



Contribution aux architectures protocolaires pour un système de localisation dans un réseau de capteurs sans fil basé sur une couche physique 802.15.4a UWB

Nezo Ibrahim Fofana

► To cite this version:

Nezo Ibrahim Fofana. Contribution aux architectures protocolaires pour un système de localisation dans un réseau de capteurs sans fil basé sur une couche physique 802.15.4a UWB. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2017. Français. NNT : 2017TOU20049 . tel-02161999

HAL Id: tel-02161999

<https://theses.hal.science/tel-02161999>

Submitted on 21 Jun 2019

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse - Jean Jaurès

Présentée et soutenue par :

FOFANA Nezo Ibrahim

le jeudi 6 juillet 2017

Titre :

Contribution aux architectures protocolaires pour un système de localisation
dans un réseau de capteurs sans fil basé sur une couche physique 802.15.4a
UWB

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MITT : Domaine STIC : Réseaux, Télécoms, Systèmes et Architecture

Unité de recherche :

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

Directeur/trice(s) de Thèse :

Pr. Thierry VAL

Dr. Adrien VAN DEN BOSSCHE

Jury :

Adil SAYOUTI, Ecole Royale Navale, rapporteur
Gérard CHALHOUB, Université d'Auvergne, rapporteur
Réjane DALCE, Université de Champollion, examinatrice
Philippe FRAISSE, Université de Montpellier, examinateur

Toutes les louanges sont adressées à Dieu qui m'a gardé en vie jusqu'à ce jour et qui a permis que je puisse réaliser ce projet de thèse.

Dédicace

A mes père et mère,
Negbé Fofana et Nikan Fofana,
Mes premiers encadrants depuis ma naissance,
qui m'ont éduqué, qui m'ont appris à vivre, à aimer,
qui m'ont soutenu moralement et financièrement durant mes études,
qui m'ont inculqué le courage qui m'a permis de faire un doctorat.
Qu'ils trouvent ici l'hommage de ma gratitude qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera à la hauteur
des sacrifices et prières faites pour moi.
Que Dieu le tout puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

A mon parrain,
Bamba Adama Inza,
pour ses conseils, ses soutiens moraux et financiers,
depuis mon premier exil académique au Maroc jusqu'à ce jour.

A Youssef BAKAYOKO,
Pour ses conseils et encouragement à faire face à toutes les difficultés morales rencontrée durant mon
parcours étudiantin.

A mon épouse,
Diomandé Makagbè,
pour sa patience, son soutien constant et ses nombreux encouragements.

A mes frère et sœur,
Fofana Séko Soilio, Fofana Mamadou, Fofana Mamba Satou et Fofana Abdoulaye,
Je vous souhaite beaucoup de réussite et de bonheur dans votre vie.

Remerciements

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire se sont déroulés au sein du laboratoire de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT).

Je tiens vivement remercier :

Le **Pr. Thierry VAL**, mon directeur de thèse pour la confiance qu'il a placée en moi en me confiant le sujet de cette thèse. Je voudrais le remercier pour ses conseils avisés, son ouverture d'esprit, ses encouragements, sa disponibilité et surtout et pour ces qualités humaines rares.

Le **Dr. Adrien van den BOSSCHE**, mon co-directeur de thèse. Je voudrai le remercier pour son aide précieuse pendant de cette thèse, pour ses qualités scientifiques exceptionnelles, pour sa patience ainsi que le grand intérêt qu'il a porté à mes travaux durant leur avancement.

L'Université de Toulouse Jean-Jaurès, l'Université de Paul Sabatier ainsi que l'Ecole Doctorale MITT, d'avoir retenu ma candidature et de m'avoir encadrée durant ces quatre années.

Monsieur **Adil SAYOUTI**, Professeur d'enseignement à l'Ecole Royale Navale (Ecole Militaire d'Ingénieur) de Casablanca, ainsi que Monsieur **Gérard CHALHOUB**, Maître de conférences à l'Université d'Auvergne, Laboratoire LIMOS-CNRS, de m'avoir fait l'honneur de bien vouloir participer au jury de cette thèse en tant que rapporteur. Ses remarques constructives m'ont beaucoup aidé à améliorer ce manuscrit.

Madame **Réjane DALCE**, Maître de conférences à l'école d'ingénieur Informatique et Systèmes d'Information pour la Santé (ISIS) Castres, Monsieur **FRAISSE Philippe**, Professeur d'enseignement Université de Montpellier - Laboratoire LIRMM, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en faisant partie de ce jury de thèse en tant qu'examineur.

J'exprime ma profonde gratitude à tout le personnel de l'IUT, chefs de département, personnels enseignants, administratifs et techniques. A tous les collègues de l'équipe IRIT/IRT de Blagnac que j'ai côtoyé durant ces quatre années de thèse : Réjane, Asma, Sabri, Chiraz, Mathilde, Hayfa, Mahamat, Adel, Sami, Nicolas. Trouvez ici mes sincères remerciements.

Je tiens particulièrement à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur Farid EL JAMMAL ingénieur STRI de l'Université Paul Sabatier et à Monsieur Laurent GUERBY ingénieur de recherche chez Snootlab pour avoir contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Une pensée spéciale à toute ma famille, à ma très chère épouse, à ma belle-famille à Duékoué, à Man et à Abidjan sur qui j'ai pu compter ainsi qu'à tous mes proches : FOFANA Mamadou, FOFANA Moussa, DOSSO Vataky, COULIBALY Nacouban et KONATÉ Lalla, FOFANA Ibrahima, TOURÉ Birama, DIABY Adam, la famille DIABY, CISSOKO Famory, BÂ Tidjane. Merci pour votre amour et votre soutien constant.

INTRODUCTION	13
Chapitre 1.....	17
1.1 La problématique générale de nos travaux de recherches.....	18
1.2 Les réseaux de capteurs sans fil	18
1.2.1 Architecture physique d'un capteur	19
1.2.2 La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	20
1.2.3 La topologie des réseaux de capteurs sans fil	20
1.2.3.1 Les topologies en étoile.....	21
1.2.3.2 La topologie maillée (<i>mesh</i>)	21
1.2.3.3 La topologie <i>cluster-tree</i>	22
1.3 Les caractéristiques du signal exploitées pour les mesures de distance.....	23
1.3.1 Les principales métriques de ranging	24
1.3.1.1 Les métriques basées sur les techniques <i>Range-Free</i>	24
1.3.1.2 Les métriques basées sur les techniques <i>Range-Based</i>	25
1.3.1.2.1 AoA (Angle of Arrival).....	25
1.3.1.2.2 Le temps de parcours du signal : ToF (<i>Time of Flight</i>) / ToA (<i>Time of Arrival</i>)	26
1.3.1.2.3 TDoA (Time Difference of Arrival).....	27
1.3.1.2.4 RSSI (Received Signal Strength Indicator).....	28
1.3.1.2.5 Conclusion	29
1.4 Les protocoles de mesure du temps de vol du signal.....	29
1.4.1 Les protocoles de références de ranging	29
1.4.1.1 Le protocole OWR (<i>One Way Ranging</i>).....	29
1.4.1.1.1 Le principe de base	29
1.4.1.2 Le protocole TWR (<i>Two Way Ranging</i>)	30
1.4.1.2.1 Le principe de base	30
1.4.1.3 Le protocole SDS-TWR (<i>Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging</i>).....	31
1.4.1.3.1 Le principe de base	31
1.4.2 Autres protocoles	33
1.5 Etat de l'art sur les technologies sans fil à faible consommation d'énergie (LR-WPAN).....	37
1.5.1 IEEE 802.15.4-Zigbee.....	37
1.5.1.1 IEEE 802.15.4	37
1.5.1.1.1 La couche physique	38
1.5.1.1.2 La couche MAC	39

1.5.1.1.3	Topologie réseau.....	39
1.5.1.2	Zigbee.....	40
1.5.1.2.1	La pile protocolaire ZigBee	41
1.5.2	BLE (Bluetooth Low Energie)	42
1.5.2.1	Empilement protocolaire de la Bluetooth Low Energy (BLE)	42
1.5.2.2	La couche physique.....	43
1.5.2.3	La couche liaison de données	44
1.5.3	IEEE 802.15.4-2011 : Ultra-Wide Band.....	45
1.5.4	IEEE 802.15.4e-2012	46
1.5.4.1	DSME (Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension)	46
1.5.4.2	LLDN (Low Latency Deterministic Network)	47
1.5.4.3	RFID Blink (<i>Radio Frequency Identification</i>)	47
1.5.4.4	AMCA (<i>Asynchronous Multi-Channel Adaptation</i>).....	48
1.5.4.5	TSCH (<i>Time Slotted Canal Hopping</i>)	48
1.5.4.5.1	La communication dans le réseau TSCH.....	49
1.5.4.5.2	La synchronisation des nœuds dans le réseau TSCH	49
1.5.5	Conclusion	50
1.6	Présentation détaillée de la technologie physique de l' <i>Ultra-Wide Band</i>	51
1.6.1	Définition du signal UWB	51
1.6.2	L'importance de l'UWB	51
1.6.3	La régulation de la technologie UWB.....	52
1.6.4	La radio impulsionnelle <i>Ultra Wide Band</i> (IR-UWB)	53
1.6.4.1	La définition du symbole du signal IR-UWB	53
1.6.4.2	Les avantages de la radio impulsionnelle (IR-UWB)	53
1.6.4.3	La modulation dans l'IR-UWB.....	54
1.6.4.3.1	Modulation par amplitude de l'impulsion (PAM)	54
1.6.4.3.2	Modulation <i>On Off Keying</i> (OOK) ou tout ou rien.....	54
1.6.4.3.3	Modulation par la position de l'impulsion (PPM)	55
1.6.4.3.4	Modulation à deux états de phase (BPSK).....	55
1.6.5	Le standard IEEE 802.15.4a	55
1.6.5.1	Présentation de la couche physique UWB	56
1.6.5.1.1	Caractérisations de l'allocation fréquentielle.....	56
1.6.5.1.2	Format de la trame UWB et technique de modulation.....	57
1.6.6	Les avantages de l'IR-UWB dans les réseaux de capteurs sans fil.....	57

1.7	Conclusion.....	59
Chapitre 2		60
2.1	Position du problème	61
2.1.1	Problématiques de recherche	61
2.1.2	Hypothèses.....	62
2.1.3	Justification de choix du signal : RSSI ou Temps de vol (ToF).....	63
2.1.4	Problématiques liées à l'imprécision de la mesure du ToF	63
2.1.4.1	Erreurs liées à la synchronisation et à la dérive des horloges.....	64
2.1.4.2	La propagation NLOS (Non-Line Of Sight)	64
2.1.5	Problématiques liées à la surcharge protocolaire (<i>overhead</i>).....	65
2.2	Cahier des charges.....	66
2.3	Proposition d'un formalisme générique pour les techniques de <i>ranging</i> par ToF	66
2.3.1	Formalisme de notation des timestamps.....	67
2.3.2	Formalisme de notation des messages.....	68
2.3.3	Exemples d'utilisation des formalismes.....	68
2.3.3.1	Sur TWR.....	68
2.3.3.2	Sur SDS-TWR.....	69
2.4	Proposition de protocoles de <i>ranging</i> intégrables dans le trafic usuel du réseau.....	69
2.4.1	Présentation de la fonction <i>Delayed Transmission</i>	69
2.4.2	2M-TWR (2 Messages – TWR)	71
2.4.3	Proposition du protocole BB-TWR.....	72
2.4.3.1	Présentation générale du protocole BB-TWR.....	73
2.4.3.2	Table d'estampille du protocole BB-TWR.....	75
2.4.3.3	Conclusion	76
2.4.4	Exemple sur trois nœuds.....	77
2.4.4.1	Ordonnancement de la communication dans le protocole BB-TWR.....	77
2.4.4.2	Contenu des messages et remplissage des tables d'estampilles	77
2.5	Conclusion.....	84
Chapitre 3		86
3.1	Présentation de l'environnement de travail.....	87
3.1.1	Testbed OpenWiNo.....	87
3.1.2	Les nœuds DecaWiNo	90
3.1.2.1	La carte Arduino Teensy 3.2	90
3.1.2.2	Le module DWM1000 de DecaWave	91

3.1.2.2.1	Le transceiver DW1000	91
3.1.2.2.2	Calibration du module DW1000 par l' <i>antenna delay</i>	92
3.1.2.2.3	La description du module DWM1000	93
3.1.3	La librairie DecaDuino	93
3.1.3.1	Présentation générale de la librairie DecaDuino	93
3.1.3.2	Les principales fonctionnalités de DecaDuino	94
3.2	Analyse préliminaire des protocoles de ranging implémentés dans notre testbed.....	95
3.2.1	Conditions d'expérimentations	95
3.2.2	Ranging par TWR	97
3.2.3	Ranging par SDS-TWR	97
3.2.3.1	Discussions et choix de la solution protocolaire	98
3.2.3.2	Conclusion	100
3.2.4	Correction de l'imprécision à l'aide du Skew	100
3.2.4.1	Contexte d'étude	100
3.2.4.2	Evaluation de performance du protocole TWR en présence d'un délai introduit dans les échanges.....	101
3.2.4.3	Méthode de correction de la dérive des horloges.....	103
3.2.4.4	Principe de la correction	104
3.2.4.4.1	Evaluation des performances	105
3.2.4.5	Conclusion	107
3.2.5	Ranging par l'usage de fonctionnalité <i>Delayed Transmission</i>	107
3.3	Implémentation et analyse de performance de BB-TWR	109
3.3.1	Présentations de l'environnement de travail.....	109
3.3.2	BB-TWR en mode séquencé	110
3.3.2.1	Analyse et interprétation des résultats.....	112
3.3.2.2	Les limites de la correction par le <i>Skew</i> pour les délais de 1 et 2 ms	113
3.3.3	BB-TWR en mode général Non Schedule Direct Access.....	114
3.3.3.1	Méthode d'expérimentation	114
3.3.3.2	Analyse et interprétation des résultats.....	115
3.3.4	Conclusion	116
3.3.5	Précision du ranging, taux de perte de trames et collisions	117
3.3.6	Analyse de performance de BB-TWR dans le testbed Ophelia	118
3.3.6.1	Présentation du testbed Ophelia	118
3.3.6.2	BB-TWR en mode séquencé et <i>Non Schedule Direct Access</i>	120

3.3.6.2.1	Le mode séquencé	120
3.3.6.2.2	Le mode Non Schedule Direct Acces.....	122
3.3.6.2.3	Evaluation de la précision du ranging par rapport au nombre de collision ou aux pertes de trames	123
3.3.6.2.4	Conclusion	124
3.4	Conclusion.....	124
Conclusion générale et Perspectives		126
GLOSSAIRE		129
LISTE DES FIGURES.....		131
LISTE DES TABLEAUX		135
PUBLICATIONS PERSONNELLES.....		137
BIBLIOGRAPHIE		139

INTRODUCTION

La localisation à grande échelle à partir des systèmes GPS¹ a considérablement amélioré notre mode de déplacement. Cependant, ce mode de positionnement dans des milieux plus restreints pourrait montrer ses limites à cause de son mauvais fonctionnement en intérieur, dans des milieux cloisonnés, et surtout de sa forte consommation d'énergie. De ce fait, de nouvelles techniques de communications adaptées à la localisation *indoor*, pourraient bien apporter un changement fondamental dans notre vie quotidienne. Ces nouvelles techniques pourraient tirer avantages des systèmes radio utilisés dans le domaine des réseaux sans fil.

Dans le monde industriel, dans la domotique, les centres commerciaux ou encore dans les hôpitaux, plusieurs applications basées sur les capacités de ces systèmes radio permettant de fournir des données exactes de localisation, ont été développées. Ces domaines d'application requièrent des données issues de capteurs (nœuds) comme l'identification des objets, les puissances d'émissions de ces capteurs ou encore des estampilles temporelles permettant de marquer les instants d'émission de réception des signaux émis dans l'objectif d'estimer la mesure du temps de vol de ce signal.

Pour obtenir un service de localisation, il est généralement nécessaire d'effectuer le *ranging*². Les nœuds doivent dans un premier temps estimer la distance qui les sépare d'autres nœuds et par la suite déterminer leur position dans une cartographie spatio-temporelle connue de tous.

La précision du *ranging* dépend fortement de la technologie radio et de la métrique utilisée pour évaluer la distance entre les nœuds. C'est dans ce contexte particulier que les bonnes propriétés de la technologie radio Ultra Wide Band (UWB) (ou Ultra-Large Bande (ULB) en français) ont été mises à profit pour mesurer la métrique du Time of Flight (ToF ou Temps de vol en français) des signaux radio. La métrique du temps de vol des signaux émis, basée sur les techniques *range-based* qui améliorent la précision du ranging. Nous porterons une attention particulière sur ces différentes métriques au chapitre 1.3.1.

Les méthodes traditionnelles de radiolocalisation ne peuvent plus répondre de manière adéquate aux nouveaux défis offerts par les applications émergentes.

On peut citer par exemple, pour les systèmes de localisation par satellite, le GPS et son rival européen GALILEO³ où le récepteur intercepte des signaux en provenance de quatre satellites minimums. Ces satellites disposent chacun d'une horloge atomique ultra précise et connaissent leur position. Le mobile est localisé par trilatération, en estimant les différences de temps de propagation des signaux transmis par les satellites. Ces systèmes sont très utiles à l'extérieur, mais ne fonctionnent pas bien à l'intérieur

¹ Le Global Positioning System (GPS) est un système de géolocalisation fonctionnant à l'échelle planétaire. Il est basé sur le traitement de signaux radio émis par des satellites dédiés. Le système a été développé par le département de la Défense américain à des fins militaires. Il est aujourd'hui utilisé par le grand public. Une personne équipée d'un récepteur GPS peut connaître sa position et s'orienter en mer, sur terre, dans l'air etc.

