- [Andreadis 10] A. Andreadis, A. Hemery, A. Antonakakis, G. Gourdoglou, P. Mauridis, D. Christopoulos & J.N. Karigiannis. *Real-Time*

- [Ascension 15] *Motion Capture Technology on a Live Theatrical Performance with Computer Generated Scenery*. In Informatics (PCI), 2010 14th Panhellenic Conference on, pages 148–152, Sept 2010. (p. 22)  
Ascension. <http://www.ascension-tech.com/>, last accessed September 2015. (p. 22)
- [Baccour 09] N. Baccour, A. Koubaa, M. Ben Jamaa, H. Youssef, M. Zuniga & M. Alves. *A comparative simulation study of link quality estimators in wireless sensor networks*. In Modeling, Analysis Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2009. MASCOTS '09. IEEE International Symposium on, pages 1–10, Sept 2009. (p. 134)
- [Bachir 10] A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne & K.K. Leung. *MAC Essentials for Wireless Sensor Networks*. Communications Surveys Tutorials, IEEE, vol. 12, no. 2, pages 222–248, Second 2010. (p. 102)
- [Balakrishnan 03] J. Balakrishnan, A. Batra & A. Dabak. *A multi-band OFDM system for UWB communication*. In Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on, pages 354–358, Nov 2003. (p. 175)
- [BANET 10] BANET. *Body Area Networks and Technologies*. [Online]. Available : [http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx1wmsuivibilan\\_pi2\[CODE\]=ANR-07-TCOM-0003](http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx1wmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-07-TCOM-0003) [Accessed February 2016], 2007-2010. (p. 30)
- [Batabyal 15] S. Batabyal & P. Bhaumik. *Mobility Models, Traces and Impact of Mobility on Opportunistic Routing Algorithms : A Survey*. IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 17, no. 3, pages 1679–1707, thirdquarter 2015. (p. 47)
- [Ben Hamida 10] E. Ben Hamida, M. Maman, B. Denis & L. Ouvry. *Localization performance in Wireless Body Sensor Networks with beacon enabled MAC and space-time dependent channel model*. In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on, pages 128–133, Sept 2010. (p. 36, 92, 102, 107, 122, 134)
- [Ben Hamida 14] E. Ben Hamida, M.M. Alam, M. Maman & B. Denis. *Short-term link quality estimation for Opportunistic and Mobility Aware Routing in wearable body sensors networks*. In Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2014 IEEE 10th International Conference on, pages 519–526, Oct 2014. (p. 114, 115, 134)
- [Bensky 00] Alan Bensky. *Short-range wireless communication : Fundamentals of rf system design and application with cdrom*. L L H Technology Publishing, 2000. (p. 23)
- [Bensky 07] Alan Bensky. *Wireless positioning technologies and applications*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA, 2007. (p. xiii, 10, 23)

- [Bharadwaj 14] R. Bharadwaj, S. Swaisaenyakorn, C.G. Parini, J. Batchelor & A. Alomainy. *Localization of Wearable Ultrawideband Antennas for Motion Capture Applications*. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 13, pages 507–510, 2014. (p. 92)
- [Blankenbach 10] Jorg Blankenbach & Abdelmoumen Norrdine. *Position estimation using artificial generated magnetic fields*. 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sep 2010. (p. 22)
- [Bloch 11] F. Bloch, V. Gautier, N. Noury, J.-E. Lundy, J. Poujaud, Y.-E. Claessens & A.-S. Rigaud. *Evaluation under real-life conditions of a stand-alone fall detector for the elderly subjects*. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 54, no. 6, pages 391 – 398, 2011. (p. 23)
- [Boulic ] Ronan Boulic, Nadia Magnenat Thalmann & Daniel Thalmann. *A global human walking model with real-time kinematic personification*. *The Visual Computer*, vol. 6, no. 6, pages 344–358. (p. 48)
- [BoWI 15] BoWI. *Body World Interaction*. "[Online]. Available : <http://www.bowi.cominlabs.ueb.eu/> [Accessed February 2016]", 2012-2015. (p. 30, 32)
- [Brands 94] Stefan Brands & David Chaum. *Distance-bounding Protocols*. In *Workshop on the Theory and Application of Cryptographic Techniques on Advances in Cryptology, EUROCRYPT '93*, pages 344–359, Secaucus, NJ, USA, 1994. Springer-Verlag New York, Inc. (p. 34)
- [Brown 99] Kevin Brown. *Reflections on Relativity*, 1999. (p. 19, 84)
- [BusinessInsider 15] BusinessInsider. *THE INTERNET OF THINGS 2015 REPORT : Examining how the IoT will affect the world*, last accessed November 2015. (p. 2)
- [BUTLER 14] BUTLER. *uBiquitous, secUre inTernet-of-things with Location and contExt-awaReness*, 2014. (p. 2)
- [C3D ] C3D. <http://www.c3d.org/>. (p. 48)
- [Cappozzo 05] Aurelio Cappozzo, Ugo Della Croce, Alberto Leardini & Lorenzo Chiari. *Human movement analysis using stereophotogrammetry. Gait & Posture*, vol. 21, no. 2, pages 186–196, Feb 2005. (p. 21)
- [Cavallari 14] Riccardo Cavallari, Flavia Martelli, Ramona Rosini, Chiara Burratti & Roberto Verdone. *A Survey on Wireless Body Area Networks : Technologies and Design Challenges*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pages 1635–1657, 2014. (p. xiii, 4, 11, 29)
- [Chelius 15] G. Chelius, A. Fraboulet & E. Ben Hamida. <http://ws-net.gforge.inria.fr/>, last accessed September 2015. (p. 49, 80)