² Ranging : mécanisme d'évaluation de la distance entre des systèmes de communications. Dans un contexte de réseau de capteurs sans fil, les nœuds échangent des informations tout en estampillant les instants d'émission et de réception des trames. Après deux échanges (émission et réception d'une trame), quatre estampilles temporelles sont générées. Ces estampilles permettront de calculer la mesure du temps de vol et de convertir ce temps de vol en distance. La section 1.4 du chapitre 1 détaille bien ce processus.

³ Tout comme le GPS, Galileo est un système géolocalisation fonctionnant à l'échelle planétaire. Il a été conçu par l'Union européenne et son introduction au public doit se faire vers 2020. Son utilisateur devra s'équiper d'un récepteur afin d'obtenir sa position

des bâtiments et les environnements cloisonnés où la visibilité directe avec les satellites n'est pas évidente. Ces systèmes ne sont pas adaptés aux environnements essentiellement *indoor*.

De ce fait, on a assisté à une émergence de nouveaux besoins en matière de localisation. Ces besoins considèrent essentiellement l'intérieur des bâtiments (l'*indoor*). Leur arrivée coïncide par ailleurs avec de nombreuses applications et services, dont le fonctionnement est parfaitement adapté à une utilisation en intérieur. Nous donnons une liste non exhaustive d'exemples spécifiques d'applications :

- Dans le domaine des loisirs : ces applications sont présentes dans le sport pour le calcul du nombre total de pas en une période donnée, pour le calcul de la distance parcourue, dans les jeux interactifs, etc.
- La domotique : aujourd'hui plusieurs applications dans les maisons intelligentes permettent de localiser des objets, identifier des personnes, de contrôler à distance des objets, de régler de la luminosité de l'écran en fonction l'intensité lumineuse de la maison, etc.
- La sécurité/domaine militaire : il est possible de détecter et de suivre des mouvements d'objets mobiles indésirables dans le domaine militaire, de surveiller et de localiser des biens et des personnes dans les bâtiments ou des zones à risque, de détecter des dispositifs nucléaires et d'armes biologiques, de rechercher de victimes dans une zone sinistrée, de surveiller de détenus, etc.
- Domaines industriels : les applications dans domaine industriel permettent par exemple de vérifier la pression ou du débit dans une canalisation, d'automatiser et de gérer des stocks dans les entrepôts etc.
- Domaine du transport : la prévention des accidents et la géolocalisation de véhicules est un des domaines privilégiés de ces applications dans le domaine du transport.
- Domaine médical : les applications dans le domaine médicale permettent de suivre à distance certains paramètres physiologiques de patient à domicile ou à l'hôpital, de surveiller à distance des informations médicales comme les pulsations cardiaques ou le niveau d'oxygénation, de réaliser des interventions médicales et/ou chirurgicales assistés, de surveiller et localiser des patients atteints de troubles de mémoire etc.

Cette brève présentation n'est pas exhaustive, le domaine d'application de ces nouveaux systèmes de communication est très grand. Ces nouveaux systèmes de communications se veulent légers, économes en énergie, peu intrusifs et confortable, performants, capables de relayer en temps réel des informations d'intérêt.

De par leur domaine d'application, on peut dire que ces systèmes semblent être bien adaptés aux environnements cloisonnés.

Les systèmes de communications de la technologie UWB ont des concepts proches des domaines d'application des systèmes décrits précédemment. Nous verrons dans ce qui suit comment les propriétés inhérentes de la technologie UWB répondent de manière avantageuse au problème de localisation en intérieur.

Notre thèse s'inscrit dans le contexte général de la localisation *indoor*, à faible portée (une dizaine de mètre), à travers des modules compatibles UWB. Plus particulièrement, il s'agit pour nous de mettre en place un outil de *ranging* basé sur la mesure du temps de vol, permettant à plusieurs nœuds d'estimer la distance qui les sépare des autres nœuds et d'intégrer ces informations de ranging dans un trafic de

ranging existant. Nous portons, dans cette thèse, une attention particulière sur l'aspect prototypage réel de nos expérimentations.

Dans le premier chapitre nous présentons la problématique générale de nos travaux de recherche suivie d'une étude bibliographique sur les réseaux de capteur sans fil et sur certaines métriques utilisées pour l'évaluation de la distance. Ensuite nous présenterons certaines technologies de la famille LR-WPAN⁴ et nous terminons par une présentation de la technologie UWB. Dans cette dernière partie du chapitre 1, nous faisons une étude détaillée de l'intérêt de cette technologie pour notre travail. Nous faisons une étude bibliographique présentant les fondements de la radio impulsionnelle à travers les différentes techniques de modulation, la couche physique UWB et ses avantages dans les réseaux de capteurs sans fil en général.

Après cette étude bibliographique, le chapitre 2 de cette thèse présentera le choix protocolaire de notre outil de ranging qui orientera la suite de notre travail de thèse. Nous proposons ainsi le protocole BB-TWR (Broadcasting Based Two Way Ranging) après avoir justifié le choix de la mesure du Temps de vol (ToF) par rapport au RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) et proposé un formalisme de message pour les techniques de ranging par ToF. Les protocoles de référence de ranging TWR (Two Way Ranging) et SDS-TWR (Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging) sont par la suite présentés. Nous proposons une amélioration du protocole TWR sur lequel est basé le protocole BB-TWR. La dernière partie du chapitre illustre un exemple d'application du protocole BB-TWR sur trois nœuds.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous implémentons et analysons les performances des protocoles étudiés et proposés dans le chapitre 2. Dans cette analyse de performance, nous avons porté une attention particulière sur la problématique de la dérive des horloges. Ceci nous a amené à réaliser une étude comparative de performance des protocoles de ranging lorsqu'ils sont contraints temporairement. L'étude de ces différents protocoles nous a permis de proposer un protocole (BB-TWR) simple et capable d'effectuer le ranging avec plusieurs nœuds voisins à un saut tout en fournissant des performances acceptables.

Une conclusion générale et des perspectives parachèvent ce mémoire à travers un bilan des performances et les résultats obtenus.

⁴ LR-WPAN : Low-Rate Wireless Personal Area Network

Chapitre 1

ETAT DE L'ART DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL, MODE DE COMMUNICATION, MODE D'ECHANGE ET METRIQUE

1.1 La problématique générale de nos travaux de recherches

Notre travail général de recherche dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN : *Wireless Sensor Network*) et l'Internet des objets visent à introduire des capacités de localisation pour chacun des nœuds du réseau. Ces capacités de localisation devront permettre à chaque nœud de s'auto localiser en utilisant seulement le réseau sans fil et les messages du réseau : sans message et matériel (GPS, magnétomètre, Accéléromètre, ...) dédié. Ce dispositif de localisation devra utiliser seulement le trafic natif du réseau, c'est-à-dire les trames (du réseau existant) déjà envoyées et reçues par les nœuds. Il devra aussi reposer sur la technologie 802.15.4-2011 Ultra Wide Band (UWB) [1][2] qui fournit des capacités fines de localisation par la mesure du temps de vol et tenir compte des contraintes intrinsèques des WSN comme les ressources limitées et la consommation énergétique.

Les propositions devront être testées et validées par prototypage réel c'est-à-dire dans un environnement réel.

1.2 Les réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau composé de plusieurs nœuds autonomes appelés capteurs (Figure 1) communiquant via le réseau sans fil.



Figure 1 : Aspect d'un capteur Micaz

Cette appellation capteur vient du fait que ces nœuds sont capables de capter des informations d'intérêt (température, pression, timestamp⁵...), de les traiter, de les analyser puis les transmettre à d'autres nœuds ou à d'autres entités du réseau. Ces nœuds capteurs sont positionnés en zones (ou champs) de captage « *sensor fields* » (Figure 2). Chaque nœud collecte des données et les transfère au nœud particulier appelé passerelle ("sink" en anglais ou puits) par le moyen d'une topologie multi-sauts. Le nœud puits envoie ensuite ces données à l'ordinateur central pour les traiter et prendre des décisions.

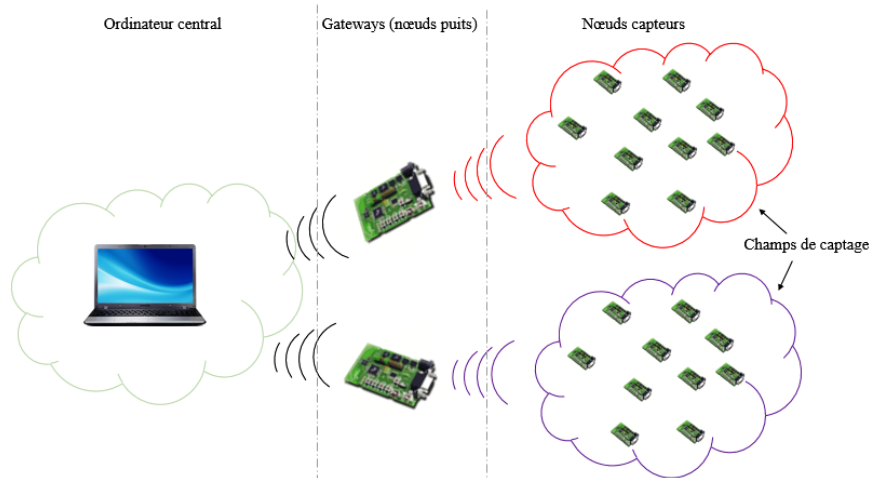


Figure 2 : Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

⁵ Timestamp : Estampille temporelle

Par définition, un réseau de capteurs est composé de deux types de nœuds : les puits ou passerelles (« Sink ») et les capteurs. L'architecture dans un réseau de capteurs dépend principalement des applications envisagées et surtout des techniques mises en œuvre pour acheminer les données entre les nœuds. La Figure 2 présente l'architecture générale des réseaux de capteurs sans fil et illustre comment ce type de réseau interagit avec le milieu extérieur. Nous allons présenter dans la section 1.2.3 les différentes architectures applicables aux réseaux de capteurs sans fil.

1.2.1 Architecture physique d'un capteur

Un capteur est composé de quatre unités de base : l'unité d'acquisition ou de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité de contrôle d'énergie sur lequel reposent les trois éléments cités.

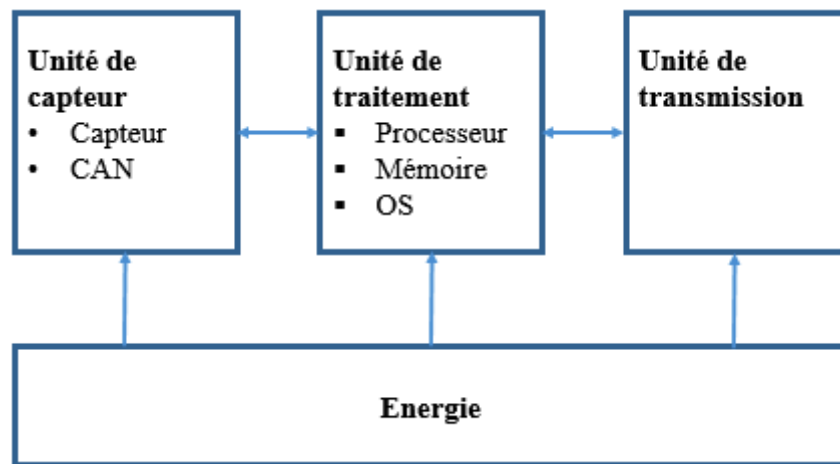


Figure 3 : Composition d'un capteur

- **L'unité d'acquisition** : l'unité d'acquisition est composée d'un capteur et souvent d'un Convertisseur Analogique/Numérique (CAN). Le capteur met à la disposition du convertisseur les signaux analogiques captés. Ces signaux sont en réalité des grandeurs physiques (vibration, pression, température, etc.). Le CAN va se charger de transformer ces signaux analogiques en signaux numériques compréhensibles par l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement** : l'unité de traitement est constituée d'une mémoire pour le stockage des données, d'un processeur associé parfois à un système d'exploitation. La partie processeur se charge de la transmission de l'information entre les nœuds du réseau. Cela implique la gestion des protocoles de communication. Dans certains capteurs dits intelligents, l'unité de traitement a la capacité d'effectuer certains calculs sur les données pour faciliter la tâche du nœud puits. L'unité de traitement se charge de récupérer les données en provenance de l'unité d'acquisition et de les transmettre à l'unité de transmission.
- **L'unité de transmission** : cet élément du capteur se charge des émissions et réceptions de l'information sur le support de communication radiofréquence, optique (nœuds Smart Dust [3]), ultrasons ou autres. Les supports de communications radiofréquence sont très sensibles aux interférences. L'utilisation des circuits électroniques dédiés à cet effet la rendent coûteuse en énergie. La liaison optique est très robuste aux interférences électriques mais la communication ne peut se faire qu'en ligne de vue car sensible aux obstacles. Les ultrasons sont eux utilisés sous l'eau.
- **L'unité de contrôle d'énergie** : Les trois unités citées précédemment sont alimentées par la même source d'énergie comme le montre la Figure 3. L'énergie est donc un facteur important

pour la survie d'un capteur dans un réseau. Les capteurs sont équipés d'une ressource énergétique (généralement une batterie) limitée et nécessaire car non remplaçable. Afin de pérenniser la durée de vie du capteur et donc du réseau, les nouveaux capteurs intègrent une unité de contrôle de l'énergie. Elle est donc la partie vitale du système. Elle doit partager de façon optimale l'énergie disponible aux autres éléments en diminuant par exemple les dépenses inutiles d'énergie ou en mettant en veille les éléments inactifs.

1.2.2 La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

La consommation d'énergie est un problème majeur dans les réseaux de capteurs sans fil parce qu'ils sont souvent autonomes. La plupart du temps, les nœuds sont alimentés par une batterie et dans certaines situations, leur remplacement ou recharge sont impossibles. Cela signifie que la vie du réseau (du capteur) dépendra de la durée de vie de la batterie. Il est donc crucial de porter une attention particulière sur ce paramètre.

Le coût énergétique dans l'état de réception est souvent plus important que dans l'état d'émission [4] pour les technologies de transmission utilisées dans ce type de réseau. La couche physique ne pouvant prédire l'arrivée d'une trame peut rester longtemps en réception (en consommant de l'énergie) dans l'attente d'une éventuelle trame. Une collision entre deux trames entraîne plus tard une réémission qui va nécessiter de l'énergie supplémentaire. Les messages de signalisation utilisés pour la réservation d'un canal (RTS/CTS), pour l'acquittement des trames reçues (ACK/NACK) peuvent engendrer un volume de messages important nécessitant de l'énergie supplémentaire.

La méthode d'accès (MAC : *Medium Access Control*) mise en place permettra de gérer les liens radio. Elle va mettre en place un mécanisme d'échange en vue de réduire le temps en réception d'un nœud. Elle va aussi définir si les trames doivent être transmises en mode unicast, c'est-à-dire envoyées à un destinataire ou en mode broadcast, c'est-à-dire diffusées à tous les nœuds. Elle doit assurer un taux d'interférence et une probabilité de perte de trames négligeable.

1.2.3 La topologie des réseaux de capteurs sans fil

La topologie vise à définir l'organisation des éléments dans le réseau. Plusieurs topologies sont possibles dans les réseaux à communication radio. Pour ce qui concerne les réseaux de capteurs sans fil, deux topologies sont principalement envisagées. Ce sont les topologies en étoile (*star*) et la topologie maillée (*mesh*).

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont généralement disposés de façon aléatoire. Mais ils peuvent avoir des positions spécifiques comme c'est le cas, dans un contexte de localisation, où il est indispensable de connaître les positions de certains nœuds fixes : les nœuds ancres. La fonction de ce nœud particulier sera développée plus tard. Pour gérer de façon optimale leur position dans le plan, il faudra avant tout trouver un compromis entre les contraintes intrinsèques aux nœuds (énergie, débit sur les liens, CPU, RAM...) et les exigences des applications à mettre en œuvre. La topologie mise en œuvre doit être dynamique car l'on dispose de nœuds mobiles et fixes. Ces nœuds doivent s'auto-organiser afin de fournir le service escompté.

Dans cette section, nous allons présenter les principales topologies applicables aux réseaux de capteurs sans fil. Cette démarche nous permettra de définir la topologie adaptée dans un contexte de ranging et de localisation.

1.2.3.1 Les topologies en étoile

L'organisation en étoile est la topologie de base des réseaux de capteurs sans fil. La topologie en étoile est basée sur l'existence d'un coordinateur (ou station de base) qui joue le rôle de « chef » dans le réseau. Tous les nœuds du réseau sont regroupés autour de ce coordinateur à un saut. Les échanges sont bidirectionnels mais se font uniquement entre le coordinateur et les autres nœuds du réseau (Figure 4). Cette topologie se distingue par sa simplicité. Elle assure une faible consommation d'énergie lors des échanges, une faible latence avec le coordinateur et est par conséquent très performante. Le coordinateur doit toutefois, être assez robuste (au niveau du traitement des données, des pannes et en termes de source énergétique) pour assurer une gestion optimale du réseau.

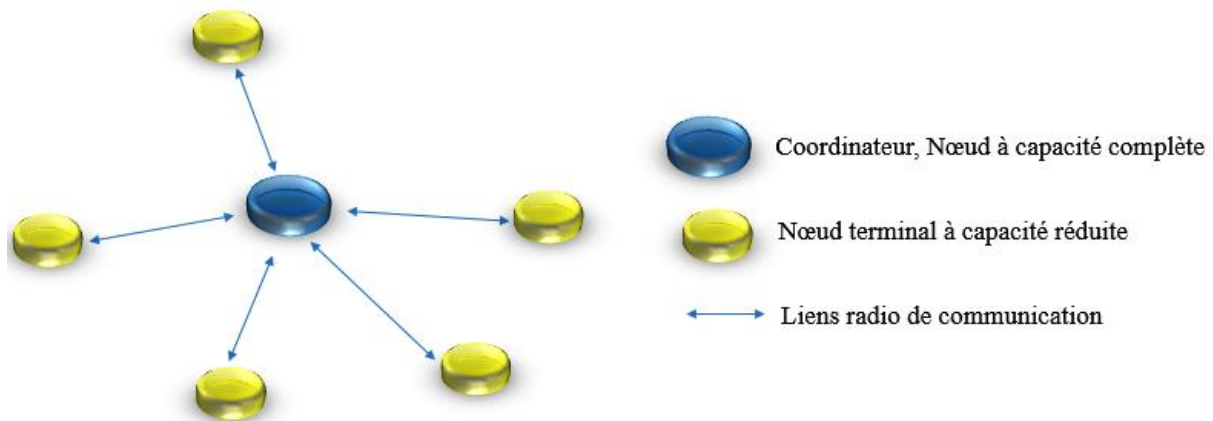


Figure 4 : Topologie réseau WPAN en étoile [5][6]

Cette topologie est parfaitement adaptée pour les outils de localisation centralisée où les nœuds terminaux à capacité réduite joueront le rôle d'ancre (nœud fixe) et le coordinateur (nœud mobile) cherchera à se localiser dans le réseau. Comme son fonctionnement dépend du coordinateur, une panne de ce dernier pénalisera le réseau dans son ensemble.

1.2.3.2 La topologie maillée (*mesh*)

Elle est aussi appelée topologie multi-saut. Tous les nœuds du réseau sont connectés en point à point sans hiérarchie et sans infrastructure c'est-à-dire sans contrôle centralisé. Cette topologie est très souvent présente dans les réseaux de type MANET (*Mobile Ad hoc NETwork*). Les nœuds échangent les uns avec les autres, dès l'instant où ils sont situés à la distance supportée par la couche physique de transmission (portée radio). La Figure 5a illustre cette topologie.

Un nœud du réseau a la possibilité d'utiliser un autre nœud intermédiaire à portée pour transmettre sa trame à un nœud destinataire final de la trame, même s'il est hors de sa portée de transmission de ce nœud final. C'est le principe du multi-saut. Pour cela, chaque nœud doit chercher à découvrir régulièrement le réseau et chercher aussi à se faire connaître par les autres nœuds. Cela évite de pénaliser le réseau qui, en cas d'incident sur un nœud, isole le nœud en panne et assure très rapidement la pérennité du réseau.

La topologie maillée de la Figure 5 est composée de nœuds reliés entre eux et opérant comme des routeurs. Tous les nœuds fonctionnent d'ailleurs ainsi. Chaque nœud envoie ses informations à son voisin après avoir pris connaissance du meilleur chemin pour transmettre les données jusqu'au coordinateur figure 5b) s'il joue le rôle de puits. La flexibilité et robustesse sont certains atouts de cette topologie. Idéalement, elle est peu sensible au changement du nombre de nœuds du réseau.

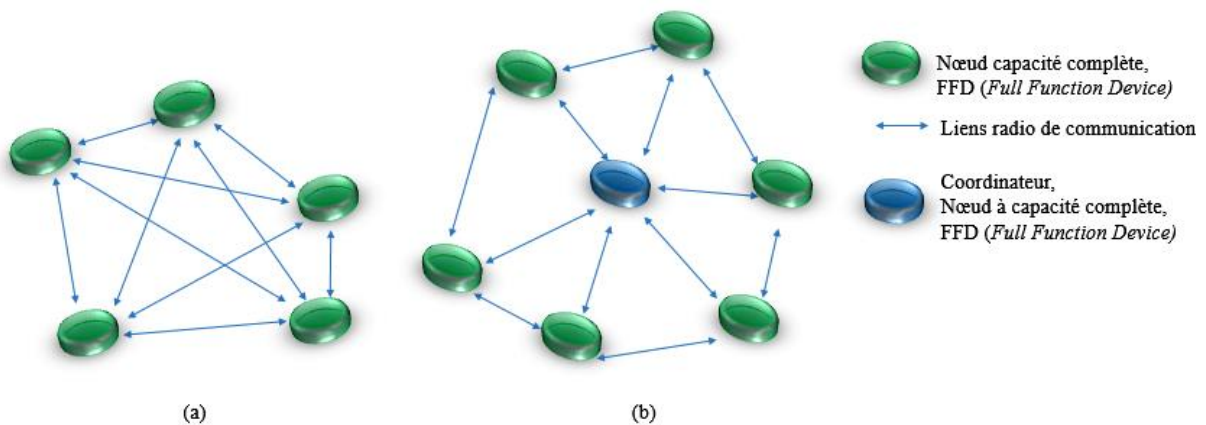


Figure 5 : Topologie réseau WPAN⁶ entièrement maillée (*Full mesh*) sans coordinateur (a) et partiellement maillé avec coordinateur (b) [5][6]

La solution maillée offre d'énormes potentialités pour les applications destinées à la localisation. Elle permet d'envisager des procédures pour la mesure du ToF entre nœuds voisins sans contraintes particulières. Ces procédures peuvent être par exemple la diffusion de trame de ranging (pas obligatoirement par un coordinateur) par un nœud vers tous les autres (mobile et fixe) à portée (Figure 5a). Cette particularité peut être aisément exploitée dans un contexte de localisation de nœuds, nous le verrons d'ailleurs par la suite.

1.2.3.3 La topologie *cluster-tree*

La topologie *cluster-tree* est divisée en plusieurs zones appelées "clusters". Un cluster est composé d'un nœud spécifique appelé "*cluster-head*" (ou tête de cluster) et d'autres nœuds. Ces derniers ne peuvent échanger qu'avec leur tête de cluster. Cette tête de cluster est ensuite chargée de transmettre les données reçues vers le coordinateur du réseau.

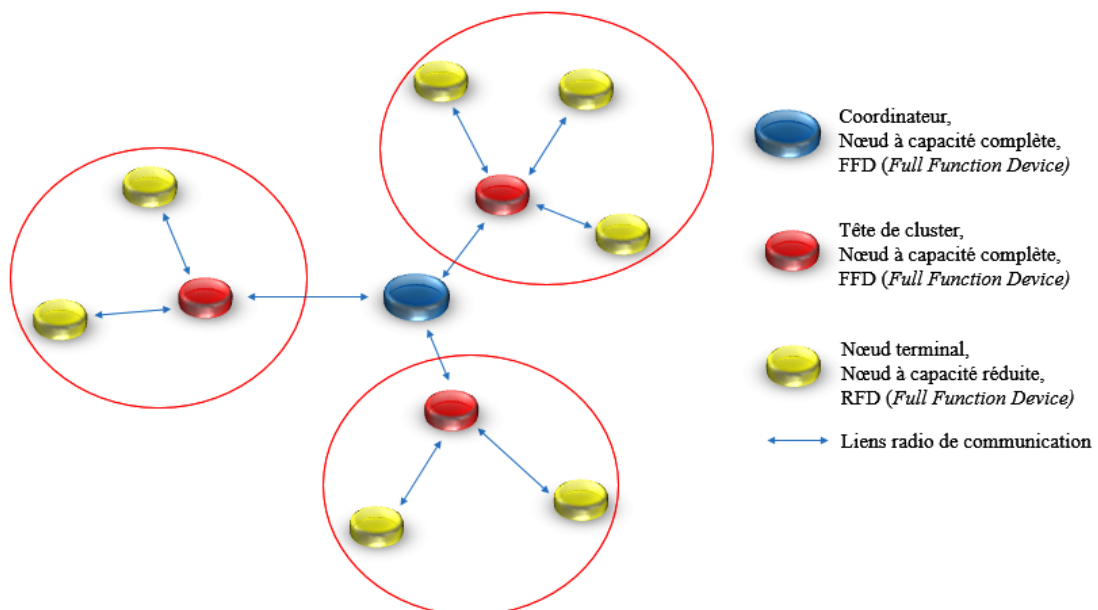


Figure 6 : Topologie *cluster-tree*

⁶ WPAN : Wireless Personal Area Network

C'est une topologie hiérarchisée suivant le rôle de chaque élément du réseau (nœuds, têtes de cluster et coordinateur). Les changements de hiérarchie sont envisageables entre les têtes de cluster et les nœuds en fonction de l'énergie que dispose le nœud. Cette particularité a pour but d'harmoniser le niveau d'énergie de tous les nœuds d'un cluster. Cela permet d'éviter qu'un nœud soit exclu du réseau pour cause de manque d'énergie mais surtout de mieux augmenter la durée de vie du réseau. Cependant, cette topologie ne serait pas adéquate dans un contexte de localisation où tous les nœuds ont besoin de communiquer avec tout le monde. Dans cette topologie, un nœud appartenant à un cluster ne peut échanger avec un autre nœud d'un autre cluster. Cette topologie s'apparente également à un arbre dont la racine est le coordinateur, ses fils sont les têtes de clusters, les petits-fils sont ici les nœuds terminaux ou feuilles.

1.3 Les caractéristiques du signal exploitées pour les mesures de distance

Dans un contexte de localisation dans les réseaux sans fil, on distingue deux types de nœuds :

- les ancres (nœuds fixes) : dans un contexte de localisation, on définira une ancre comme un nœud dont la position est connue dans le plan (ou l'espace pour la localisation 3D). Ce nœud est généralement fixe, bien que ce ne soit pas une obligation : si une ancre est mobile, le système doit connaître sa position en tout instant nécessaire du point de vue de l'application la position des nœuds fixes peut être connue ou prédéfinie, et les nœuds mobiles chercheront à se localiser via ces ancres. L'idée principale du protocole de ranging est la suivante : chaque nœud mobile diffuse sa trame et se met en réception pendant une période définie dans l'attente d'une trame de retour diffusée dans le but d'effectuer le ranging avec ce nœud qui répond. Nous nous proposons d'améliorer les performances du ranging en apportant une attention particulière sur le nombre de trames échangées. Elles portent souvent le nom de nœuds de référence.
- les tags (nœuds mobiles) : ces nœuds cherchent à se localiser dans le réseau en fonction des ancres. Ils portent aussi le nom de nœuds sources en raison du fait qu'ils peuvent être initiateurs des échanges.

Le mécanisme de localisation commence d'abord par la phase de ranging (Figure 7), qui est le mécanisme d'évaluation de la distance entre les nœuds. Dans cette phase, le nœud mobile initie des échanges avec les autres nœuds (fixes ou mobile). Il procède ensuite à un calcul qui lui permettra d'estimer la distance qui le sépare des autres nœuds. Ce calcul de la distance peut être centralisé. Dans ce cas, les informations de ranging obtenues seront envoyées à un serveur dédié pour l'évaluation de la distance. Ce calcul peut être aussi distribué ou local. Il est distribué lorsque plusieurs mobiles collaborent entre eux et avec les ancres. Lorsque le nœud mobile effectue lui-même le calcul, on dit que le calcul de ranging est local. C'est dans cette première étape de ce processus que se situe notre travail.

La deuxième étape consiste à déterminer la position du nœud à partir des données de ranging reçues. Le nœud utilisera un algorithme de localisation comme le *IRingLa*, la trilatération, la triangulation ou tout autre algorithme de localisation.

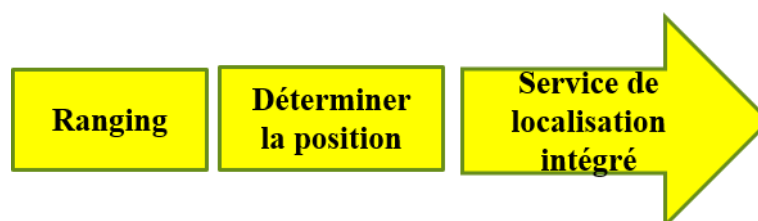


Figure 7 : Processus de localisation

Dans ce qui suit, nous allons faire une étude des principales métriques pour la localisation.

1.3.1 Les principales métriques de ranging

Dans un contexte de localisation, on appelle métrique une technique qui permet d'évaluer la distance entre des nœuds. Dans la littérature, plusieurs métriques sont mises à la disposition des systèmes de localisation. Ces métriques sont scindées en deux grandes familles : les métriques de type *Range-Free* et les métriques de type *Range-Based* (Figure 8).

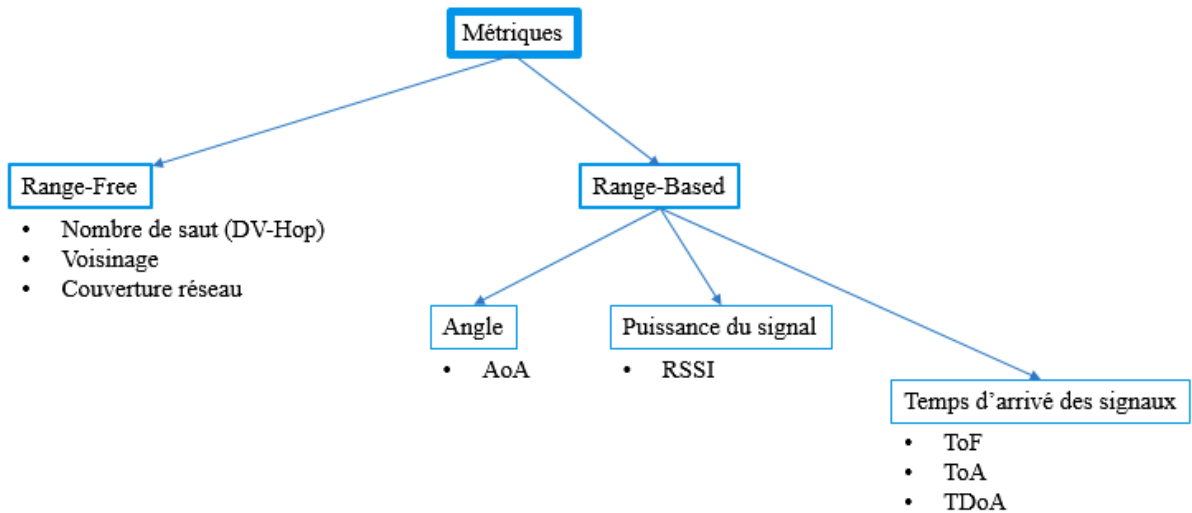


Figure 8 : Les principales métriques pour la localisation

1.3.1.1 Les métriques basées sur les techniques *Range-Free*

Les métriques basées sur les techniques de localisation de type *Range-Free* ont la réputation d'être peu fiables par rapport à la localisation de type *Range-Based*. L'estimation de la position est relative. Elle est très peu précise. La position du nœud mobile est obtenue en analysant la position des nœuds fixes en termes de zone de couverture, de connectivité du réseau et de proximité [7]. Elle est économique en matériel et très facile à mettre en œuvre car se basant sur des hypothèses de connectivité entre les nœuds du réseau. Elle est surtout adaptée pour les réseaux de capteurs sans fil à grande échelle.

Dans la littérature, plusieurs algorithmes comme CPE (*Convex Position Estimation*) [8], Centroid [9], et le plus répandu DV-hop (*Distance Vector-hop*) dans sa version de base [10] [11] ou dans des versions améliorées telles que [12][13] ont été proposés.

Le protocole DV-hop est le plus utilisé dans la famille des techniques de type *Range-Free*. Il est facile à mettre en œuvre et se base sur le nombre de sauts séparant les nœuds.

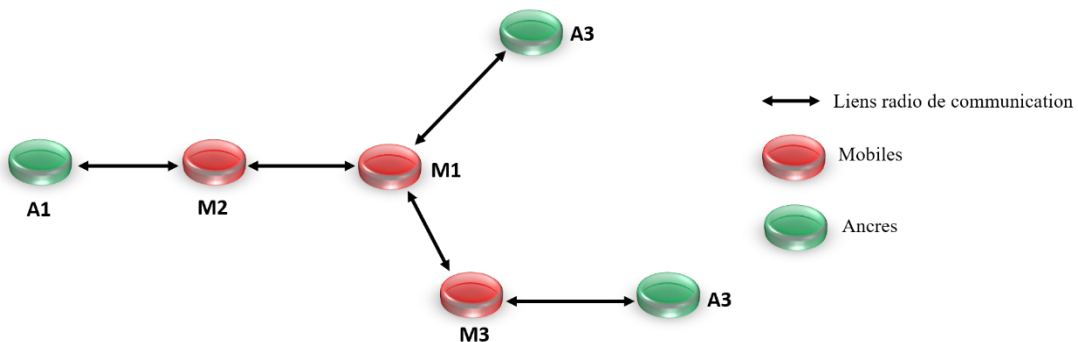


Figure 9 : Principe de DV-hop

Dans l'exemple de la figure 9, nous avons trois ancres (A1, A2 et A3) et trois nœuds mobiles (M1, M2 et M3). A l'aide d'un protocole de diffusion, chaque ancre diffuse sa position, à tous les nœuds. L'ancre A2 va connaître la position de A1 et A3, et saura par exemple qu'il est à 3 sauts de A1 et à trois sauts aussi de A3. A partir de là, chaque ancre calcule sa distance moyenne par saut (2 m par exemple) qui sera utilisée comme distance moyenne par saut pour tous les nœuds. Cette technique est très peu précise. L'erreur de localisation est de l'ordre de 30% [13] de la portée radio d'un nœud. Le principal problème de cette faible précision est lié au problème du couple saut-distance. Les nœuds avec le même nombre de saut estimeront la même distance pour d'autres nœuds même s'ils sont à une distance différente.

Des techniques se basant sur des mesures convertibles en distance peuvent améliorer la précision. C'est le cas des techniques *Range-Based*.

1.3.1.2 Les métriques basées sur les techniques *Range-Based*

Contrairement aux techniques *Range-Free*, les techniques *Range-Based* se basent sur des mesures physiques (grandeurs physiques) que peuvent fournir les différents nœuds. Le processus de positionnement dans ce cas consistera d'abord à évaluer la distance ou l'angle en convertissant ces mesures issues des signaux physiques. Cette évaluation de la distance/angle est très importante car elle sera utilisée pour le positionnement des nœuds et par l'algorithme de localisation.