## Bibliographie

---

- [Chen 09] Yifan Chen, Jianqi Teo, Joshua C. Y. Lai, Erry Gunawan, Kay Soon Low, Cheong Boon Soh & Predrag B. Rapajic. *Cooperative Communications in Ultra-Wideband Wireless Body Area Networks : Channel Modeling and System Diversity Analysis*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 27, no. 1, pages 5–16, 2009. (p. 9)
- [Chen 11] Min Chen, Sergio Gonzalez, Athanasios Vasilakos, Huasong Cao & Victor C. Leung. *Body Area Networks : A Survey*. Mob. Netw. Appl., vol. 16, no. 2, pages 171–193, April 2011. (p. xiii, 4, 5, 6)
- [Chevalier 15] L. Chevalier, S. Sahuguède & A. Julien-Vergonjanne. *Wireless Optical technology based Body Area Network for health monitoring application*. In 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), pages 2863–2868, June 2015. (p. 22)
- [Chong 06] Chia-Chin Chong, F. Watanabe & H. Inamura. *Potential of UWB Technology for the Next Generation Wireless Communications*. In Spread Spectrum Techniques and Applications, 2006 IEEE Ninth International Symposium on, pages 422–429, Aug 2006. (p. 10)
- [Chóliz 11] Juan Chóliz, Ángela Hernández & Antonio Valdovinos. *A Framework for UWB-Based Communication and Location Tracking Systems for Wireless Sensor Networks*. Sensors, vol. 11, no. 9, page 9045, 2011. (p. 78, 79, 92)
- [CORMORAN 16] Deliverables CORMORAN. [Online]. "<http://pylayers.github.io/pylayers/cormoran.html>", last accessed April 2016. (p. xxvi, xxvii, 66, 68)
- [Cotton 09a] S. L. Cotton, G. A. Conway & W. G. Scanlon. *A Time-Domain Approach to the Analysis and Modeling of On-Body Propagation Characteristics Using Synchronized Measurements at 2.45 GHz*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, no. 4, pages 943–955, April 2009. (p. 46)
- [Cotton 09b] S. L. Cotton, W. G. Scanlon & B. K. Madahar. *Millimeter-wave soldier-to-soldier communications for covert battlefield operations*. IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 10, pages 72–81, October 2009. (p. 48)
- [Cotton 10] S. L. Cotton, W. G. Scanlon & B. K. Madahar. *Simulation of millimetre-wave channels for short-range body to body communications*. In Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, pages 1–5, April 2010. (p. 48)
- [Cotton 14a] Simon Cotton, Raffaele D’Errico & Claude Oestges. *A review of radio channel models for bodycentric communications*. Radio Science, vol. 49, no. 6, pages 371–388, 2014. (p. 45, 47)
- [Cotton 14b] S.L. Cotton, R. D’Errico & C. Oestges. *A review of radio channel models for body centric communications*. Radio Science, vol. 49, no. 6, pages 371–388, 6 2014. (p. 44)

- [Denis 05] B. Denis, L. Ouvry, B. Uguen & F. Tchoffo-Talom. *Advanced Bayesian filtering techniques for UWB tracking systems in indoor environments*. In Ultra-Wideband, 2005. ICU 2005. 2005 IEEE International Conference on, pages 6 pp.–, Sept 2005. (p. 124, 126)
- [Denis 09] B. Denis, M. Maman & L. Ouvry. *On the scheduling of ranging and distributed positioning updates in cooperative IR-UWB networks*. In Ultra-Wideband, 2009. ICUWB 2009. IEEE International Conference on, pages 370–375, Sept 2009. (p. 14, 41, 102)
- [Denis 14] B. Denis, N. Amiot, B. Uguen, A. Guizar, C. Goursaud, A. Ouni & C. Chaudet. *Qualitative analysis of RSSI behavior in cooperative wireless body area networks for mobility detection and navigation applications*. In Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 2014 21st IEEE International Conference on, pages 834–837, Dec 2014. (p. xxv, 116, 136, 139, 166)
- [D’Errico 09] R. D’Errico & L. Ouvry. *Time-variant BAN channel characterization*. In 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pages 3000–3004, Sept 2009. (p. 13, 46, 47, 66, 168)
- [D’Errico 10a] R. D’Errico & L. Ouvry. *Delay dispersion of the on-body dynamic channel*. In Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, pages 1–5, April 2010. (p. 46)
- [D’Errico 10b] Raffaele D’Errico & Laurent Ouvry. *A Statistical Model for On-Body Dynamic Channels*. International Journal of Wireless Information Networks, vol. 17, no. 3, pages 92–104, 2010. (p. 46)
- [Di Benedetto 04] Maria-Gabriella Di Benedetto & Guerino Giancola. *Understanding ultra wide band radio fundamentals*. Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River (N.J.), 2004. (p. 38, 84)
- [Didioui 13] A. Didioui, C. Bernier, D. Morche & O. Sentieys. *HarvWSNet : A co-simulation framework for energy harvesting wireless sensor networks*. In Computing, Networking and Communications (ICNC), 2013 International Conference on, pages 808–812, Jan 2013. (p. 50, 73)
- [Dieng 14] N’deye Amy Dieng, Claude Chaudet, Laurent Toutain, Tayeb Ben Meriem & Maurice Charbit. *No-calibration localisation for indoor wireless sensor networks*. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, vol. 15, no. 1-3, pages 200–214, 2014. (p. 123)
- [Dohler 10] Mischa Dohler & Yonghui Li. *Cooperative communications : hardware, channel & PHY*. Wiley, Chichester, West Sussex, U.K., Hoboken, NJ, 2010. (p. 9, 39)

## Bibliographie

---

- [Dong 12a] J. Dong & D. Smith. *Cooperative body-area-communications : Enhancing coexistence without coordination between networks*. In 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC), pages 2269–2274, Sept 2012. (p. 49)
- [Dong 12b] Jie Dong & David B. Smith. *Opportunistic Relaying in Wireless Body Area Networks : Coexistence Performance*. CoRR, vol. abs/1212.4489, 2012. (p. 9)
- [Fang 05] Lei Fang, P.J. Antsaklis, L.A. Montestruque, M.B. McMickell, M. Lemmon, Yashan Sun, Hui Fang, I. Koutroulis, M. Haenggi, Min Xie & Xiaojuan Xie. *Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system - the NavMote experience*. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 54, no. 6, pages 2342–2358, Dec 2005. (p. 22)
- [Ferrand 11] Paul Ferrand, Mickael Maman, Claire Goursaud, Jean-Marie Gorce & Laurent Ouvry. *Performance evaluation of direct and cooperative transmissions in body area networks*. annals of telecommunications - annales des télécommunications, vol. 66, no. 3, pages 213–228, 2011. (p. 29)
- [Fischer 10] D. Fischer, K. Herrmann & K. Rothermel. *GeSoMo : A general social mobility model for delay tolerant networks*. In The 7th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2010), pages 99–108, Nov 2010. (p. 47)
- [Fort 06] A. Fort, J. Ryckaert, C. Desset, P. De Doncker, P. Wambacq & L. Van Biesen. *Ultra-wideband channel model for communication around the human body*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 4, pages 927–933, April 2006. (p. 45, 46)
- [Fortunato 10] Santo Fortunato. *Community detection in graphs*. Physics Reports, vol. 486, no. 3–5, pages 75 – 174, 2010. (p. 47)
- [Foxlin 05] E. Foxlin. *Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors*. Computer Graphics and Applications, IEEE, vol. 25, no. 6, pages 38–46, Nov 2005. (p. 23)
- [Garcia 13] G.E. Garcia, L.S. Muppirisetty & H. Wymeersch. *On the Trade-off Between Accuracy and Delay in UWB Navigation*. Communications Letters, IEEE, vol. 17, no. 1, pages 39–42, January 2013. (p. 41, 102)
- [Gezici 05] S. Gezici, Zhi Tian, G.B. Giannakis, Hisashi Kobayashi, A.F. Molisch, H.V. Poor & Z. Sahinoglu. *Localization via ultra-wideband radios : a look at positioning aspects for future sensor networks*. Signal Processing Magazine, IEEE, vol. 22, no. 4, pages 70–84, July 2005. (p. 29)
- [Ghannoum 06] H. Ghannoum, R. D’Errico, C. Roblin & X. Begaud. *Characterization of the UWB on-body propagation channel*. In 2006 First