Plusieurs techniques sont utilisées pour évaluation de la distance ou l'angle. Certaines sont précises, mais onéreuses car nécessitant du matériel supplémentaire, de l'énergie, etc. D'autres ne nécessitent aucun matériel supplémentaire mais sont peu précises. Les informations nécessaires pour l'évaluation de la distance ou de l'angle sont déjà disponibles sur la plupart des nœuds.

Dans les sections suivantes, nous allons étudier les principales techniques *Range-Based* utilisées pour évaluer la distance ou l'angle. Parmi ces techniques on peut citer le AoA (*Angle of Arrival*), ToA (*Time of Arrival*), TDoA (*Time Difference of Arrival*), RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) et le ToF (*Time of Flight*).

1.3.1.2.1 AoA (*Angle of Arrival*)

Il est possible de localiser un nœud en utilisant des angles. La technique AoA (*Angle of Arrival*) permet de mesurer l'angle incident d'un signal en provenance d'un nœud mobile (Figure 10). Pour cela, le nœud fixe (chargé de mesurer l'angle) doit être équipé de plusieurs récepteurs (par exemple l'ultrason) provoquant une grande complexité des systèmes, particulièrement pour la conception des têtes de réception.

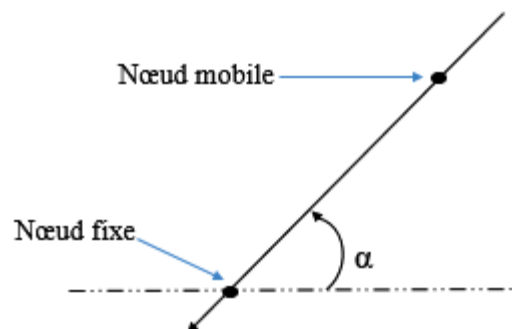


Figure 10 : Angle incident

Lorsque le nœud fixe reçoit le signal incident, il utilise dans le cas des ultrasons, la phase signal au niveau de chaque récepteur pour obtenir l'angle d'arrivée du signal [14].

D'autres procédés peuvent être utilisés dans le cas de la radio, comme la technique la plus courante dans la mesure de l'angle d'arrivée basée sur le fonctionnement d'une antenne linéaire et uniforme (ULA) (Figure 11).

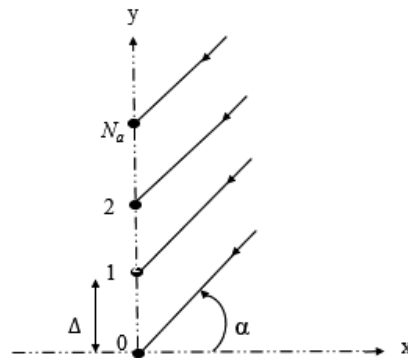


Figure 11 : Mesure avec un réseau d'antenne ULA ($N_a=3$) [15]

En supposant que la propagation radio est plane, deux nœuds voisins reçoivent le signal avec un décalage de phase donné par l'équation (1) :

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta \sin \alpha}{\lambda} \quad (1)$$

Où Δ est l'emplacement inter-nœuds du réseau qui dispose N_a nœuds, et λ la longueur d'onde [15].

La mesure AOA est très peu sensible aux problèmes liés à la synchronisation et à la précision des horloges. La nécessité de disposer du matériel supplémentaire représente l'inconvénient principal de cette technique. Des travaux actuels sont menés dans notre équipe IRT de l'IRIT - site de Blagnac - sur la localisation par angle d'arrivée de signaux sonores [16].

1.3.1.2.2 Le temps de parcours du signal : ToF (Time of Flight) / ToA (Time of Arrival)

La mesure du temps de propagation des signaux ToF/TOA, est l'une des techniques les plus prometteuses dans les systèmes actuels de localisation. Elle consiste à mesurer le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal en fonction d'une référence temporelle locale (généralement celle de l'horloge du récepteur). Cette technique exige une synchronisation parfaite des nœuds.

Le signal qui véhicule les messages se propage à la vitesse proche de la lumière. Pour la distance parcourue par le signal, il faudra tout d'abord matérialiser le temps écoulé par le signal depuis son émission à sa réception par le nœud récepteur. La Figure 12 illustre cette approche.

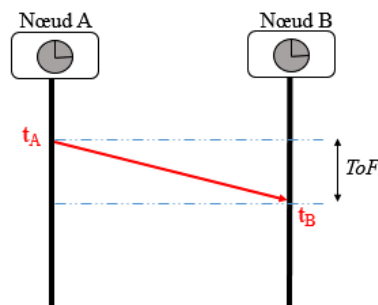


Figure 12 : Temps de vol du signal

La Figure 12 représente le temps de vol. C'est la différence entre l'instant de réception du nœud B (t_B) et l'instant d'émission du nœud A (t_A) comme représenté dans l'équation (2). La distance est obtenue grâce à l'équation (3).

$$ToF = t_B - t_A \quad (2)$$

$$Distance = ToF * C \quad (3)$$

C = vitesse de propagation du signal ($\approx 3.10^8$ m/s).

Les difficultés principales de cette technique se situent au niveau de la synchronisation des horloges des différents nœuds et les situations de non-visibilité (NLOS : *Non Line Of Sight*) qui ont tendance à biaiser les mesures (cf. section 2.1.4.2). Plusieurs protocoles basés sur ce principe ont été étudiés dans le but de remédier au problème de synchronisation des nœuds. Ces protocoles seront étudiés plus loin dans ce chapitre 1.

1.3.1.2.3 TDoA (Time Difference of Arrival)

La figure illustre le principe du TDoA. Prenons le cas d'un nœud mobile émetteur et deux nœuds fixes (ancres) synchronisés et en réception.

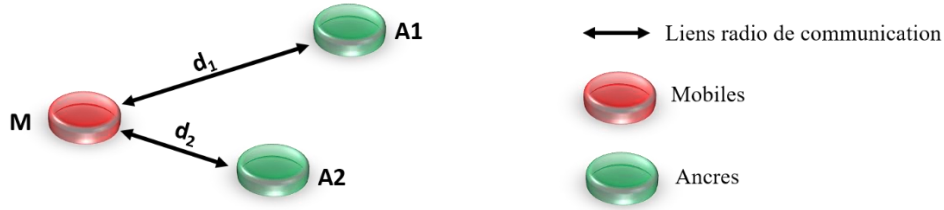


Figure 13 : Mesures de la différence d'instant d'arrivée (TDoA) avec 2 ancres et 1 mobile

Contrairement à la métrique ToA, la *TDoA* (Time Difference of Arrival) ne nécessite pas de synchronisation entre le nœud émetteur (nœud mobile) et le nœud récepteur (fixe). Elle exige la synchronisation entre les nœuds fixes uniquement.

Pour l'évaluation de la distance, les mesures TDoA vont, dans un premier temps, utiliser l'approche classique de la mesure du temps de vol (*tof*) des signaux reçus par chaque ancre (équation (3) et (4)). Ils peuvent aussi juste échanger de tof_1 et tof_2 mesurés entre les 2 nœuds fixes.

$$tof_1 = t_M - t_{A1} \quad (4)$$

$$tof_2 = t_M - t_{A2} \quad (5)$$

Les systèmes TDoA vont par la suite exploiter la différence entre les instants d'arrivée aux nœuds ancres (fixes) pour le positionnement. Ce calcul correspond à un délai qui optimise la fonction de corrélation croisée. On connaît la position de chaque récepteur (nœuds fixes), on peut dans ce cas déduire une estimation de la position de l'émetteur du signal (nœud mobile) à condition que tous les récepteurs fixes soient synchronisés. La TDoA entre les nœuds d'un couple de récepteurs 1 et 2 s'exprime par la formule de l'équation (6).

$$TDoA = t_{A1} - t_{A2} = \frac{d_1 - d_2}{c} \quad (6)$$

d_1 et d_2 représentent respectivement la distance entre le mobile et les ancres 1 et 2

Une autre technique pour les mesures de TDoA est basée sur l'inter-corrélation généralisée illustrée dans l'équation (7).

$$TDoA = \arg \max \left| \int_0^T r_1(t) r_2(t_{Ai} + t) dt \right| \quad (7)$$

$r_j(t)$ = signal reçu par l'ancre r_j

T = intervalle d'observation.

[17] et [18] donnent plus d'information sur la technique de l'inter-corrélation généralisée.

Les métriques qui exploitent la mesure du temps de vol des signaux seront détaillées plus tard.

1.3.1.2.4 RSSI (Received Signal Strength Indicator)

Contrairement à la mesure TDoA ou encore le ToF, la mesure RSSI (ou RSS) montre une indifférence totale face aux problèmes liés à la dérives des horloges des nœuds et la précision de leurs horloges.

La technique RSSI exploite le niveau de puissance du signal reçu par un nœud. Cette information est d'ailleurs disponible sur la plupart des composants radio. Cette technique évalue la distance entre les nœuds à partir d'une information sur la puissance du signal reçu. Cette information est associée à un modèle de propagation dans l'espace. La puissance du signal reçu par un nœud dépend fortement de la distance d qui sépare le nœud émetteur et le récepteur. Elle est exprimée par l'équation (8) [19] :

$$P_r = P_t * G_t * G_r * \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (8)$$

Avec :

P_t : puissance du signal transmis

P_r : puissance du signal reçu

G_t : gain de l'émetteur

G_r : gain du récepteur

d : distance entre les antennes des équipements.

λ : longueur d'onde

La puissance du signal reçu par le nœud est convertie par le transceiver radio en un indicateur de puissance du signal reçu. Cet indicateur de puissance reçu est défini comme le rapport de la puissance reçue à la puissance de référence P_{ref} qui est généralement égale à = 1mW.

$$RSSI_{dBm} = 10 * G_t * \log \frac{P_r}{P_t} \quad (9)$$

Un autre modèle consiste à tenir compte de l'environnement dans lequel les équipements sont disposés. Ce modèle part du principe que la puissance du signal se dégrade en fonction du milieu qu'il traverse. Une étude approfondie [20] a montré que la puissance du signal baisse en fonction de l'augmentation de la distance parcourue par le signal.

$$RSSI = -(10 * n * \log d + A) \quad (10)$$

Avec :

n = Constante de propagation du signal,

d = Distance entre les antennes des équipements,

A = Puissance du signal reçu à une distance égale à 1 mètre.

La puissance reçue augmente avec le RSSI. La distance d n'est pas aussitôt proportionnelle au RSSI. C'est dire que toute modification de la valeur initiale du signal conduira forcément à de nouvelles valeurs de RSSI. Dans des situations réelles, la répartition idéale des puissances reçues n'est pas réalisable, parce que la propagation du signal est fortement troublée par beaucoup de facteurs que nous allons expliquer dans le chapitre 2.

1.3.1.2.5 Conclusion

Pour ce qui nous concerne, nous allons utiliser les métriques basées sur les techniques *Range-Based*. Elles sont plus fiables que les techniques *Range-Free* car elles se basent sur des mesures facilement convertibles en distance. Parmi ces techniques, nous avons cité le RSSI qui exploite l'intensité du signal reçu (disponible sur la plupart des composants radio) pour mesurer la distance. D'autres techniques, plus précises, exploitent la mesure du temps de vol du signal pour estimer la distance entre les nœuds.

Dans la section suivante, nous allons présenter plus en détail les protocoles qui exploitent la mesure du temps de vol du signal pour évaluer la distance entre les nœuds, notre choix s'oriente vers ces techniques.

1.4 Les protocoles de mesure du temps de vol du signal

Plusieurs protocoles de communication permettent d'obtenir des informations sur la mesure du temps de vol du signal. Ces protocoles sont utilisés en fonction des applications envisagées, de la topologie du réseau mais surtout des contraintes liées à la synchronisation des équipements.

Dans une approche basée sur la mesure du ToF du signal, la précision de la mesure du temps est un facteur important. Il est indispensable pour un tel système que les équipements fonctionnent comme s'ils étaient cadencés par la même horloge. Dans les réseaux de capteurs sans fil, cette approche ne serait pas possible en raison du fait que les nœuds sont par définition sur des horloges différentes.

Dans ce qui suit, nous présenterons le fonctionnement de ces protocoles de communication.

1.4.1 Les protocoles de références de ranging

1.4.1.1 Le protocole OWR (*One Way Ranging*)

1.4.1.1.1 Le principe de base

Le protocole *One Way Ranging* (OWR) ou « protocole d'aller simple » est un protocole très simple à mettre à œuvre. Un seul échange de 2 messages suffit pour obtenir les informations de mesure de distance. La Figure 14 illustre cette double émission. Le nœud A initiateur de l'échange à destination du nœud B dispose à l'issue de l'échange des 2 trames, des différents instants d'émission et de réception, t_A et t_B , estampillés par les deux nœuds A et B, une fois les informations réunies au niveau de A, par une transmission de B vers A.

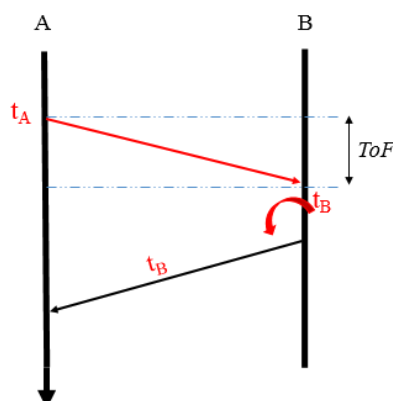


Figure 14 : One Way Ranging

Ce protocole est absolument adapté pour des équipements parfaitement synchrones. Il exige que les nœuds soient strictement synchronisés. A partir de là, il sera possible d'évaluer la mesure du temps de vol en se basant sur les instants d'émission et d'arrivée du signal. Le temps de vol (équation 11) pourra être ainsi estimé et le calcul de la distance aussi (équation 12).

$$ToF_{OWR} = t_B - t_A \quad (11)$$

$$Distance = ToF_{OWR} * C \quad (12)$$

Le protocole OWR est soumis à un bruit de détection n de l'instant t_B , pour le nœud B en réception. Il est aussi affecté par l'erreur de synchronisation entre les nœuds lors de l'initiation de la session de ranging. Si on définit s_A et s_B comme l'erreur temporelle de synchronisation des nœuds A et B par rapport à une référence d'horloge, alors le temps de vol estimé par le nœud B pourra s'écrire :

$$ToF_{OWR} = \varepsilon_A (ToF_{OWR} + S_A - S_B + n_B) \quad [21] \quad (13)$$

ε : erreur de synchronisation du nœud A

La mise en œuvre du protocole OWR avec des nœuds synchronisés nécessite généralement la mise en place d'un nœud coordinateur (couteux) pour la synchronisation des nœuds du réseau.

1.4.1.2 Le protocole TWR (Two Way Ranging)

En absence de synchronisation entre les nœuds, le nœud initiateur de la session de ranging peut utiliser sa propre horloge comme horloge de référence comme l'illustre la Figure 15. Chaque nœud estampille ses propres instants en fonction de sa propre horloge. Le nœud initiateur mesure le temps de vol « aller-retour » du signal. C'est le cas du protocole *Two-Way Ranging* (TWR).

1.4.1.2.1 Le principe de base

Le protocole TWR est basé sur un ensemble de trois messages dont deux (START et ACK) nécessaires pour l'estampillage et l'obtention des informations de la mesure du temps de vol (Figure 15).

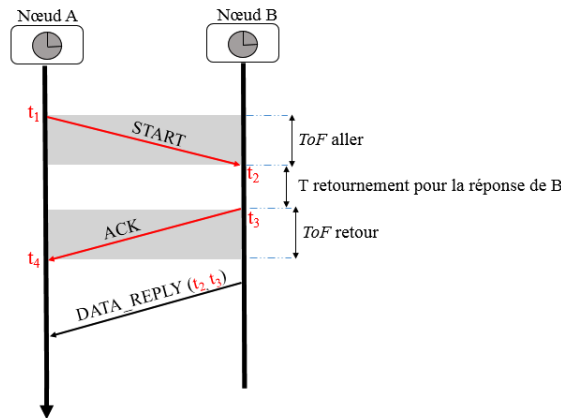


Figure 15 : Protocole TWR effectuant la mesure du ToF entre deux nœuds « asynchrones »

Dans ce protocole, le nœud A, initiateur de l'échange envoie sa première trame (START) et marque son instant d'émission t_1 . A la réception de cette trame, le nœud B marque à son tour l'instant de réception t_2 de cette trame puis après un certain temps envoie une trame d'acquittement (ACK) tout en marquant son instant d'envoi t_3 . Le nœud A, à la réception de la trame ACK marque l'instant de réception t_4 . Les quatre estampilles temporelles sont rassemblées du côté du nœud A après réception de la trame DATA_REPLY contenant les estampilles t_2 et t_3 du nœud B. Cette dernière trame permettra au nœud A de calculer le temps de vol noté dans l'équation (14) et la distance (équation 15).

$$ToF_{TWR} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (14)$$

$$Distance = ToF_{TWR} * C \quad (15)$$

Le principal inconvénient de ce protocole reste l'absence d'horloge commune. Les nœuds ne disposent d'aucune information sur l'état de l'horloge du nœud voisin. Ainsi une surestimation ou sous-estimation de la mesure du temps vol pourrait biaiser la mesure de la distance et donc de la position du nœud.

Une solution couteuse exige la présence du nœud coordinateur. Elle consiste à coordonner les communications à des intervalles de temps bien définis (*Time Slot*). Il faudrait souligner que dans ce protocole, tout type de nœud (coordinateur et/ou nœud simple) peut prendre part à une session de ranging (Figure 16).

Définition : *session de ranging. Une session de ranging, c'est lorsque deux ou plusieurs nœuds échangent des trames dans le but d'évaluer la distance qui les sépare. On considère une session de ranging terminée lorsque le nœud initiateur de la session de l'échange dispose de toutes les informations nécessaires pour le calcul de la distance. Exemple, dans le protocole TWR de base, une session de ranging est composée de trois trames.*

Les nœuds dans un tel système coordonné ont connaissance de l'horloge du coordinateur qui est la référence temporelle du réseau.

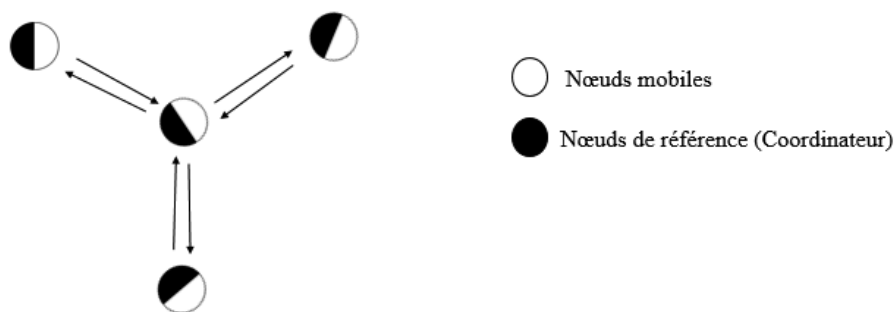


Figure 16 : Protocole TWR effectuant la mesure du ToF avec des coordinateurs et des nœuds simples « asynchrones »

Dès que le réseau est synchronisé, les nœuds ont une connaissance du début des slots attribués par le coordinateur pour établir les échanges. Le coordinateur doit être à portée de tous les nœuds pour synchroniser finement ces derniers.

Le protocole TWR est facile à mettre en œuvre et ne nécessite généralement pas de matériels supplémentaires pour son fonctionnement. Sauf si on désire des estampillages très précis, ce qui impose des circuits d'horloges très performants. L'estimation de la distance souffre d'énormes imprécisions liées à la dérive des horloges des nœuds, exprimée en partie par millions (ppm). Elle est provoquée par la différence de fréquence entre les quartz des nœuds. Le problème de dérive des horloges est un facteur important qu'il faudra considérer pour obtenir une meilleure précision du ranging. Ce problème est d'ailleurs commun à tous les systèmes réels qui exploitent les mesures de temps de vol. Ils sont toujours soumis à des erreurs liées aux dérives d'horloges qui affectent la précision du ranging.

1.4.1.3 Le protocole SDS-TWR (*Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging*)

1.4.1.3.1 Le principe de base

Afin de réduire le problème de précision de ranging lié à la dérive des horloges, le protocole SDS-TWR [22] se propose de symétriser la session de ranging en ajoutant un message supplémentaire à la session classique du protocole TWR (Figure 17).

- La composante **Double-sided** : le protocole est basé sur deux sessions symétriques du protocole TWR (TWR_{A-B} et TWR_{B-A}).

$$TWR_{A-B} : ToF_{A-B} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (16)$$

$$TWR_{B-A} : ToF_{B-A} = \frac{(t_6 - t_3) - (t_5 - t_4)}{2} \quad (17)$$

Ces deux équations (16 et 17) de ranging montrent la robustesse de SDS-TWR qui est capable d'obtenir des informations de deux sessions de ranging TWR avec seulement trois trames.

- La composante **Symmetrical** : le temps de réponse entre les deux nœuds est supposé être identique ($T_{retournement} A = T_{retournement} B$). Dans la réalité, on observera toujours une différence d'horloge parce que les nœuds sont par définition sur des quartz différents.

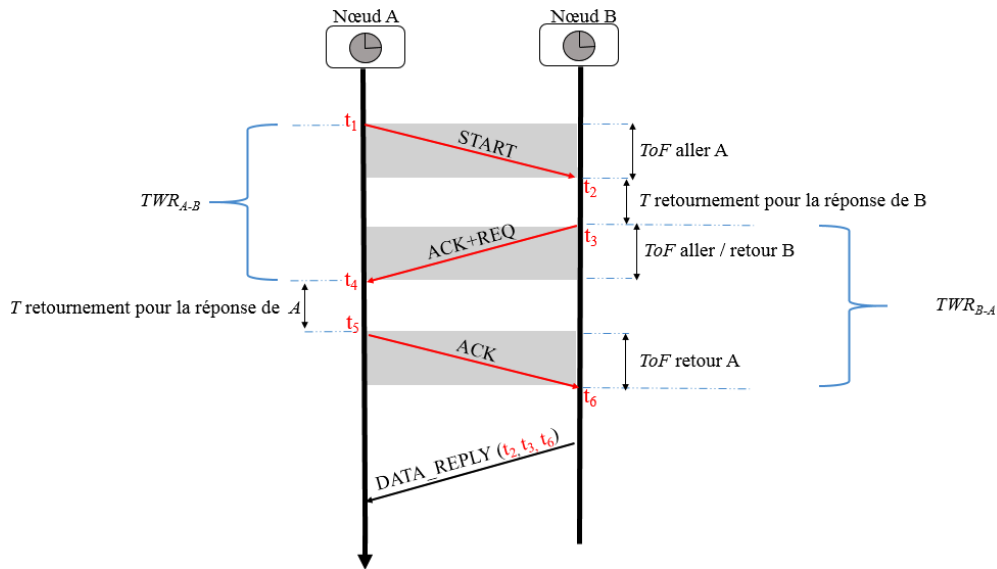


Figure 17 : Protocole SDS-TWR effectuant la mesure du ToF entre deux nœuds « asynchrones »

Chaque nœud marque ses propres estampilles d'émission et de réception. Toutes les estampilles seront rassemblées du côté du nœud A après la réception du message DATA_REPLY contenant les instants t_2, t_3 et t_6 du nœud B. Les calculs du temps de vol et de la distance sont obtenus grâce aux équations 18 et 19.

$$ToF_{SDS-TWR} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) + (t_6 - t_3) - (t_5 - t_4)}{4} \quad (18)$$

$$Distance = ToF_{SDS-TWR} * C \quad (19)$$

En raison du décalage de fréquence au niveau des nœuds, les temps de retournement pour la réponse de A et de B sont évalués de façon différente. Une moyenne des deux temps « aller-retour » de A et B permettra de réduire l'erreur ranging induit. Cette spécificité du protocole va donc réduire l'écart entre la distance réelle et celle qui sera mesurée par le protocole SDS-TWR.

Le protocole SDS-TWR de par son fonctionnement permet de réduire l'erreur de ranging. Cependant, il reste impossible à supprimer complètement cette erreur à cause du fait que les nœuds ont par définition

des horloges différentes. La moindre différence d'horloge pourrait biaiser la mesure des temps de réponse et provoquer une erreur de ranging.

Plusieurs variantes protocolaires ont été proposées dans la littérature. Dans la section suivante, nous allons présenter des améliorations des protocoles TWR et SDS-TWR.

1.4.2 Autres protocoles

Pour réduire ces problèmes d'imprécisions dans les protocoles ranging de base (TWR et SDS-TWR), plusieurs variantes protocolaires ont été étudiées dans la littérature. On peut citer entre-autres les protocoles ADS-TWR (*Asymmetric Double-Sided TWR*) [23], TWR-MM [24] (*Two-Way Ranging with Multiple Message*), SS-TWR-MA [25] (*Single-Sided Two-Way Ranging with Multiple ACK*), SDS-TWR-MA [26] (*SDS-TWR with Multiple Acknowledgement*), D-TWR [27] (*Double-Two-Way Ranging*) ou encore les protocoles SSDS-TWR (*Sequential Symetric Double-Sided Two-Way Ranging*) et PSDS-TWR (*Parallel Symetric Double-Sided Two-Way Ranging*) [28] qui sont des protocoles de l'équipe.

Dans [24], l'auteur introduit une nouvelle technique de ranging appelée le TWR-MM (*Two Way Ranging with Multiple Messages*) pour éliminer les erreurs de ranging. Cette technique se base sur l'émission de plusieurs messages entre les nœuds (ancree et mobile) suivant la version classique de TWR. Plusieurs trames sont échangées entre les nœuds. La moyenne des ToF obtenus est utilisée comme temps minimum (ToF_{min}) et est utilisée pour le calcul de la distance.

Le protocole TWR-MM de par son fonctionnement réduit considérablement les erreurs de ranging. Cependant, la surcharge protocolaire générée oblige les nœuds à consommer beaucoup d'énergie.

L'auteur dans [25] se base sur le même principe avec SS-TWR-MA. Le protocole améliore d'au moins 17% les performances du ranging par rapport au protocole classique tout en gardant une bonne précision au niveau du ranging. Dans cette version, l'auteur propose une version basée sur plusieurs trames d'acquittement pour une seule requête reçue (Figure 18).

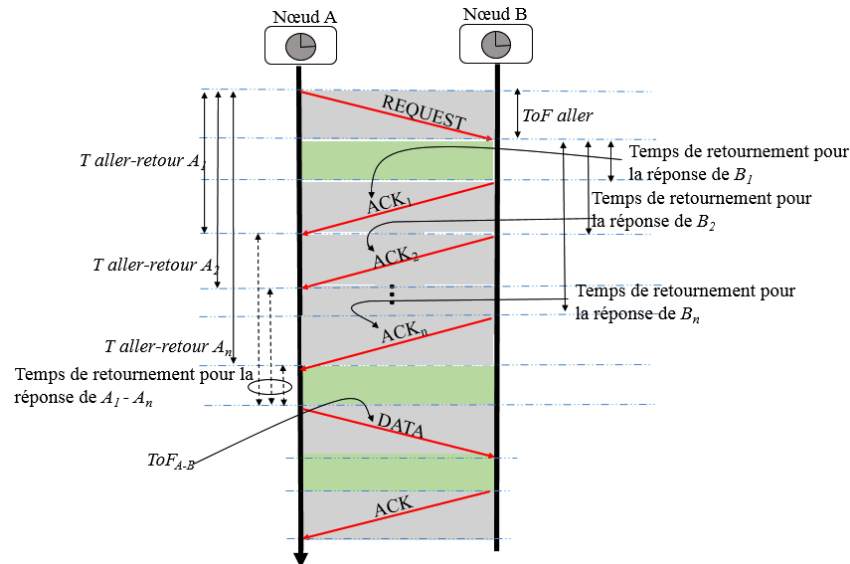


Figure 18 : Single-Sided Two-Way Ranging with Multiple ACK (SS-TWR-MA)

Sur la figure 18, le nœud A initie la session de ranging par une trame **REQUEST**. À la réception de cette trame, le nœud B répond de manière séquentielle par plusieurs trames **ACK**. Chaque trame contient un temps de réponse qui est la durée entre la dernière trame reçue (**REQUEST**) et l'émission de sa propre trame (**ACK**).

Pour réduire au minimum la variation du temps de réponse du côté du nœud A, tous les temps de réponse sont stockés dans une trame (DATA) supplémentaires après la réception des paquets ACK puis transmis au nœud B. Cette trame permettra au nœud B de disposer des informations nécessaires pour le calcul de la distance. Le nœud B termine la session en acquittant la trame reçue.

Le protocole SS-TWR-MA améliore la précision du ranging mais présente aussi l'inconvénient majeur de générer plusieurs trames et chaque trame émise est forcément une source de consommation d'énergie. Le protocole SS-TWR-MA reste aussi complexe dans son fonctionnement. Chaque trame acquittée nécessite un traitement supplémentaire par le transceiver : le marquage du temps de réponse de la trame REQUEST puis pour chaque trame ACK, le nœud encapsulera (dans la trame ACK) le temps de réponse de la trame REQUEST puis le temps de traitement nécessaire pour cette trame.

L'auteur dans [26] propose une version améliorée du protocole SDS-TWR appelée SDS-TWR-MA basée sur le même principe que [25] et [24].

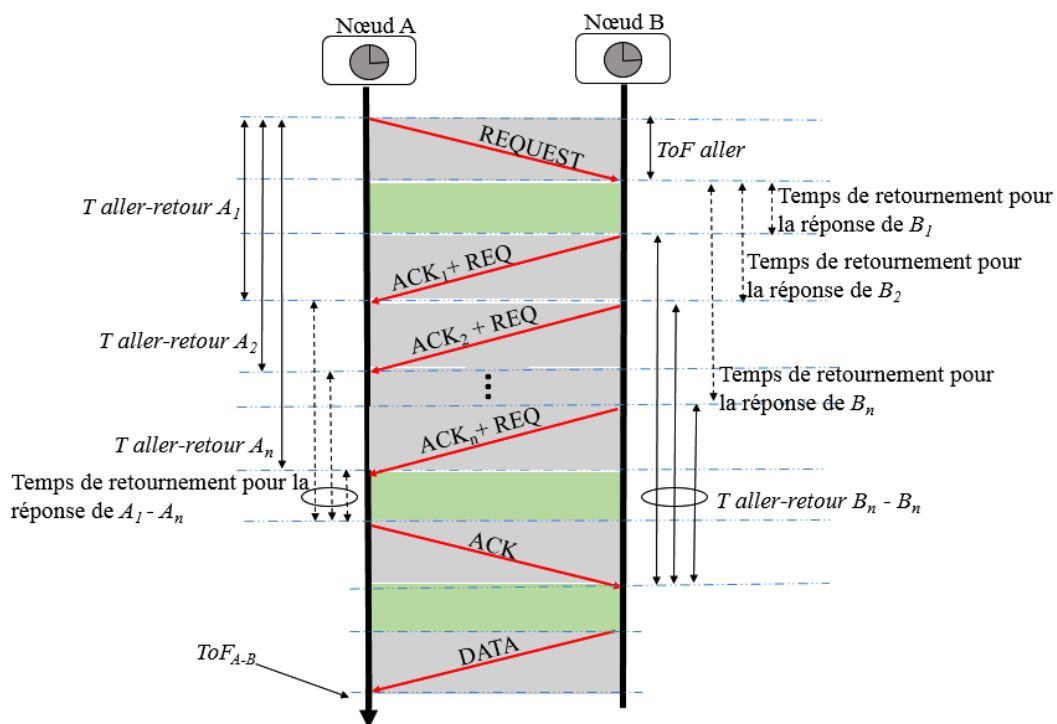


Figure 19 : Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging with Multiple Acknowledgement (SDS-TWR-MA)

Ce protocole symétrique, basé sur le principe d'acquiescement multiple met aussi en question le problème de l'*overhead* (surcout protocolaire). La question de la symétrie du protocole SDS-TWR dans un contexte d'intégration des informations de ranging dans le trafic natif du réseau sera évoquée dans la section 2.4.1.

Dans [28], l'auteur propose les protocoles SSDS (*Sequential Symetric Double-Sided Two-Way Ranging*) et PDS (*Parallel Double-Sided Two-Way Ranging*). Le premier (SSDS-TWR) est considéré comme la suite naturelle du protocole SDS-TWR car les échanges se font, suivant SDS-TWR, avec n nœuds ancres mais de manière séquentielle comme l'indique la Figure 20.

Dans chaque session de ranging, le nœud mobile initie l'échange par la trame *START* (*unicast*), suivi des acquiescements du nœud ancre (*ACK* et *Reply*). Une autre trame d'acquiescement (*ACK*) est émise par le nœud mobile. Il est primordial que toutes les informations d'emplacements se retrouvent du côté du

nœud initiateur de l'échange (le nœud mobile). De ce fait, le nœud ancre envoie une dernière trame (la trame *DATA_REPLY*) contenant les informations (le concernant) nécessaires au calcul de la distance. A la réception de cette trame, le nœud mobile émet une trame d'acquiescement (ACK) mettant fin ainsi à la session de ranging.

Le nœud mobile, après avoir échangé avec tous les nœuds fixes (ancres), obtient un *n-uplet* de mesure de ranging.

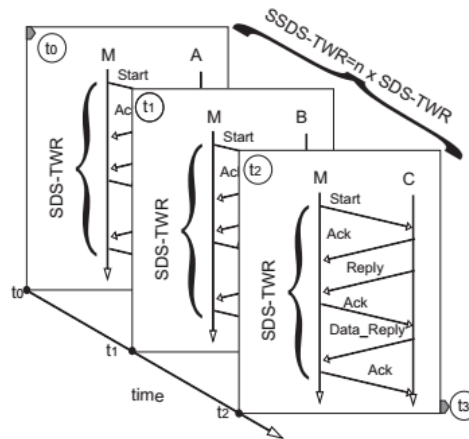


Figure 20 : Exécution du protocole *Sequential* SDS-TWR (SSDS-TWR) avec trois nœuds ancres [29]

Les tests réalisés avec ce protocole montrent de très bonne performance [29]. Il a cependant l'inconvénient majeur de nécessiter plusieurs messages pour une session de ranging : six messages au total. L'aspect symétrique de ce protocole ne serait pas optimal dans un contexte d'encapsulation des informations de ranging dans le trafic natif du réseau. Nous reviendrons sur ce dernier aspect dans la section 2.4.1.

Le deuxième protocole étudié dans [28] porte une attention particulière au nombre de trame échangés lors des sessions de ranging. Avec le PDS-TWR, une trame est émise par le nœud mobile à tous les nœuds ancres en parallèle (**Figure 21**).

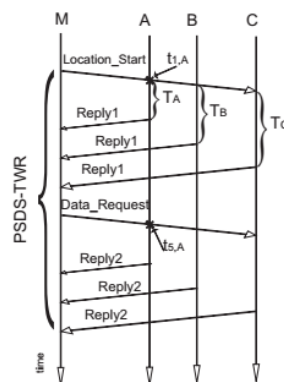


Figure 21 : Exécution du protocole PDS-TWR avec trois nœuds ancres [29]

Dans cette version, les messages ont été définis comme des commandes MAC. Dans la *payload*, un octet est réservé pour identifier la trame. Les trames *Location_Start*, *Reply1*, *Data_Request* et *Reply2* ont aussi été définis et auxquels sont associés des codes de commande MAC.