- European Conference on Antennas and Propagation, pages 1–6, Nov 2006. (p. 45)
- [Gorce 09] Jean-Marie Gorce, Claire Goursaud, Christophe Savigny, Guillaume Villemaud, Raffaele D’Errico, Francois Dehmas, Mickael Maman, Laurent Ouvry, Benoit Miscopain & Jean Schworer. *Cooperation mechanisms in BANs*. In COST 2100, 9th management meeting, Valencia, Spain, May 2009. COST 2100. (p. 9)
- [Gouillon 13] Gaël Gouillon & Cédric Duchene. *Localisation de cavités souterraines avec le système UGPS. Applications au cas des crayères de la marne et à une ancienne mine polymétallique*. In Journées scientifiques AGAP Qualité 2013, page NC, Nancy, France, October 2013. (p. 27)
- [Guizar 14a] Arturo Guizar, Anis Ouni & Claire Goursaud. *Impact of Mobility on Ranging Estimation using UltraWideband*. In ACM SIGCOMM 2014 conference, pages 1–2, Chicago, United States, August 2014. (p. xxv, 79, 166)
- [Guizar 14b] Arturo Guizar, Anis Ouni, Claire Goursaud, Nicolas Amiot & Jean-Marie Gorce. *Impact of MAC Scheduling on Positioning Accuracy for Motion Capture with Ultra Wideband Body Area Networks*. In Proceedings of the 9th International Conference on Body Area Networks, BodyNets ’14, pages 365–371, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2014. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). (p. xxv, 103, 166)
- [Guizar 15a] A. Guizar, A. Ouni, C. Goursaud, C. Chaudet & J.M. Gorce. *Quantifying the impact of scheduling and mobility on IR-UWB localization in body area networks*. In Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), 2015 IEEE 12th International Conference on, pages 1–6, June 2015. (p. xxv, 115, 166)
- [Guizar 15b] Arturo Guizar, Claire Goursaud & Jean-Marie Gorce. *Modeling the impact of node speed on the ranging estimation with UWB body area networks*. In Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on, pages 1250–1254, Aug 2015. (p. xxv, 82, 166)
- [Guizar 15c] Arturo Guizar, Claire Goursaud & Jean-Marie Gorce. *Modélisation de l’impact de la vitesse des noeuds sur l’estimation des distances dans les Réseaux Corporels sans fils avec ULB*. In XXVe colloque Gretsi, Lyon, France, September 2015. (p. xxvi, 166)
- [Guizar 15d] Arturo Guizar, Claire Goursaud & Bernard Uguen. *Impact of on-body channel models on positioning success rate with UWB Wireless Body Area Networks*. In 10th EAI International Conference on Body Area Networks, Sydney, Australia, September 2015. (p. xxv, 136, 166)

## Bibliographie

---

- [Guizar 15e] Arturo Guizar, Anis Ouni, Claire Goursaud & Jean-Marie Gorce. *Scheduling proposal for better localization of mobile nodes in Wireless Body Area Networks with UWB*. In ALGOTEL 2015 - 17èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications, Beaune, France, June 2015. (p. xxvi, 115, 166)
- [Guizar 16a] Arturo Guizar, Claire Goursaud & Jean-Marie Gorce. *Performance of IR-UWB cross-layer ranging protocols under on-body channel models with body area networks*. Annals of Telecommunications, pages 1–11, 2016. (p. xxv, 142, 146, 166)
- [Guizar 16b] Arturo Guizar, Claire Goursaud & Jean-Marie Gorce. *Stratégies de protocoles inter-couche pour la localisation coopérative améliorée avec WBAN avec prise en compte d'un canal réaliste*. In ALGOTEL 2016, 18èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications, Bayonne, France, May 2016. (p. xxvi, 146, 166)
- [Gypsy 15] Gypsy. <http://www.metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm>, last accessed September 2015. (p. 28)
- [Hall 02] P. S. Hall, M. Ricci & T. M. Hee. *Measurements of on-body propagation characteristics*. In Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE, volume 2, pages 310–313 vol.2, 2002. (p. 45)
- [Hamida 11] E.B. Hamida, R. D'Errico & B. Denis. *Topology Dynamics and Network Architecture Performance in Wireless Body Sensor Networks*. In New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2011 4th IFIP International Conference on, pages 1–6, Feb 2011. (p. 46, 135)
- [Hamie 13a] J. Hamie, B. Denis & C. Richard. *Joint motion capture and navigation in heterogeneous Body Area Networks with distance estimation over neighborhood graph*. In Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2013 10th Workshop on, pages 1–6, March 2013. (p. 44, 123, 126)
- [Hamie 13b] Jihad Hamie. *Contributions to cooperative localization techniques within mobile wireless body area networks*. Theses, Université Nice Sophia Antipolis, November 2013. (p. 14, 29, 46, 74, 79, 102, 107, 123)
- [Hamie 13c] Jihad Hamie, Benoit Denis, Raffaele D'Errico & Cedric Richard. *On-body TOA-based ranging error model for motion capture applications within wearable UWB networks*. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, December 2013. (p. 34, 35, 44, 47, 66, 72, 78, 92, 97, 102, 124, 128, 135, 169, 171)
- [Hamie 14a] J. Hamie, B. Denis & M. Maman. *On-body localization experiments using real IR-UWB devices*. In 2014 IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB), pages 362–367, Sept 2014. (p. 45)

- [Hamie 14b] Jihad Hamie, Claude Chaudet & Benoît Denis. *Improved Navigation Capabilities in Groups of Cooperative Wireless Body Area Networks*. In Proceedings of the 9th International Conference on Body Area Networks, BodyNets '14, pages 193–196, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2014. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). (p. 36, 103, 126, 127, 128)
- [Hamie 14c] Jihad Hamie, Benoit Denis & Cedric Richard. *Decentralized Positioning Algorithm for Relative Nodes Localization in Wireless Body Area Networks*. Mobile Networks and Applications, vol. 19, no. 6, pages 698–706, November 2014. (p. 9, 36, 100, 122)
- [Hanson 09] M.A. Hanson, H.C. Powell, A.T. Barth, K. Ringgenberg, B.H. Calhoun, J.H. Aylor & J. Lach. *Body Area Sensor Networks : Challenges and Opportunities*. Computer, vol. 42, no. 1, pages 58–65, Jan 2009. (p. 4)
- [Hao 06] Yang Hao, A. Alomainy, Yan Zhao, C. G. Parini, Y. Nechayev, P. Hall & C. C. Constantinou. *Statistical and deterministic modelling of radio propagation channels in WBAN at 2.45GHz*. In 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pages 2169–2172, July 2006. (p. 45, 46)
- [Hasan 09] M. S. Hasan, H. Yu, A. Carrington & T. C. Yang. *Co-simulation of wireless networked control systems over mobile ad hoc network using SIMULINK and OPNET*. IET Communications, vol. 3, no. 8, pages 1297–1310, August 2009. (p. 50)
- [Heaney 10] S. F. Heaney, W. G. Scanlon, E. Garcia-Palacios & S. L. Cotton. *Fading characterization for Context Aware Body Area Networks (CABAN) in interactive smart environments*. In Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2010 Loughborough, pages 501–504, Nov 2010. (p. 49)
- [Hightower 01] Jeffrey Hightower & Gaetano Borriello. *Location Systems for Ubiquitous Computing*, 2001. (p. 2)
- [HiKoB FOX ] sensor HiKoB FOX. "<http://www.hikob.com/hikob-fox>". (p. 52)
- [Hirose 12] M. Hirose, H. Yamamoto & T. Kobayashi. *Statistical modeling of on-body ultra-wideband channels considering surrounding environments*. In 2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), pages 929–933, Aug 2012. (p. 45)
- [Homepage 15a] OMNeT++ Homepage. [Online]. <http://www.omnetpp.org/>, last accessed September 2015. (p. 49)
- [Homepage 15b] OPNET Homepage. [Online]. "<http://fr.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html>", last accessed September 2015. (p. 49)
- [Idtechex 15] Idtechex. *Mobile Phone Indoor Positioning Systems (IPS) and Real Time Locating Systems (RTLS) 2014-2024*, last accessed September 2015. (p. 2, 3)

## Bibliographie

---

- [IEEEStd802.11 07] IEEEStd802.11. *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999), pages 1–1076, June 2007. (p. 23, 49)
- [IEEEStd802.15.1 05] IEEEStd802.15.1. *IEEE Standard for Information technology- Local and metropolitan area networks- Specific requirements- Part 15.1a : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN)*. IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002), pages 1–700, June 2005. (p. 23, 49)
- [IEEEStd802.15.4 06] IEEEStd802.15.4. *IEEE Standard for Information technology- Local and metropolitan area networks- Specific requirements- Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003), pages 1–320, Sept 2006. (p. 23, 52, 68, 74, 139)
- [IEEEStd802.15.4a 07] IEEEStd802.15.4a. *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006), pages 1–203, 2007. (p. 12, 23, 45, 53)
- [IEEEStd802.15.4f 12] IEEEStd802.15.4f. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks- Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 2 : Active Radio Frequency Identification (RFID) System Physical Layer (PHY)*. IEEE Std 802.15.4f-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011), pages 1–72, April 2012. (p. 23)
- [IEEEStd802.15.6 12] IEEEStd802.15.6. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6 : Wireless Body Area Networks*. IEEE Std 802.15.6-2012, pages 1–271, Feb 2012. (p. 5, 12, 23, 32, 41, 72, 74, 75, 78, 138, 169, 175)
- [Johansson 73] Gunnar Johansson. *Visual perception of biological motion and a model for its analysis*. Perception & Psychophysics, vol. 14, no. 2, pages 201–211, 1973. (p. 21)
- [Jurdak 07] R. Jurdak, A.G. Ruzzelli & G.M.P. O'Hare. *Design Considerations for Deploying Underwater Sensor Networks*. In Sensor Technologies and Applications, 2007. SensorComm 2007. International Conference on, pages 227–232, Oct 2007. (p. 22)

- [Kallmann 01] Marcelo Kallmann, Etienne de Sevin & Daniel Thalmann. Deformable avatars : Ifip tc5/wg5.10 deform'2000 workshop november 29–30, 2000 geneva, switzerland and avatars'2000 workshop november 30–december 1, 2000 lausanne, switzerland, chapitre Constructing Virtual Human Life Simulations, pages 240–247. Springer US, Boston, MA, 2001. (p. 48)
- [Kalman 60] Rudolph Emil Kalman. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, vol. 82, no. Series D, pages 35–45, 1960. (p. 125)
- [Kiss 04] Rita M Kiss, László Kocsis & Zsolt Knoll. *Joint kinematics and spatial–temporal parameters of gait measured by an ultrasound-based system*. Medical Engineering & Physics, vol. 26, no. 7, pages 611–620, 2004. (p. 22)
- [Kitagawa 08] Midori Kitagawa & Brian Windsor. *Mocap for artists : Workflow and techniques for motion capture*. Focal Press, 2008. (p. 20, 21, 22)
- [Klette 08] Reinhard Klette & Garry Tee. *Understanding Human Motion : A Historic Review*. In Bodo Rosenhahn, Reinhard Klette & Dimitris Metaxas, éditeurs, Human Motion, volume 36 of *Computational Imaging and Vision*, pages 1–22. Springer Netherlands, 2008. (p. 18, 20)
- [Knudson 07] Duane Knudson. *Fundamentals of biomechanics*. Springer US, 2007. (p. 18, 20)
- [Kohtamaki 09] T. Kohtamaki, M. Pohjola, J. Brand & L. M. Eriksson. *PiccSIM Toolchain - design, simulation and automatic implementation of wireless networked control systems*. In Networking, Sensing and Control, 2009. ICNSC '09. International Conference on, pages 49–54, March 2009. (p. 50)
- [Kong 13] Ru Kong, Cailian Chen, Wenbin Yu, Bo Yang & Xinpeng Guan. *Data priority based slot allocation for Wireless Body Area Networks*. In Wireless Communications Signal Processing (WCSP), 2013 International Conference on, pages 1–6, Oct 2013. (p. 114)
- [Kramer 06] Gerhard Kramer, Ivana Marić & Roy D. Yates. *Cooperative Communications*. Found. Trends Netw., vol. 1, no. 3, pages 271–425, August 2006. (p. 9)
- [Krizman 97] K.J. Krizman, T.E. Biedka & T.S. Rappaport. *Wireless position location : fundamentals, implementation strategies, and sources of error*. In Vehicular Technology Conference, 1997, IEEE 47th, volume 2, pages 919–923 vol.2, May 1997. (p. 10)
- [Laaraiedh 12] M. Laaraiedh, B. Uguen, J. Stephan, Y. Corre, Y. Lostanlen, M. Raspopoulos & S. Stavrou. *Ray tracing-based radio propagation modeling for indoor localization purposes*. In 2012 IEEE 17th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), pages 276–280, Sept 2012. (p. 49)