La trame *Location_Start* contient un code de commande et la liste ordonnée des adresses des ancres concernées pour le ranging. Cet ordonnancement est basé sur le niveau de puissance des nœuds. Après la phase de ranging, seules les ancres ayant un niveau de puissance élevé seront sélectionnées pour localisation. La trame *Reply1* contient un code indiquant sa participation au processus de ranging. La trame *Data_Request* quant à elle contient l'identifiant de cette phase du protocole. A la réception de la trame *Location_Start*, les nœuds ancres connaîtront leur position dans la liste.

La trame *Reply2* permettra à chaque ancre de rapatrier au nœud mobile les trois estampilles lors de la réception des trames *Location_Start*, *Reply1* et *Data_Request* (**Figure 21**). Un mécanisme anticollision a été mis en place afin que le mobile reçoive de manière séquentielle les trames des ancres.

La diffusion des trames par le nœud mobile reste le point fort du protocole PDS-TWR. Le coût protocolaire de la solution n'est pas négligeable : quatre trames sont nécessaires par couple de nœud pour obtenir une session de ranging.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des protocoles de ranging

	Nombre de trame pour une session de ranging	Mode de communication du nœud mobile	Consommation énergétique	Méthode de correction de l'imprécision	Précision de l'erreur moyenne ranging
TWR-MM	Plusieurs trames TWR * par le nombre de voisin	Message unicast	Non disponible	Moyenne des plusieurs mesures de ranging	30 cm
SS-TWR-MA	Plusieurs trames* par le nombre de voisin	Message unicast	Durée de vie de la batterie plus longue. Période de consommation d'énergie très courte	Moyenne des plusieurs mesures de ranging	59 cm
SDS-TWR-MA	Plusieurs trames* par le nombre de voisin	Message unicast	Durée de vie de la batterie plus longue. Période de consommation d'énergie très courte	Moyenne des plusieurs mesures de ranging	~0,0 cm
SSDS-TWR	6 trames* par le nombre de voisin	Message unicast	~ 0.0003 à ~0.005 joules pour 3 à 13 ancres	Correction par le nœud mobile par la technique de la régression linéaire	38,5 cm
PDS-TWR	4 trames* par le nombre de voisin	Message broadcast	De 0.0002 à 0.0006 joules pour 3 à 13 ancres	Correction par le nœud mobile par la technique de la régression linéaire	45 cm

Ces protocoles proposés réduisent l'erreur de ranging liés aux problèmes de synchronisation des nœuds et de la dérive des horloges. Dans tous ces protocoles, le nombre de trames échangées est très important. Ce nombre pourrait augmenter très fortement dans le cas du passage à l'échelle, obligeant les nœuds à consommer beaucoup plus d'énergie pour les nombreux messages d'acquittements et donc réduire la vie de la pile/batterie.

Le protocole PDS-TWR se différencie des autres par son mode de communication (*broadcast*) et le nombre de trames qui est limité à 4 pour une session de ranging. Une réduction du nombre de trame améliorerait considérablement la performance du protocole.

1.5 Etat de l'art sur les technologies sans fil à faible consommation d'énergie (LR-WPAN)

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes technologies de transmission issues de la famille LR WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Network*). Ces technologies sont caractérisées par leur faible débit sur les liens radio, leur faible consommation d'énergie et leur faible portée. Comme son nom l'indique, ce type de réseau est à la base conçu pour être utilisé directement par l'homme (WPAN). L'utilisateur peut être mobile et n'a pas besoin d'utiliser des infrastructures lourdes. Ce mode de communication est aujourd'hui souvent utilisé dans le monde industriel et celui de la recherche pour la collecte de données.

1.5.1 IEEE 802.15.4-Zigbee

1.5.1.1 IEEE 802.15.4

Le protocole 802.15.4 répond aux besoins de communication des applications sans fil qui ont des débits de données faibles, des exigences de faible consommation d'énergie et de sa courte portée. Il est le fondement du protocole ZigBee. La Figure 22 montre une pile simplifiée ZigBee bâtie sur la couche physique (PHY) et la couche MAC de la norme 802.15.4.

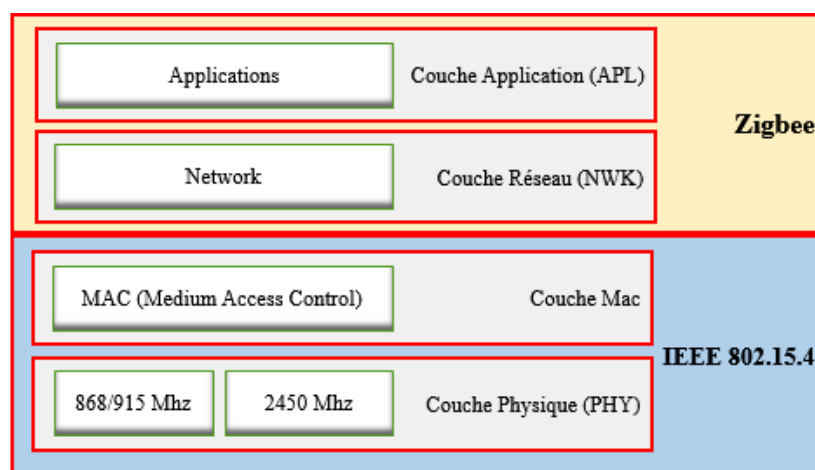


Figure 22 : Pile de protocoles IEEE 802.15.4/ZigBee

Les dispositifs dans un réseau IEEE 802.15.4 peuvent avoir trois principales fonctions : le coordinateur PAN, le coordinateur et le End Device.

- Le Coordinateur du PAN (*Personal Area Network*) : il est le contrôleur principal du réseau. Ce dispositif identifie ses configurations et son propre réseau auquel d'autres dispositifs peuvent être associés. Dans le réseau ZigBee, ce dispositif est appelé Coordinateur ZigBee (ZC).

- Le Coordonnateur : il fournit des services de synchronisation à travers la transmission des trames beacon. Ce dispositif est associé à un Coordinateur PAN et il ne peut pas configurer son propre réseau. Dans le réseau ZigBee, il porte le nom de Router ZigBee (ZR).

- Le End Device : ce dispositif ne dispose pas des fonctionnalités précédemment citées. Il est toujours associé à un ZC ou ZR avant d'interagir avec le réseau. Dans le réseau ZigBee, ce nœud est appelé *ZigBee End Device* (ZED).

Le protocole IEEE 802.15.4 propose deux types de dispositifs qui se distinguent par leur rôle dans le réseau : les dispositifs FFD (*Full Function Devices*) et les dispositifs RFD (*Reduced Function Devices*). Les dispositifs FFD possèdent toutes les fonctionnalités du standard. Ils peuvent être des Coordinateur PAN, des coordinateurs associés au PAN et des End Devices qui disposent des fonctionnalités minimales du standard. Les dispositifs RFD disposent de fonctionnalités minimales du protocole IEEE 802.15.4. Ils sont très économes en énergie et sont utilisés comme capteurs/actionneurs pour envoyer des données de très petites tailles.

1.5.1.1.1 La couche physique

La couche physique « PHY » gère principalement l'émission et la réception du flux binaire. Elle est aussi responsable du décodage des signaux reçus et leurs mises à disposition à la sous-couche MAC.

Elle contrôle l'état du module radio c'est-à-dire son activation et sa désactivation. Elle sélectionne aussi le canal de fréquences de communication etc. avec des débits allant de 110 kb/s à 27,24 Mb/s. Les différentes caractéristiques de la couche physique proposées dans le standard 802.15.4 sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Récapitulatifs des différentes bandes de fréquence [2]

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
780	779–787	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
780	779–787	1000	MPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868–868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902–928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868–868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary orthogonal
	902–928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
950	950–956	—	GFSK	100	100	Binary
950	950–956	300	BPSK	20	20	Binary
2450 DSSS	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
UWB sub-gigahertz (optional)	250–750	As defined in 14.4.1				
2450 CSS (optional)	2400–2483.5	As defined in 13.2		250	167 (as defined in 13.4.2)	
		As defined in 13.2		1000	167 (as defined in 13.4.2)	
UWB low band (optional)	3244–4742	As defined in 14.4.1				
UWB high band (optional)	5944–10 234	As defined in 14.4.1				

1.5.1.1.2 La couche MAC

Le protocole MAC prend en charge deux modes de fonctionnement : le mode beacon et le mode non-beacon.

- **Le mode de non-beacon.** Lorsque le ZC sélectionne le mode de non-beacon, il n'y a ni balise ni supertrame. L'accès au médium se réalise par un mécanisme CSMA/CA⁷ non slotté.

- **Le mode beacon.** Dans ce mode, les balises sont envoyées périodiquement par le ZC ou le ZR pour synchroniser les nœuds qui lui sont associés, et pour identifier le PAN. Une trame de balise délimite le début d'une supertrame définissant un intervalle de temps pendant lequel les trames sont échangées entre les différents nœuds dans le réseau (Figure 20). L'accès au médium est essentiellement assuré par le CSMA/CA slotté.

L'accès au médium est limité par le coordinateur qui diffuse des beacons délimitant la supertrame (Figure 20). Les paramètres BI (*Beacon Interval*) et SD (*Superframe Duration*) définissent la structure de la supertrame. Le BI détermine l'intervalle qui sépare deux beacons réguliers et le SD détermine la durée de la supertrame. Ces deux paramètres sont calculés par rapport à BO (*Beacon Order*) et SO (*Superframe Order*) qui sont représentés par les formules suivantes :

$$BI = aBaseSuperframeDuration.2^{BO} \quad (20)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration.2^{SO} \quad (21)$$

La supertrame est formée de 16 slots de temps égaux. Elle contient trois parties qui sont : le beacon, la CAP (*Contention Access Period*) et la CFP (*Contention Free Period*) (Figure 23). Pendant la CAP, tous les nœuds entrent en compétition pour accéder au support de transmission tandis que la CFP est composée de GTS (*Guaranteed Time Slot*) qui sont des slots de temps alloués à chaque nœud pour échanger avec le coordinateur.

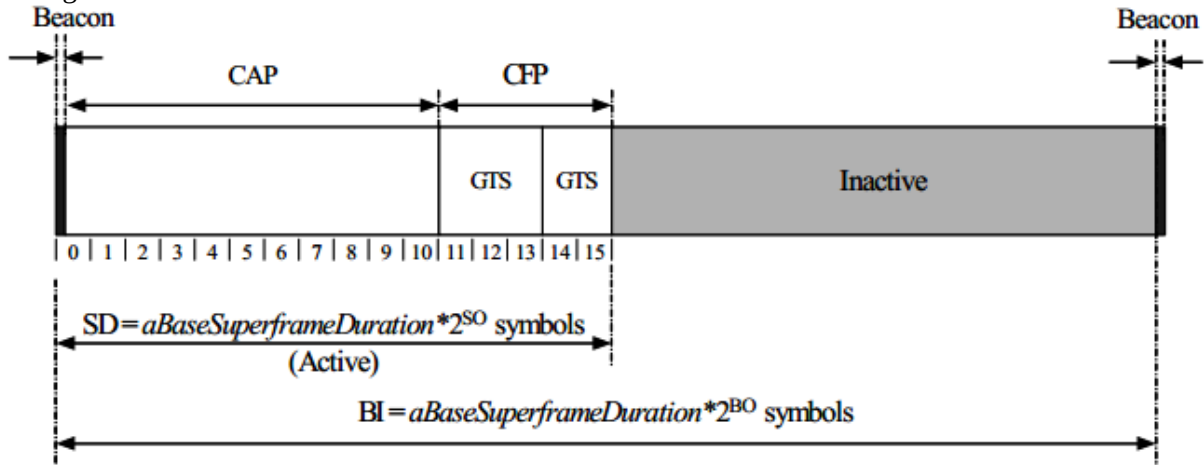


Figure 23 : Structure de la supertrame [29]

1.5.1.1.3 Topologie réseau

La norme IEEE 802.15.4 LR-WPAN peut fonctionner suivant deux topologies : la topologie en étoile ou la topologie peer-to-peer. Elle dépend de l'application que l'on souhaite mettre en œuvre. La Figure 24 représente ces deux topologies. Comme cela a été évoqué plus tôt dans la section 1.2.3.1., dans la topologie en étoile, la communication est établie entre les dispositifs et un contrôleur central unique : le coordinateur du PAN. Le coordinateur du PAN peut être utilisé pour initier ou mettre fin à une

⁷ Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

communication. Il peut être aussi utilisé pour initier une communication. Il achemine les communications des autres dispositifs du réseau. Le coordinateur du PAN est le contrôleur principal du PAN.

Tous les appareils fonctionnant sur le réseau ont des adresses uniques de 64 bits. Cette adresse peut être utilisée pour la communication directe dans le PAN, ou une courte adresse peut être affectée par le Coordinateur du PAN. Le coordinateur du PAN est généralement alimenté sur secteur, tandis que les autres dispositifs sont alimentés par batterie. Les applications qui bénéficient d'une topologie en étoile sont massivement utilisées dans le domaine de la domotique, dans le domaine médical [30] etc.

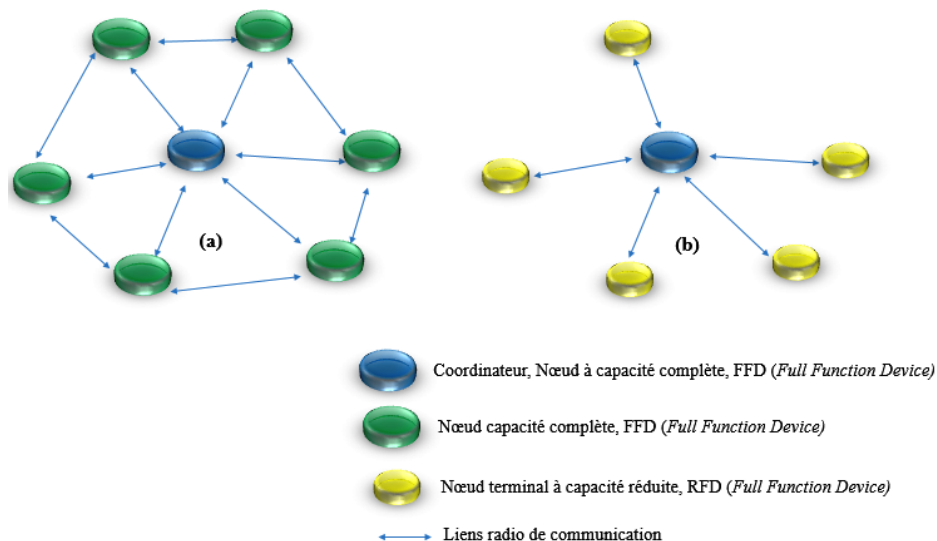


Figure 24 : Topologie mesh (a) et topologie en étoile (b)

La topologie peer-to-peer dispose également d'un coordinateur de PAN. La différence avec la topologie en étoile se situe au niveau de la fonctionnalité des dispositifs. N'importe quel dispositif peut communiquer avec un autre appareil aussi longtemps qu'ils sont à portée les uns des autres. La topologie peer-to-peer permet la mise en place de topologies plus complexes telle que la topologie maillée. Cette topologie est utilisée dans le domaine de la localisation, de la surveillance, dans les réseaux de capteurs sans fil en général. La topologie maillée permet à certains nœuds d'assurer l'acheminement d'informations au même titre qu'un nœud coordinateur. Ces nœuds portent le nom de routeurs. Dans ce cas, les échanges se font avec un ou plusieurs sauts avant d'atteindre le nœud destinataire.

Chaque PAN sélectionne un identifiant unique. Cet identifiant permet la communication entre les dispositifs au sein du réseau à l'aide des adresses courtes et permet des transmissions entre les appareils à travers les réseaux indépendants.

1.5.1.2 Zigbee

Le protocole ZigBee se présente comme une technique de communication radio machine à machine. Sa très faible consommation énergétique, son faible débit ainsi que sa faible portée font de lui un candidat idéal pour les applications destinées à la domotique. Il exploite les couches MAC et PHY du standard IEEE 802.15.4 et définit au-dessus de ce standard deux couches : la couche Application (APL) et la couche réseau (NWK).

Le protocole ZigBee spécifie trois types de dispositifs : le Coordinateur, le Routeur et le End Device. Dans le réseau ZigBee, le Coordinateur et les Routeurs sont alimentés sur secteur tandis que les End Devices sont alimentés par batterie.

Dans un réseau ZigBee il y a un et un seul coordinateur par réseau. Le nombre de Routeurs et de End Device dépend des exigences de l'application à mettre en œuvre.

1.5.1.2.1 La pile protocolaire ZigBee

Comme il a été présenté au chapitre 1.5.1.1 à la Figure 22, le protocole ZigBee définit deux couches supérieures à savoir la couche Network (Réseau) et la couche Application.

1.5.1.2.1.1 La couche Réseau (NWK)

La couche réseau ZigBee est responsable de la gestion du réseau (association des différents dispositifs), le routage des paquets, des services liés à la sécurité, elle affecte les adresses des messages.

La couche réseau assure le bon fonctionnement de la sous-couche MAC et fournit une interface avec la couche application. La couche réseau prend en charge les topologies étoile, arbre et maillée.

Plusieurs protocoles sont utilisés dans la couche NWK pour assurer l'acheminement de l'information. Ces protocoles exploitent des métriques comme le nombre de saut ou la position dans le réseau. On peut citer l'ADSR (*Angle-based Dynamic Source Routing*) [31] ou l'AODV (*Ad-hoc On Demand Distance Vector*) [32]. Le premier utilise l'information de positionnement pour évaluer l'angle entre les nœuds end device et nœud puits. Cette information est utilisée pour acheminer les paquets vers le puits. Le second est un protocole à vecteur de distance, l'utilisation d'un chemin se fait à la demande. Il utilise des numéros de séquence pour éviter les boucles de routage de nouvelles routes.