## Bibliographie

---

- [Lachartre 09] D. Lachartre, B. Denis, D. Morche, L. Ouvry, M. Pezzin, B. Piaget, J. Prouvee & P. Vincent. *A 1.1nJ/b 802.15.4a-compliant fully integrated UWB transceiver in 0.13 x00B5;m CMOS*. In 2009 IEEE International Solid-State Circuits Conference - Digest of Technical Papers, pages 312–313,313a, Feb 2009. (p. 54)
- [Laneman 04] J. Nicholas Laneman, David N. C. Tse & Gregory W. Wornell. *Cooperative diversity in wireless networks : efficient protocols and outage behavior*. IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 50, pages 3062–3080, 2004. (p. 9)
- [Latr e 11] Beno t Latr e, Bart Braem, Ingrid Moerman, Chris Blondia & Piet Demeester. *A Survey on Wireless Body Area Networks*. Wirel. Netw., vol. 17, no. 1, pages 1–18, January 2011. (p. xiii, 4)
- [Lauzier 13] M. Lauzier, P. Ferrand, A. Fraboulet, H. Parvery & J. Gorce. *Full mesh channel measurements on Body Area Networks under walking scenarios*. In Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference on, pages 3508–3512, April 2013. (p. 44, 47, 50, 52, 67, 69, 135, 139, 168)
- [Le 03] Bao Long Le, K. Ahmed & H. Tsuji. *Mobile location estimator with NLOS mitigation using Kalman filtering*. In Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE, volume 3, pages 1969–1973 vol.3, March 2003. (p. 126)
- [Lee 09] Cheolhyo Lee, Hyung-Soo Lee & Jae-Young Kim. *Performance of a one-way ranging method for WBAN healthcare services*. In Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th International Symposium on, pages 1460–1463, Sept 2009. (p. 36, 107)
- [Liddell 15] Keith Liddell. *Fastest Martial Arts Punch, Guinness World Records*, last accessed December 2015. (p. 81)
- [Liu 10] Wei Liu, Chao Hu, Qing He, Max Q.-H. Meng & Li Liu. *An hybrid localization system based on optics and magnetics*. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Dec 2010. (p. 27)
- [Liu 11a] Bin Liu, Zhisheng Yan & Chang Wen Chen. *CA-MAC : A Hybrid context-aware MAC protocol for wireless body area networks*. In e-Health Networking Applications and Services (Healthcom), 2011 13th IEEE International Conference on, pages 213–216, June 2011. (p. 114, 115)
- [Liu 11b] Lingfeng Liu, Raffaele D’Errico, Laurent Ouvry, Philippe De Doncker & Claude Oestges. *Dynamic Channel Modeling at 2.4 GHz for On-Body Area Networks*. Advances in Electronics and Telecommunications, vol. 2, no. 4, pages 18–27, 2011. (p. 46)
- [Liu 15] Zhao Liu, Jianke Zhu, Jiajun Bu & Chun Chen. *A survey of human pose estimation : The body parts parsing based methods*. Journal of Visual Communication and Image Representation, vol. 32, pages 10 – 19, 2015. (p. 18, 21)

- [Lu 11] X. Lu, X. Chen, G. Sun, D. Jin, N. Ge & L. Zeng. *UWB-based Wireless Body Area Networks channel modeling and performance evaluation*. In 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pages 1929–1934, July 2011. (p. 45)
- [Macagnano 07] Davide Macagnano, Giuseppe Destino, Flavio Esposito & Giuseppe Abreu. *MAC Performances for Localization and Tracking in Wireless Sensor Networks*. 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2007. (p. 9, 14, 34, 37, 40, 41, 74, 78, 84, 102, 107, 112, 138)
- [Mahapatro 12] J. Mahapatro, S. Misra, M. Manjunatha & N. Islam. *Interference mitigation between WBAN equipped patients*. In 2012 Ninth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pages 1–5, Sept 2012. (p. 49)
- [Maman 08a] M. Maman, B. Denis & L. Ouvry. *An intuitive prioritised medium access scheme for tracking applications in UWB LDR-LT networks*. In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on, pages 1–6, Sept 2008. (p. 41, 102, 107)
- [Maman 08b] M. Maman, B. Denis, M. Pezzin, B. Piaget & L. Ouvry. *Synergetic MAC and higher layers functionalities for UWB LDR-LT wireless networks*. In Ultra-Wideband, 2008. ICUWB 2008. IEEE International Conference on, volume 3, pages 101–104, Sept 2008. (p. 84)
- [Maman 11] M. Maman & L. Ouvry. *BATMAC : An adaptive TDMA MAC for body area networks performed with a space-time dependent channel model*. In Medical Information Communication Technology (ISMICT), 2011 5th International Symposium on, pages 1–5, March 2011. (p. 39)
- [Martins 14] M.S. Martins, N. Pinto, G. Rocha, J. Cabral & S. Laceros Mendez. *Development of a 1 Mbps low power acoustic modem for underwater communications*. In Ultrasonics Symposium (IUS), 2014 IEEE International, pages 2482–2485, Sept 2014. (p. 22)
- [McKown 91] J. W. McKown & R. L. Hamilton. *Ray tracing as a design tool for radio networks*. IEEE Network, vol. 5, no. 6, pages 27–30, Nov 1991. (p. 49)
- [Meissner 11] P. Meissner, D. Arnitz, T. Gigl & K. Witrals. *Analysis of an indoor UWB channel for multipath-aided localization*. In Ultra-Wideband (ICUWB), 2011 IEEE International Conference on, pages 565–569, Sept 2011. (p. 49)
- [Mekonnen 10a] Z. W. Mekonnen, E. Slottke, H. Luecken, C. Steiner & A. Wittneben. *Constrained maximum likelihood positioning for UWB based human motion tracking*. In Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on, pages 1–10, Sept 2010. (p. 44)

## Bibliographie

---

- [Mekonnen 10b] Z.W. Mekonnen, E. Slottke, H. Luecken, C. Steiner & A. Wittneben. *Constrained maximum likelihood positioning for UWB based human motion tracking*. In Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on, pages 1–10, Sept 2010. (p. 103)
- [Menache 99] Alberto Menache. Understanding motion capture for computer animation and video games. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1st edition, 1999. (p. 21)
- [Mhedhbi 12] M. Mhedhbi, M. Laaraiedh & B. Uguen. *Constrained LMDS technique for human motion and gesture estimation*. In Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2012 9th Workshop on, pages 89–93, March 2012. (p. 103)
- [Mhedhbi 14] Meriem Mhedhbi, Nicolas Amiot, Stéphane Avrillon & Bernard Uguen. *Human Body Perturbed Antenna Integration In Indoor Propagation Simulator*. In Journées scientifiques 2014 de l'URSI France, Paris, France, March 2014. (p. 136, 139)
- [Miniutti 08] D. Miniutti, L. Hanlen, D. Smith, A. Zhang, D. Lewis, D. Rodda & B. Gilbert. *Narrowband Channel Characterization for Body Area Networks*. IEEE P802.15-08-0421-00-0006 "https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/08/15-08-0421-00-0006-narrowband-channel-characterization-for-ban.pdf", 2008. (p. 46)
- [Miscopain 07] B. Miscopain & J. Schwoerer. *Low Complexity Synchronization Algorithm for Non-Coherent UWB-IR Receivers*. In Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th, pages 2344–2348, April 2007. (p. 37)
- [Miscopain 10] B. Miscopain. *Systèmes UWB impulsions non cohérents pour les réseaux de capteurs : coexistence et coopération*. Theses, INSA Lyon, 2010. (p. 38)
- [Misra 15] S. Misra & S. Sarkar. *Priority-Based Time-Slot Allocation in Wireless Body Area Networks During Medical Emergency Situations : An Evolutionary Game-Theoretic Perspective*. Biomedical and Health Informatics, IEEE Journal of, vol. 19, no. 2, pages 541–548, March 2015. (p. 114)
- [Mixim 15] Mixim. [Online]. <http://sourceforge.net/projects/mixim/files/mixim/>, last accessed September 2015. (p. 50)
- [Moeslund 06] Thomas B. Moeslund, Adrian Hilton & Volker Krüger. *A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis*. Computer Vision and Image Understanding, vol. 104, no. 2-3, pages 90–126, Nov 2006. (p. 21)
- [Morris 73] J.R.W. Morris. *Accelerometry—A technique for the measurement of human body movements*. Journal of Biomechanics, vol. 6, no. 6, pages 729 – 736, 1973. (p. 22)

- [Movassaghi 14] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith & A. Jamali-pour. *Wireless Body Area Networks : A Survey*. Communications Surveys Tutorials, IEEE, vol. 16, no. 3, pages 1658–1686, Third 2014. (p. 4)
- [Musolesi 09] Mirco Musolesi & Cecilia Mascolo. Middleware for network eccentric and mobile applications, chapitre Mobility Models for Systems Evaluation, pages 43–62. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. (p. 47)
- [Muthukrishnan 05] Kavitha Muthukrishnan, Maria Lijding & Paul Havinga. *Towards smart surroundings : Enabling techniques and technologies for localization*. In In proceedings of the first International Workshop on Location- and Context-awareness (LOCA), Springer-Verlag, 2005. (p. 2)
- [Nabi 11] Majid Nabi, Marc Geilen & Twan Basten. *MoBAN : A Configurable Mobility Model for Wireless Body Area Networks*. In 4th International Conference on Simulation Tools and Techniques. ICST, March 2011. (p. 50)
- [Nardis 10] L. De Nardis, D. Domenicali & M. G. Di Benedetto. *Mobility model for Body Area Networks of soccer players*. In Wireless Technology Conference (EuWIT), 2010 European, pages 65–68, Sept 2010. (p. 47)
- [Nechayev 05] Y. I. Nechayev, P. S. Hall, C. C. Constantinou, Yang Hao, A. Alomainy, R. Dubrovka & C. G. Parini. *On-body path gain variations with changing body posture and antenna position*. In 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, volume 1B, pages 731–734 vol. 1B, 2005. (p. 45, 46)
- [Neiryneck 10] Dries Neiryneck, Kathleen Philips, Harmke de Groot & Javier Espina. *Practical Comparison of Ranging in IEEE 802.15.4 and IEEE 802.15.4a Medical Body Sensor Networks*. In Proceedings of the Fifth International Conference on Body Area Networks, BodyNets '10, pages 16–22, New York, NY, USA, 2010. ACM. (p. 37)
- [Niemela 13] V. Niemela, M. Hämäläinen & J. Iinatti. *On IEEE 802.15.6 UWB symbol length for energy detector receivers' performance with OOK and PPM*. In Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2013 7th International Symposium on, pages 33–37, March 2013. (p. 72)
- [Nosratinia 04] A. Nosratinia, T.E. Hunter & A. Hedayat. *Cooperative communication in wireless networks*. Communications Magazine, IEEE, vol. 42, no. 10, pages 74–80, Oct 2004. (p. 9)
- [NS-2 15] The Network Simulator NS-2. [Online]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, last accessed September 2015. (p. 49)
- [NS-3 15] The Network Simulator NS-3. [Online]. <https://www.nsnam.org/>, last accessed September 2015. (p. 49)

## Bibliographie

---

- [O'Brien 00] James F. O'Brien, Robert E. Bodenheimer, Jr., Gabriel J. Brostow & Jessica K. Hodgins. *Automatic Joint Parameter Estimation from Magnetic Motion Capture Data*, 2000. (p. 22)
- [Ouni 15] Anis Ouni, Jihad Hamie, Claude Chaudet, Arturo Guizar & Claire Goursaud. *From the Characterization of Ranging Error to the Enhancement of Nodes Localization for Group of Wireless Body Area Networks*. In Nathalie Mitton, Melike Erol Kantarci, Antoine Gallais & Symeon Papavassiliou, éditeurs, *Ad Hoc Networks*, volume 155 of *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, pages 185–196. Springer International Publishing, 2015. (p. xxv, 92, 124, 166, 169)
- [Pasquero 14] Oudomsack Pierre Pasquero, Ramona Rosini, Raffaele D'Errico & Claude Oestges. On-body channel correlation in various walking scenarios. 2014. (p. 46, 66)
- [Perälä 07] T. Perälä & R. Piché. *Robust Extended Kalman Filtering in Hybrid Positioning Applications*. In Positioning, Navigation and Communication, 2007. WPNC '07. 4th Workshop on, pages 55–63, March 2007. (p. 126)
- [Polhemus 15] Polhemus. <http://www.polhemus.com/>, last accessed September 2015. (p. 22)
- [Poor 94] H. Vincent Poor. An introduction to signal detection and estimation (2nd ed.). Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, 1994. (p. 29)
- [Poppe 07] Ronald Poppe. *Vision-based human motion analysis : An overview*. Computer Vision and Image Understanding, vol. 108, no. 1–2, pages 4 – 18, 2007. Special Issue on Vision for Human-Computer Interaction. (p. 21)
- [Qi 03] Yihong Qi & Hisashi Kobayashi. *On relation among time delay and signal strength based geolocation methods*. In Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE, volume 7, pages 4079–4083 vol.7, Dec 2003. (p. 29)
- [Raab 79] Frederick Raab, Ernest Blood, Terry Steiner & Herbert Jones. *Magnetic Position and Orientation Tracking System*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-15, no. 5, pages 709–718, Sep 1979. (p. 22)
- [Rahim 12] A. Rahim, N. Javaid, M. Aslam, Z. Rahman, U. Qasim & Z.A. Khan. *A Comprehensive Survey of MAC Protocols for Wireless Body Area Networks*. In Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2012 Seventh International Conference on, pages 434–439, Nov 2012. (p. 39, 114)
- [Rappaport 96] T.S. Rappaport, J. Reed & B.D. Woerner. *Position location using wireless communications on highways of the future*. Communi-