Plusieurs protocoles de routage se basent aujourd'hui sur la position géographique d'un nœud pour acheminer l'information. Le nœud envoie son paquet vers un autre nœud pour que ce paquet soit proche du puits en termes de distance géographique [33]. Cette technique ne nécessite pas de table de routage ni la connaissance de la topologie globale du réseau. [33]

1.5.1.2.1.2 La couche Application (APL)

C'est la couche la plus haute de la pile protocolaire définie par l'Alliance ZigBee. Elle est constituée de la sous-couche *APplication Sub-Layer* (APS), du *ZigBee Device Object* (ZDO) et de l'Application Framework qui contient des profils prédéfinis (**Figure 25**). L'interface entre la sous-couche APS et les différents objets est nommée APSDE-SAP pour (*APplication Support sub-layer Data Entity-Service Acces Point*).

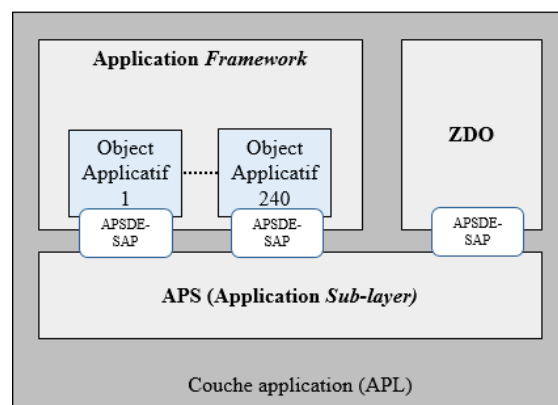


Figure 25 : Couche application Zigbee

La sous-couche APS est l'interface avec la couche réseau. L'Application Framework peut supporter jusqu'à 240 différents objets applicatifs sur un même nœud ZigBee. Ces objets sont définis dans le ZDO. L'Application Framework permet de déterminer aussi des profils applicatifs tout en définissant des formats de messages et la manière de les traiter entre un ensemble d'objets d'un nœud ZigBee.

Zigbee offre des caractéristiques qui satisfont les exigences des réseaux de capteurs [34]. Zigbee propose des débits de données faibles et une consommation énergétique moins élevée que Bluetooth classique. Le faible débit de données n'est pas gênant pour un réseau de capteurs quand on sait que les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

En ce qui concerne la localisation, la technologie Zigbee prévoit la localisation des nœuds communicants par l'utilisation du RSSI sur des portées de 10 m avec des débits théoriques de 250 kb/s.

1.5.2 BLE (Bluetooth Low Energie)

Bluetooth Low Energy (BLE), aussi appelé Bluetooth Smart ou Bluetooth 4.0, est la version évoluée du standard Bluetooth défini par l'IEEE 802.15.1 [35]. La technologie a été développée par le Bluetooth *Special Interest Group* (SIG) pour la communication sans fil à courte portée. Contrairement à sa version classique [36], la technologie BLE a été spécialement conçue pour avoir une très faible consommation d'énergie. Elle permet une consommation d'énergie 10 à 20 fois moins [36] que le standard Bluetooth. Cette faible consommation est obtenue grâce à ses transceivers appelés beacons qui sont alimentés en continu par des batteries qui peuvent durer pendant plusieurs années [37] [38]. Elle est principalement destinée aux objets connectés tels que les montres, les jouets, les appareils de fitness, les appareils de soins de santé pour lesquels le besoin en débit de transmission de données est faible.

1.5.2.1 Empilement protocolaire de la Bluetooth Low Energy (BLE)

Comme dans sa version précédente, la pile de protocole BLE est composé de deux parties principales : la partie Controller et la partie Host (Figure 26). La partie Controller est composée de la couche physique et de la couche de liaison. Elle se présente sous la forme de puce avec une radio pilotée par un système de type *System-on-chip* (SOC) [39]. La partie Host sur un processeur d'application et inclut des fonctionnalités de couche supérieure, à savoir la couche *Logical Link Control and Adaptation Protocol* (L2CAP), la couche *Attribute Protocol* (ATT), la couche *Generic Attribute Profile* (GATT), la couche *Security Manager Protocol* (SMP) la couche *Generic Access Profile* (GAP). La communication entre la partie Host et la partie Controller est normalisée grâce à l'interface *Host Controller Interface* (HCI). Certains profils non essentiels comme le couche application ne sont pas définis par la standard Bluetooth. Ils peuvent être utilisés au-dessus de la partie Host.

Bien que certaines des caractéristiques BLE Controller aient hérité du contrôleur Bluetooth classique, les deux types de contrôleur sont actuellement incompatibles. Par conséquent, un dispositif qui met en œuvre seulement avec un contrôleur BLE (appelé dispositif monomode) ne peut pas communiquer avec un dispositif équipé d'un contrôleur Bluetooth classique. Il a alors été prévu que les nouveaux dispositifs prennent en compte les deux types de contrôleur. Ces dispositifs sont appelés dispositifs bi-mode.

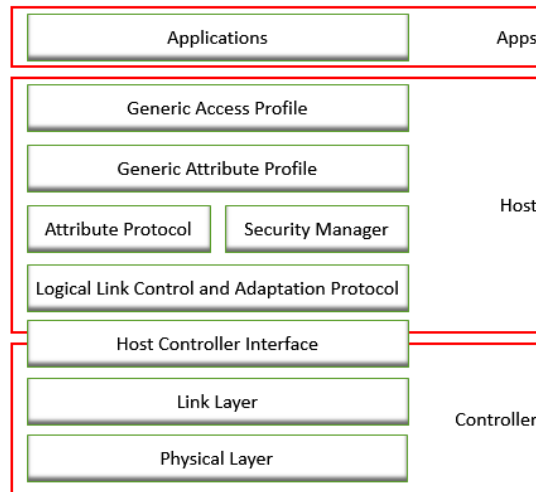


Figure 26 : Pile protocolaire de la BLE

1.5.2.2 La couche physique

La technologie BLE utilise la même gamme de fréquences radio (2.4 GHz) que le Bluetooth classique. La BLE dispose de 40 canaux à 2 Mhz. 3 de ces canaux sont (unidirectionnelles) appelés « *advertising channels* ». Ils sont utilisés pour la découverte du réseau et la connexion au réseau contre 32 canaux pour le Bluetooth classique pour effectuer la même tâche. Ces canaux permettent aussi à un nœud du réseau de signaler sa présence à d'autres nœuds qui chercheraient à établir une connexion. Les 37 autres canaux (bidirectionnels) de la BLE sont utilisés pour les données. Le Bluetooth classique a au total 79 canaux à 1 Mhz. Le tableau 3 récapitule ses caractéristiques.

Tableau 3 : Comparaison entre le Bluetooth classique et le BLE [36]

Technical Specification	Classic Bluetooth	Bluetooth Low Energy
Frequency	2400 to 2483.5 MHz	2400 to 2483.5 MHz
Modulation Technique	Frequency Hopping	Frequency Hopping
Modulation Scheme	GFSK	GFSK
Modulation Index	0.35	0.5
Number of Channels	79	40
Channel Bandwidth	1 MHz	2 MHz
Nominal Data Rate	1 - 3 Mbps	1 Mbps
Application Throughput	0.7 - 2.1 Mbps	< 0.3 Mbps
Nodes / Active Slaves	7	Unlimited
Security	56 to 128 bit	128-bit AES
Robustness	FHSS	FHSS
Voice	Capable	Not capable

Le mécanisme de saut de fréquence est utilisé au-dessus des canaux de données afin de faire face aux problèmes d'interférence et de propagation sans fil, tels que fading (évanouissement) et le *multipath* (multi trajets). Ce mécanisme sélectionne l'un des 37 canaux de données disponibles pour la communication pendant un intervalle de temps donné.

Tous les 40 canaux physiques utilisent la modulation GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). L'indice de modulation est compris entre 0,45 et 0,55, ce qui permet une réduction de la consommation d'énergie. Le débit de données de la couche physique est de 1 Mbps.

La sensibilité du récepteur dans BLE est définie comme le niveau du signal au niveau du récepteur qui a un taux d'erreur binaire (BER) de 10^{-3} . La spécification BLE exige une sensibilité supérieure ou égale à -70 dBm. La zone de couverture est généralement de l'ordre de la dizaine de mètre.

1.5.2.3 La couche liaison de données

- **Logical Link Control and Adaption Protocol (L2CAP)** : La couche L2CAP est responsable du multiplexage de données entre les couches supérieures Host et la couche de liaison de contrôle inférieur. Elle présente des similitudes avec le protocole L2CAP utilisés dans Bluetooth classique, mais a été optimisée pour le BLE.

La couche L2CAP du BLE fonctionne en mode best-effort. Par opposition au Bluetooth classique, BLE ne réalise pas de retransmission ni de contrôle de flux. De plus, il ne réalise pas de segmentation ou le réassemblage de trames, les couches supérieures sont sollicitées pour envoyer uniquement des trames avec des tailles qui correspondent à la L2CAP taille maximale de la payload.

- **Attribute protocole (ATT)** : Le protocole ATT est utilisé pour envoyer des attributs entre deux dispositifs communiquant entre eux. Un attribut peut être décrit comme une sorte de structure de données qui utilisent les profils du GATT (cf. ci-dessous) pour envoyer et recevoir des données.
- **Security Manager Protocol (SMP)** : Le protocole SMP gère les tâches liées aux échanges et à la clé chiffrement lorsque les liens de communication sont mis en place. La procédure pour établir une connexion se fait dans un certain nombre d'étapes qui nécessitent plusieurs échanges de clés avant l'établissement de la connexion.
- **Generic Attribute profile (GATT)** : Le GATT définit un environnement qu'utilise le protocole ATT pour la découverte de services et l'échange des caractéristiques d'un appareil à un autre. Une caractéristique est un ensemble de données qui comprend une valeur et des propriétés. Les données relatives aux services et aux caractéristiques sont stockées dans des attributs. Par exemple, un serveur qui exécute un service de « capture de température » peut représenter une caractéristique « température » qui utilise un attribut pour décrire le capteur, un autre attribut pour stocker des valeurs de mesure de température et d'un autre attribut pour spécifier les unités de mesure.
- **Generic Access Protocol (GAP)** : Le GAP spécifie les différents rôles que peuvent prendre les dispositifs BLE, les modes et les procédures liées à la découverte des voisins et des services, la gestion de l'établissement de la connexion et de la sécurité.

Le GAP BLE définit quatre rôles avec des exigences spécifiques sur le contrôleur sous-jacent : *Broadcaster*, *Observer*, *Peripheral* et *Central*. Un dispositif ayant le rôle *Broadcaster* diffuse les données (via les canaux « *advertising channels* ») et ne peut se connecter avec d'autres voisins. Le rôle *Observer* est complémentaire au rôle *Broadcaster*. Il reçoit les données transmises par le *Broadcaster*. Le rôle *Central* est attribué à un dispositif qui est chargé d'initier et de gérer plusieurs connexions, alors que le rôle *Peripheral* est conçu pour des dispositifs simples qui utilisent une seule connexion avec un

autre dispositif ayant le rôle *Central*. En conséquence, les rôles *Central* et *Peripheral* exigent que le dispositif *Controller* supporte respectivement les rôles de maître et esclave. Un dispositif peut supporter différents rôles, mais un seul rôle à un moment donné.

La technologie BLE est aujourd'hui disponible dans des millions de dispositifs (IoT⁸, Réseaux de capteurs). Elle présente l'inconvénient de ne pas être applicable aux environnements industriels en raison de courte portée (<10 m). Un autre inconvénient est la topologie en étoile qui limite les portées globales de tout le réseau, et les capacités de localisation dans un contexte où la topologie est plutôt maillée.

Il existe depuis le mois de juin 2017 une nouvelle version, encore peu déployée, nommée Bluetooth v5. Cette nouvelle version, plus « *Low Energy* » que son prédécesseur, offre une couverture théorique de 400 mètres (multiplié par quatre) avec un débit (doublé) allant jusqu'à 2 Mb/s et des tailles de paquets de 255 octets contre 31 pour son prédécesseur [40]. Le *Special Interest Group* (SIG), organisme en charge de son développement, annonce des améliorations importantes au niveau de sa consommation énergétique (moins énergivore que son prédécesseur) et sur les risques d'interférences avec les autres technologies sans fil.

Les améliorations de la version 5 de Bluetooth se concentrent essentiellement sur l'augmentation des fonctionnalités de l'IoT. C'est ce qui explique le fait l'accent soit particulièrement mis sur le *Low Energy*.

En ce qui concerne la localisation, la technologie Bluetooth prévoit l'utilisation des *iBeacon*⁹ pour détecter les autres équipements Bluetooth, estimer la distance qui les sépare et procéder ensuite à leur localisation.

1.5.3 IEEE 802.15.4-2011 : Ultra-Wide Band

La technologie UWB (*Ultra-Wide Band*) a été introduite au grand public pour la première fois en 1993 par Robert Scholtz, lors de sa publication dans la conférence Milcom [41]. Toutefois, l'utilisation de l'impulsion pour l'émission des données précède cet événement. Dans les années 60, la technologie était utilisée par les militaires et par les applications du Département de la Défense américain [42]. En février 2002, la commission fédérale des communications FCC (*Federal Communications Commission*) a autorisé son usage commercial avec l'émission de signaux UWB dans la bande de fréquence [3.1GHz – 10.6GHz] avec un niveau de puissance limité à -41.3dBm/MHz.

La technologie UWB présente un système de communication à bas débit sur des distances pouvant atteindre les 100 mètres avec un débit de l'ordre de 20 Mbps. Les applications destinées aux WSNs trouvent évidemment leur place dans cette approche en termes de portée, de débit et d'économie d'énergie propre à la spécificité impulsionnelle de l'UWB.

En ce qui concerne la localisation, la technologie UWB exploite la mesure du temps de vol des signaux. Elle offre une grande large bande passante qui favorise de bonnes capacités localisation.

A travers ces lignes, nous avons présenté brièvement l'historique de l'UWB et ces atouts majeurs dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil. Nous présenterons par la suite, dans une section dédiée, une étude approfondie de la technologie impulsionnelle UWB, étant donné que c'est le fondement de nos travaux de recherche sur les réseaux de capteurs sans fil. Nous exposerons brièvement le standard IEEE 802.15.4-2011 qui est à ce jour le seul standard qui présente la couche Physique (PHY) qui repose sur une approche impulsionnelle.

⁸ Internet of Things

⁹ Balises utilisées pour détecter d'autre composant Bluetooth.

1.5.4 IEEE 802.15.4e-2012

La norme IEEE 802.15.4e-2012 est un amendement à la norme IEEE802.15.4-2011. Elle définit plusieurs nouveaux profils de couche MAC qui sont optimisés pour une large gamme d'application à savoir :

- DSME (*Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension*)
- LLDN (*Low Latency Deterministic Network*)
- RFID Blink (*Radio Frequency Identification*)
- AMCA (*Asynchronous Multi-Channel Adaptation*)
- TSCH (*Time-Slotted Channel Hopping*)

Les sections suivantes détaillent ces différents profils MAC.

1.5.4.1 DSME (Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension)

Le protocole IEEE 802.15.4e-DSME [43] a été conçu pour les réseaux maillés. Il permet une répartition très efficace des ressources disponibles tout en exploitant à la fois le multiplexage temporel et fréquentiel. La DSME étend à 15 le nombre de GTS par supertrame fourni par la version de 2006 de standard IEEE 802.15.4. Un slot supplémentaire est utilisé pour envoyer la trame beacon.

L'accès au médium est basé sur une structure temporelle spécifique, appelée *multi-superframe* (multi-SF). Chaque multi-SF est constituée d'un ensemble de SF et chaque SF est constituée de plusieurs *timeslots* consécutifs. Chaque SF est composée de trois parties : une EB (*Enhanced Beacon*), une CAP (*Contention Access Period*) et une CFP (*Contention Free Period*).

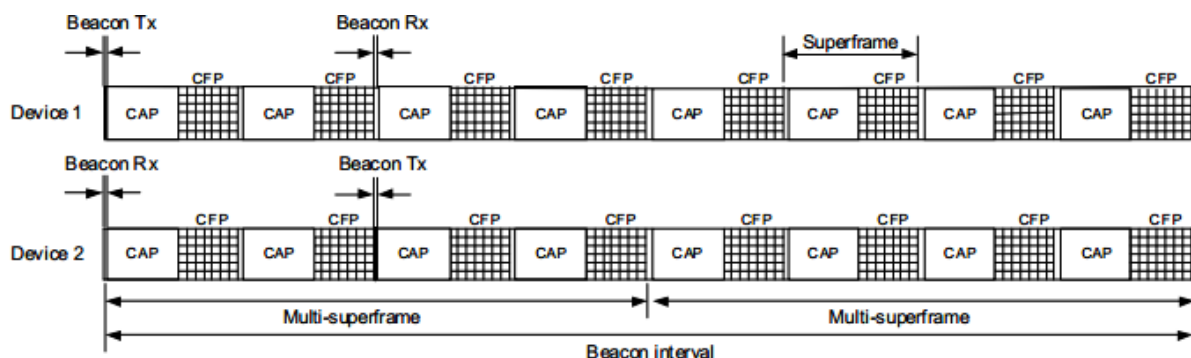


Figure 27 : La structure multi-SF de la DSME dans l'IEEE 802.15.4e [43]

Les nœuds du réseau accèdent au canal grâce à un CSMA/CA slotté. Un nœud dans un même réseau peut avoir le rôle de coordinateur du PAN, coordinateur ou nœud final.