- cations Magazine, IEEE, vol. 34, no. 10, pages 33–41, Oct 1996. (p. 2)
- [Raspopoulos 12] M. Raspopoulos, C. Laoudias, L. Kanaris, A. Kokkinis, C. G. Panayiotou & S. Stavrou. *3D Ray Tracing for device-independent fingerprint-based positioning in WLANs*. In Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2012 9th Workshop on, pages 109–113, March 2012. (p. 49)
- [Ren 06] H. Ren & M. Q. h. Meng. *Understanding the Mobility Model of Wireless Body Sensor Networks*. In 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, pages 306–310, Aug 2006. (p. 48)
- [Rim 13] Bahroun Rim, Olivier J.J. Michel, François Frassati, Mikael Carmona & Jean-Louis Lacoume. *New algorithm for footstep localization using seismic sensors in an indoor environment*. Journal of Sound and Vibration, vol. 333 (2014), pages 1046–1066, November 2013. (p. 22)
- [Roblin 11] C. Roblin. *Analysis of the channel power delay profile of WBAN scenarios in various indoor environments*. In Ultra-Wideband (ICUWB), 2011 IEEE International Conference on, pages 545–549, Sept 2011. (p. 45)
- [Roetenberg 09] Daniel Roetenberg, Henk Luinge & Per Slycke. *Xsens mvn : full 6dof human motion tracking using miniature inertial sensors*. Xsens Motion Technologies BV. Rapport technique, 2009. (p. 22)
- [Rosini 12a] R. Rosini & R. D’Errico. *Off-Body channel modelling at 2.45 GHz for two different antennas*. In 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pages 3378–3382, March 2012. (p. 44, 46, 47)
- [Rosini 12b] R. Rosini, R. D’Errico & R. Verdone. *Body-to-Body communications : A measurement-based channel model at 2.45 GHz*. In 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC), pages 1763–1768, Sept 2012. (p. 46, 47)
- [RUBY 15] RUBY. *Radio UWB pour les réseaux corporels*. [Online]. Available : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-11-INFR-0004> [Accessed February 2016], 2012-2015. (p. 30, 32)
- [Sahinoglu 11] Zafer Sahinoglu, Sinan Gezici & Ismail Gvenc. *Ultra-wideband positioning systems : Theoretical limits, ranging algorithms, and protocols*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2011. (p. 7, 10, 23)
- [Sakaguchi 96] T. Sakaguchi, T. Kanamori, H. Katayose, K. Sato & S. Inokuchi. *Human motion capture by integrating gyroscopes and accelerometers*. In Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 1996. IEEE/SICE/RSJ International Conference on, pages 470–475, Dec 1996. (p. 22)

## Bibliographie

---

- [Santagati 14] G.E. Santagati & T. Melodia. *Sonar inside your body : Prototyping ultrasonic intra-body sensor networks*. In INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE, pages 2679–2687, April 2014. (p. 22)
- [Sato 11] T. Sato, S. Nakamura, K. Terabayashi, M. Sugimoto & H. Hashizume. *Design and implementation of a robust and real-time ultrasonic motion-capture system*. In Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on, pages 1–6, Sept 2011. (p. 22)
- [Sayrafian-Pour 13] K. Sayrafian-Pour, J. Hagedorn, M. Barbi, J. Terrill & M. Alasti. *A simulation platform to study inter-BAN interference*. In Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2013 IEEE 4th International Conference on, pages 345–350, Dec 2013. (p. 49)
- [Scanlon 08] W. G. Scanlon & S. L. Cotton. *Understanding on-body fading channels at 2.45 GHz using measurements based on user state and environment*. In Antennas and Propagation Conference, 2008. LAPC 2008. Loughborough, pages 10–13, March 2008. (p. 46)
- [Seidel 94] S. Y. Seidel & T. S. Rappaport. *Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 4, pages 879–891, Nov 1994. (p. 49)
- [Shaban 10] H.A. Shaban, M.A. El-Nasr & R. Michael Buehrer. *Toward a Highly Accurate Ambulatory System for Clinical Gait Analysis via UWB Radios*. Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, vol. 14, no. 2, pages 284–291, March 2010. (p. 44, 48, 103)
- [ShapeWrap 15] Measurand ShapeWrap. <http://www.motion-capture-system.com/shapewrap.html>, last accessed September 2015. (p. 28)
- [Shimizu 03] Y. Shimizu & Y. Sanada. *Accuracy of relative distance measurement with ultra wideband system*. In Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on, pages 374–378, Nov 2003. (p. 37)
- [Simulator 15] CASTALIA Wireless Sensor Network Simulator. [Online]. "<https://castalia.forge.nicta.com.au/index.php/en/documentation.html/>", last accessed September 2015. (p. 50)
- [Soganci 11] H. Soganci, S. Gezici & H.V. Poor. *Accurate positioning in ultra-wideband systems*. Wireless Communications, IEEE, vol. 18, no. 2, pages 19–27, April 2011. (p. 37, 78)
- [Song 09] Wei Song & Weihua Zhuang. *Multi-service load sharing for resource management in the cellular/WLAN integrated network*. Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 8, no. 2, pages 725–735, Feb 2009. (p. 9)

- [Sturman 15] David J. Sturman. *A Brief History of Motion Capture for Computer Character Animation*, last accessed September 2015. (p. 21)
- [Takizawa 09] K. Takizawa, T. Aoyagi & R. Kohno. *Channel Modeling and Performance Evaluation on UWB-Based Wireless Body Area Networks*. In 2009 IEEE International Conference on Communications, pages 1–5, June 2009. (p. 45)
- [Tan 05] Chin-Woo Tan & Sungsu Park. *Design of accelerometer-based inertial navigation systems*. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 54, no. 6, pages 2520–2530, Dec 2005. (p. 22)
- [Taparugssanagorn 10] Attaphongse Taparugssanagorn, Carlos Pomalaza-Raez, Ari Isola, Raffaello Tesi, Matti Hamalainen & Jari Linatti. *UWB channel modelling for wireless body area networks in a hospital*. International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems, vol. 1, no. 4, pages 226–236, 2010. (p. 72)
- [Torkestani 12] S. S. Torkestani, S. Sahuguede, A. Julien-Vergonjanne & J. P. Cances. *Indoor optical wireless system dedicated to healthcare application in a hospital*. IET Communications, vol. 6, no. 5, pages 541–547, March 2012. (p. 22)
- [Uguen 12] B. Uguen, N. Amiot & M. Laaraiedh. *Exploiting the graph description of indoor layout for ray persistency modeling in moving channel*. In 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pages 30–34, March 2012. (p. 49, 66)
- [Ullah 09] Sana Ullah, Bin Shen, S.M. Riazul Islam, Pervez Khan, Shahnaz Saleem & Kyung Sup Kwak. *A Study of MAC Protocols for WBANs*. Sensors, vol. 10, no. 1, page 128, 2009. (p. 102)
- [Ullah 12] Sana Ullah, Henry Higgins, Bart Braem, Benoit Latre, Chris Blondia, Ingrid Moerman, Shahnaz Saleem, Ziaur Rahman & Kyung Sup Kwak. *A Comprehensive Survey of Wireless Body Area Networks*. J. Med. Syst., vol. 36, no. 3, pages 1065–1094, June 2012. (p. 4, 39, 114)
- [Vaughan-Nichols 09] S.J. Vaughan-Nichols. *Will Mobile Computing's Future Be Location, Location, Location?* Computer, vol. 42, no. 2, pages 14–17, Feb 2009. (p. 2)
- [Vicon 15] Vicon. <http://www.vicon.com/>, last accessed September 2015. (p. 21, 48, 51)
- [Vieira 03] M.A.M. Vieira, C.N. Coelho, Jr. da Silva D.C. & J.M. da Mata. *Survey on wireless sensor network devices*. In Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference, volume 1, pages 537–544 vol.1, Sept 2003. (p. 4)
- [Vlasic 07] Daniel Vlasic, Rolf Adelsberger, Giovanni Vannucci, John Barnwell, Markus Gross, Wojciech Matusik & Jovan Popović. *Practical*

- Motion Capture in Everyday Surroundings*. ACM Trans. Graph., vol. 26, no. 3, July 2007. (p. 27)
- [Walters 89] Graham Walters. *The story of Waldo C. Graphic*. In Course Notes : 3D Character Animation by Computer, ACM SIGGRAPH '89, pages 65–79, Boston, USA, 1989. (p. 22)
- [Wang 13] Lusheng Wang, C. Goursaud, N. Nikaein, L. Cottatellucci & J. Gorce. *Cooperative Scheduling for Coexisting Body Area Networks*. Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 12, no. 1, pages 123–133, January 2013. (p. 9, 152)
- [Wann 11] Chin-Der Wann & Chih-Sheng Hsueh. *Non-line of Sight Error Mitigation in Ultra-wideband Ranging Systems Using Biased Kalman Filtering*. J. Signal Process. Syst., vol. 64, no. 3, pages 389–400, September 2011. (p. 124)
- [WearABAN 12] WearABAN. *Unobtrusive wearable human to machine wireless interface*. [Online]. Available : [http : //cordis.europa.eu/projects/rcn/94540\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/94540_en.html) [Accessed February 2016], 2010-2012. (p. 31, 33)
- [WHERE2 13] WHERE2. *Wireless Hybrid Enhanced Mobile Radio Estimators*. "[Online]. Available : [http : //www.ict-where2.eu/](http://www.ict-where2.eu/) [Accessed February 2016]", 2010-2013. (p. 31, 33)
- [Win 98] M.Z. Win & R.A. Scholtz. *Impulse radio : how it works*. Communications Letters, IEEE, vol. 2, no. 2, pages 36–38, Feb 1998. (p. 11, 37)
- [WiserBAN 14] WiserBAN. *Smart miniature low-power wireless micro-system for Body Area*. [Online]. Available : [http : //www.wiserban.eu/wiserban/](http://www.wiserban.eu/wiserban/) [Accessed February 2016], 2010-2014. (p. 31, 33)
- [Xia 15] F. Xia, L. Liu, J. Li, J. Ma & A. V. Vasilakos. *Socially Aware Networking : A Survey*. IEEE Systems Journal, vol. 9, no. 3, pages 904–921, Sept 2015. (p. 47)
- [Xiao 10] Zhu Xiao, YongQiang Hei, Quan Yu & KeChu Yi. *A survey on impulse-radio UWB localization*. Sci. China Inf. Sci., vol. 53, no. 7, pages 1322–1335, Jul 2010. (p. 29, 34, 36, 78, 169)
- [XSens 15] XSens. *Introduction about the beginning of motion capture technology*, last accessed September 2015. (p. 19, 20)
- [Yan 12] Zhisheng Yan, Bin Liu & Chang Wen Chen. *QoS-driven scheduling approach using optimal slot allocation for Wireless Body Area Networks*. In e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), 2012 IEEE 14th International Conference on, pages 267–272, Oct 2012. (p. 114, 115, 126)
- [Yang 10] Shunsen Yang, Xinyu Yang, Chao Zhang & E. Spyrou. *Using social network theory for modeling human mobility*. Network, IEEE, vol. 24, no. 5, pages 6–13, September 2010. (p. 21, 47)

- [Yang 13] Song Yang, Jia-Liang Lu, Fan Yang, Linghe Kong, Wei Shu & Min-You Wu. *Behavior-aware probabilistic routing for wireless body area sensor networks*. In Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE, pages 444–449, Dec 2013. (p. 134, 135)
- [Yang 15] Fan Yang, Jia-Liang Lu, F. Theoleyre, Wei Shu & Min-You Wu. *Dynamic active area clustering with inertial information for fingerprinting based indoor localization systems*. In IFIP Networking Conference (IFIP Networking), 2015, pages 1–9, May 2015. (p. 28)
- [Yazdandoost 09] K. Y. Yazdandoost & K. Sayrafian-Pour. *Channel Model for Body Area Network (BAN)*. IEEE P802.15-08-0780-09-0006; <https://mentor.ieee.org/802.15/>, mar 2009. (p. 13, 15, 29, 46, 47, 71, 75, 136, 138, 168, 170, 173)
- [Yu 12] Kegen Yu & E. Dutkiewicz. *Improved Kalman filtering algorithms for mobile tracking in NLOS scenarios*. In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE, pages 2390–2394, April 2012. (p. 122)
- [Yun 06] X. Yun & E.R. Bachmann. *Design, Implementation, and Experimental Results of a Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking*. Robotics, IEEE Transactions on, vol. 22, no. 6, pages 1216–1227, Dec 2006. (p. 126)
- [Zasowski 03] T. Zasowski, F. Althaus, M. Stager, A. Wittneben & G. Troster. *UWB for noninvasive wireless body area networks : channel measurements and results*. In Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on, pages 285–289, Nov 2003. (p. 45)
- [Zhang 10] Z. Zhang, Z. Lu, Q. Chen, X. Yan & L. R. Zheng. *COSMO : CO-Simulation with MATLAB and OMNeT++ for Indoor Wireless Networks*. In Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE, pages 1–6, Dec 2010. (p. 50)
- [Zhao 10] C. Zhao & M. L. Sichitiu. *N-Body : Social Based Mobility Model for Wireless Ad Hoc Network Research*. In 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), pages 1–9, June 2010. (p. 47)
- [Zhuang 12] Weihua Zhuang & Muhammad Ismail. *Cooperation in wireless communication networks*. IEEE Wireless Commun., vol. 19, no. 2, pages 10–20, 2012. (p. 9)