- Le coordinateur du PAN est généralement le nœud puits du réseau. Il envoie un EB à chaque Beacon Intervalle (BI). Il est unique pour chaque réseau. Le EB contient une description spécifique PAN DSME, qui comprend des informations sur son horloge (pour synchroniser les nœuds de réseau), sur le saut de canal et des timeslots.
- Le coordonnateur est un nœud puits pour certains des nœuds du réseau. Il envoie un beacon au moins une fois par multi-SF, dans le slot du beacon, afin de déclarer sa présence dans le réseau. Il agit comme un relais pour les nœuds qui ne peuvent pas atteindre directement le coordinateur de PAN. Il est possible d'avoir plusieurs nœuds coordonnateurs dans le même réseau.
- Les nœuds d'extrémité envoient des données au nœud coordonnateur concerné (ou au coordinateur du PAN, s'il est assez proche). Après avoir reçu un beacon, un nœud d'extrémité

peut concourir pour transmettre les données au pendant la période de contention (CAP) ou demander un DSME-GTS.

La durée des SF et la structure du multi-SF dépendent des paramètres suivants :

- Le *MultiSuperframe Order* (MO), qui décrit la longueur de la multi-SF.
- Le *Beacon Order* (BO), qui indique le nombre de SF que tout coordonnateur doit attendre avant de transmettre un beacon.
- La *Superframe Order* (SO), qui représente la longueur de la partie active de la supertrame, qui est égale à la longueur de la supertrame car le standard ne prévoit pas une partie inactive dans la SF.
- *Beacon Interval* (BI), qui est l'intervalle de temps entre deux trames EB consécutives envoyées par le coordonnateur du PAN.

Le nombre maximum de nœuds qui peuvent agir comme un récepteur, y compris le coordonnateur du PAN, est donnée par le nombre total de SF dans le *Beacon Interval* (BI), correspondant au nombre d'emplacements disponibles de beacon.

1.5.4.2 LLDN (Low Latency Deterministic Network)

Le protocole IEEE 802.15.4e-LLDN a été spécifiquement conçu pour les applications industrielles nécessitant une faible latence, comme dans le domaine de la fabrication, de la robotique, etc. Suivant le profil LLDN, le temps est divisé en supertrames (SF), qui se répètent les unes après les autres de manière régulière. Le protocole LLDN est basé sur une topologie en étoile dans laquelle les nœuds transmettent suivant le mécanisme *Time Division Multiple Access* (TDMA).

Le réseau LLDN est géré par le coordonnateur du PAN, qui est responsable de la configuration du réseau et de synchronisation de nœud. Un SF se compose de plusieurs timeslots et chaque à nœud est attribué un ou plusieurs timeslots où il est autorisé à transmettre. Chaque timeslot est suffisamment grand pour permettre la transmission d'un paquet. Le premier timeslot de chaque supertrame contient une trame LL-Beacon. La trame LL-Beacon est utilisée pour la synchronisation avec la structure de la supertrame. Il est également utilisé pour resynchronisation des nœuds qui, par exemple, sont entrés dans un état d'économie d'énergie (radio éteinte ou en mode veille).



Figure 28 : La supertrame LLDN avec des timeslots dédiés [43]

1.5.4.3 RFID Blink (Radio Frequency Identification)

Le protocole IEEE 802.15.4e-RFID Blink est appliqué dans le domaine de l'identification des personnes et des objets, dans la localisation et le suivi. Le mode Blink du standard permet à un dispositif de communiquer son identifiant et/ou un autre ID (dans la payload), et éventuellement des données utiles

supplémentaires à d'autres appareils, sans association préalable et sans acquittement. La trame peut être utilisée en mode « *transmit only* » par des nœuds qui coexistent au sein d'un réseau, en utilisant le protocole Aloha. Les dispositifs qui ne sont pas intéressés par la trame Blink peuvent la rejeter dès sa réception.

Aucune commande MAC n'a été spécifiée à ce jour pour le mode Blink.

1.5.4.4 AMCA (*Asynchronous Multi-Channel Adaptation*)

Le protocole IEEE 802.15.4e-AMCA est destiné aux domaines d'application où les grands déploiements sont nécessaires, tels que les réseaux intelligents de services publics, les réseaux de surveillance des infrastructures et des réseaux de contrôle de processus. Dans de tels réseaux, en utilisant un canal commun unique pour la communication, il n'est pas possible de connecter tous les appareils dans le même PAN. Par ailleurs, la variance de la qualité du canal est généralement grande, et un lien asymétrique peut se produire entre deux dispositifs voisins (un dispositif peut être capable de transmettre à un voisin mais incapable de recevoir de celui-ci). Le mode AMCA repose sur l'adaptation asynchrone multi-canal. Le mode AMCA est utilisé dans un PAN en mode non-beacon.

1.5.4.5 TSCH (*Time Slotted Canal Hopping*)

Le protocole IEEE 802.15.4e-TSCH est principalement utilisé dans des applications d'automatisation de processus et de surveillance dans l'industrie de l'huile et du gaz, des produits alimentaires et des boissons, des produits chimiques et pharmaceutiques, de l'eau et du traitement des eaux usées, la production d'énergie verte et le contrôle climatique [43]. Le TSCH combine l'accès par timeslots, déjà défini dans le standard IEEE 802.15.4-2006, au multicanal et aux capacités de saut de canal. L'accès par timeslots augmente le débit potentiel qui peut être atteint tout en éliminant les collisions entre les nœuds et fournit une latence déterministe pour les applications. La fonction multicanale permet à plusieurs nœuds d'échanger leurs trames en même temps (dans le même timeslot), en utilisant des canaux différents.

Par conséquent, il augmente la capacité du réseau. De plus, le saut de canal atténue les effets des interférences et d'évanouissement par trajets multiples, améliorant ainsi la fiabilité de la communication. Par conséquent, TSCH fournit une capacité de réseau accrue, une fiabilité élevée et une latence prévisible, tout en maintenant des cycles de service très faibles (par exemple, l'efficacité énergétique) grâce au mode d'accès *Time Slotted*. TSCH a une topologie ouverte car il peut être utilisé pour former toute topologie de réseau (étoile, arbre, maillée complète ou partielle). Il est particulièrement bien adapté pour les réseaux multi saut où le saut de fréquence permet une utilisation efficace des ressources disponibles. La communication est organisée dans les slots, avec une durée de 10 ou 15 ms. Elle définit la tâche que doit effectuer chaque nœud dans un timeslot : envoyer une trame à un voisin particulier, recevoir une trame d'un nœud voisin, ou passer en mode veille ou dormir [43].

Dans le réseau TSCH, tous les nœuds sont synchronisés. La communication se produit à un moment bien défini dans un intervalle de temps, les nœuds émetteurs savent exactement à quel moment transmettre. Lorsque les nœuds émetteur et récepteur sont parfaitement synchronisés, le nœud émetteur sait exactement à quel instant l'émetteur commence à émettre sa trame. Les nœuds seront actifs seulement pendant la durée de l'échange. Après la transmission de la trame, les deux nœuds éteignent leurs radios pour économiser l'énergie ou dormir quelques millisecondes. Ils répètent le même processus afin de recevoir / transmettre un accusé de réception (ACK). Ce scénario est la solution optimale en termes de consommation d'énergie qui peut être réalisé dans une communication entre deux nœuds, car il minimise le temps d'activité de la radio des trancivers.

Par définition, les nœuds dans le réseau de capteurs sans fil ont des horloges différentes. Cette différence d'horloge peut entraîner des dérives dans le réseau sans précaution particulière. Dans ce qui suit, nous allons étudier la synchronisation dans un réseau TSCH.

1.5.4.5.1 La communication dans le réseau TSCH

Dans un réseau de capteurs sans fil TSCH, la synchronisation du réseau est assurée par l'utilisation de beacons [43]. Elle est maintenue par une communication slottée avec d'autres nœuds du PAN. Durant ce slot, un nœud envoie généralement une trame, et les autres nœuds renvoient une trame d'acquittement ACK/NACK Time Correction IE (cette fonction sera expliquée dans la section suivante) indiquant si la trame est reçue avec succès. L'acquittement peut être positif (ACK) ou négatif (NACK). Un acquittement positif signifie que le récepteur a reçu avec succès la trame et a pris possession de celui-ci. Un acquittement négatif indique que le récepteur ne peut pas accepter la trame en ce moment. Les deux types d'acquittements (ACK et NACK) transportent des informations de synchronisation (section 1.5.2.5.5.2.) utilisé par des nœuds pour maintenir la synchronisation de réseau. Les trames envoyées à une adresse de nœud unicast exigent qu'un acquittement soit envoyé en réponse au cours du même intervalle de temps. Si un accusé de réception est envoyé par un nœud et non reçu dans le délai repart, la retransmission de la trame se fait dans le prochain intervalle de temps du nœud.

Pour rester synchronisés, les appareils doivent avoir la même notion du moment où chaque timeslot commence et se termine. Un nœud du réseau peut utiliser l'horloge de son voisin comme référence temporelle s'il arrive à établir un lien avec ce dernier (Figure 29) et ce grâce au bit *Timekeeping* dans la *macLinkOptions*. Un nœud du réseau peut avoir plusieurs voisins comme source d'horloge. Dans de tels cas, le nœud doit synchroniser son horloge avec tous les voisins qui ont cette fonctionnalité.

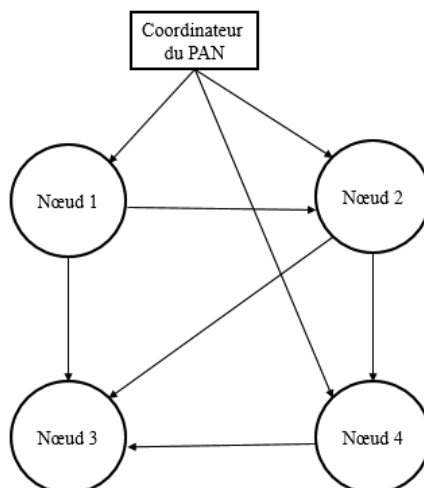


Figure 29 : Exemple de mécanisme de synchronisation dans un réseau TSCH [43]

La Figure 29 montre un exemple de propagation de cette information temporelle. Les flèches indiquent la direction de distribution de cette information : du coordinateur vers les nœuds à portée. Dans cet exemple, le coordinateur est la référence, il est chargé de synchroniser tout le réseau. Il impose son horloge à tous les autres nœuds du réseau. Le nœud 1 se synchronise uniquement au coordinateur et il devient la référence temporelle pour le nœud 3. Le nœud 2 synchronise son horloge avec le nœud 1 et le coordinateur. Le nœud 4 se synchronise avec le coordinateur, le nœud 2 et le nœud 3.

La synchronisation est effectuée à chaque fois qu'un nœud échange une trame avec un voisin qui est une référence temporelle. Cela se fait lors de la réception d'une trame d'acquittement (ACK / NACK).

1.5.4.5.2 La synchronisation des nœuds dans le réseau TSCH

La synchronisation entre les nœuds est nécessaire pour effectuer les échanges avec les voisins dans le réseau. Un nœud TSCH dispose de deux méthodes pour se synchroniser au réseau. Une première basée sur les trames d'acquittement (*Acknowledgment-based*), une autre basée sur les trames échangées (*Frame-based*). Dans tous les cas, des timestamps sont nécessaires pour maintenir la synchronisation dans le PAN TSCH.

Le mode *Acknowledgment-based* fournit une méthode de synchronisation basée sur l'échange de données et des trames d'acquiescement. Le nœud récepteur d'une trame calcule et évalue la différence entre l'heure d'arrivée prévue de la trame et de son arrivée réelle. C'est le *Time Correction IE*, cette information est toujours ajoutée aux trames d'acquiescement (ACK/NACK). Cette information sera connue ultérieurement par le nœud émetteur lors de la réception de la trame d'acquiescement.

L'algorithme de synchronisation basé sur l'acquiescement peut être décrit comme suit :

- Le nœud émetteur envoie une trame, récupère son instant d'émission grâce à la fonctionnalité *macTsTxOffset* de son horloge, ce qui correspondrait à $macTsRxOffset + macTsRxWait / 2$ dans l'horloge du récepteur si les deux horloges ont été parfaitement synchronisées.
- Le récepteur enregistre l'instant d'arrivée (dans la MCPS DATA.indication) à la réception de la trame que nous appellerons la trame START.
- Le récepteur calcule le *Time Correction* qui est égale à $macTsRxOffset + macTsRxWait / 2$ - le timestamp à réception de la trame START.
- Le récepteur renvoie le *Time Correction* dans le champ *IE* de l'acquiescement correspondant (en supposant que la trame a été bien reçue et traitée par le récepteur).
- Le nœud reçoit l'acquiescement. Si le nœud récepteur est un nœud de référence, chargé de synchroniser le nœud émetteur (Figure 29, cas du nœud 1 référence pour nœud 3), l'émetteur ajuste sa propre horloge en intégrant la différence qui est une moyenne de la dérive de tous les voisins qui sont pour lui une référence pour la synchronisation (Figure 29, cas du nœud 3 qui a trois références : nœud 1, 2 et 4). Si le nœud récepteur n'est pas une référence d'horloge, la correction du temps est ignorée par le nœud émetteur.

Dans le mode *Frame-based*, un nœud peut synchroniser sa propre horloge de réseau si il reçoit une trame à partir d'un nœud voisin référence d'horloge. Le récepteur calcule la différence entre le temps d'arrivée prévue de la trame et de son heure d'arrivée réelle. Il utilisera ces informations pour ajuster sa propre horloge.

L'algorithme de synchronisation basé sur les trames peut être décrit comme suit :

- Le récepteur enregistre le timestamp (dans la MCPS DATA.indication) lorsqu'il reçoit la trame START.
- Le récepteur calcule le *Time Correction* qui est égale à $macTsRxOffset + macTsRxWait / 2$ - timestamp à réception de la trame START
- Si le nœud émetteur est une référence d'horloge pour le nœud récepteur, le récepteur ajuste son horloge en intégrant la différence qui est une moyenne de la dérive de tous ses voisins qui sont des références d'horloge pour lui. Si le récepteur n'est pas une référence d'horloge, la correction du temps est ignorée.

En ce qui concerne la localisation, le standard 802.15.4^e-2012 ne prévoit pas de mécanisme dédié à la localisation.

1.5.5 Conclusion

Les technologies étudiées dans cette section apportent des solutions innovantes dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil. En ce qui concerne la localisation, la technologie Zigbee exploite la

métrique du RSSI (qui est d'ailleurs disponible sur tous les composants radio) alors qu'elle est très sensible en présence d'objets métalliques ou du corps humain. L'utilisation de la mesure du temps de vol sur Zigbee sera une solution couteuse. Elle nécessiterait du matériel dédié à cet effet. La technologie la plus prometteuse est l'UWB à cause de forte résolution temporelle. Elle exploite la mesure du temps de vol du signal afin d'obtenir un ranging performant de l'ordre de la dizaine de centimètre.

1.6 Présentation détaillée de la technologie physique de l'Ultra-Wide Band

1.6.1 Définition du signal UWB

La FCC définit l'UWB comme tout signal radio ayant une bande passante supérieure à 20% de sa fréquence centrale f_c ou ayant une bande de fréquence d'au moins 500MHz [44].

Cependant, les systèmes à bande étroites ou *NarrowBand* (NB) ont un spectre qui n'est pas supérieur à 1% de leur fréquence centrale. On peut, par ces deux caractéristiques, situer les technologies ayant un spectre à large bande ou *Wide band* (WB) qui se situent entre 1% et 20% de la fréquence centrale [44].

$$B_f = \frac{B}{f_c} = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \quad (22)$$

$$\text{Avec } B = f_h - f_l \quad (23)$$

$$\text{Et } f_c = \frac{f_h + f_l}{2} \quad (24)$$

B_f : la bande passante fractionnelle

f_l : fréquence de coupure inférieure

f_h : fréquence de coupure supérieure

Les fréquences de coupure sont calculées à $-10dB$.

1.6.2 L'importance de l'UWB

Les systèmes radio ayant une large bande fournissent des débits appropriés dans un contexte où la demande de systèmes de communications à très haut débit est forte. Gao et al font dans [45] un résumé des points forts qui ont provoqué l'engouement pour la technologie UWB. On peut citer entre autre :

- **La très bonne résolution temporelle** : ceci est possible grâce à la grande largeur de bande. Les systèmes UWB disposent d'une très haute résolution temporelle, de l'ordre de la nanoseconde. Cette caractéristique importante peut être avantageusement utilisée pour la localisation.
- **La robustesse face aux évanouissements** : le phénomène des évanouissements est fréquemment rencontré dans les technologies NB. Dans le cas d'un système large bande, les *multi-path* (ou trajets multiples) qui forment le canal de propagation peuvent être associés de manière constructive. Cela confère à la technologie UWB une excellente robustesse face aux évanouissements associés aux *multi-path*.
- **La faible Densité Spectrale de Puissance (DSP)** : la DSP des systèmes UWB a été limitée par la FCC à $-41.3dBm/MHz$. Cette mesure avait pour objectif de favoriser la coexistence des systèmes UWB avec d'autres systèmes radio NB. Cette mesure va réduire la portée des signaux UWB. Elle va cependant améliorer la discrétion des communications radio UWB.

- **La forte diminution de la sensibilité au brouillage** : la faible puissance d'émission diminue la nuisance des signaux UWB sur les autres systèmes. Cependant, le brouillage provoqué par les systèmes NB sur les signaux UWB peut être atténué du fait de la largeur de bande.

Le lecteur peut pour plus de détails se référer à [45].

1.6.3 La régulation de la technologie UWB

Pour définir de nouveaux systèmes de communication, les comités de régulation de réglementation doivent procéder de sorte à garantir une coexistence entre les systèmes existants. Afin de maximiser l'utilisation du spectre disponible et de faire cohabiter rentablement les systèmes à bande étroite existants et les systèmes UWB, les organismes de réglementation aux Etats-Unis et en Europe ont prescrit des règles limitatives pour le fonctionnement des systèmes UWB.

La DSP doit satisfaire des masques imposés par la commission de réglementation (**Figure 30**).

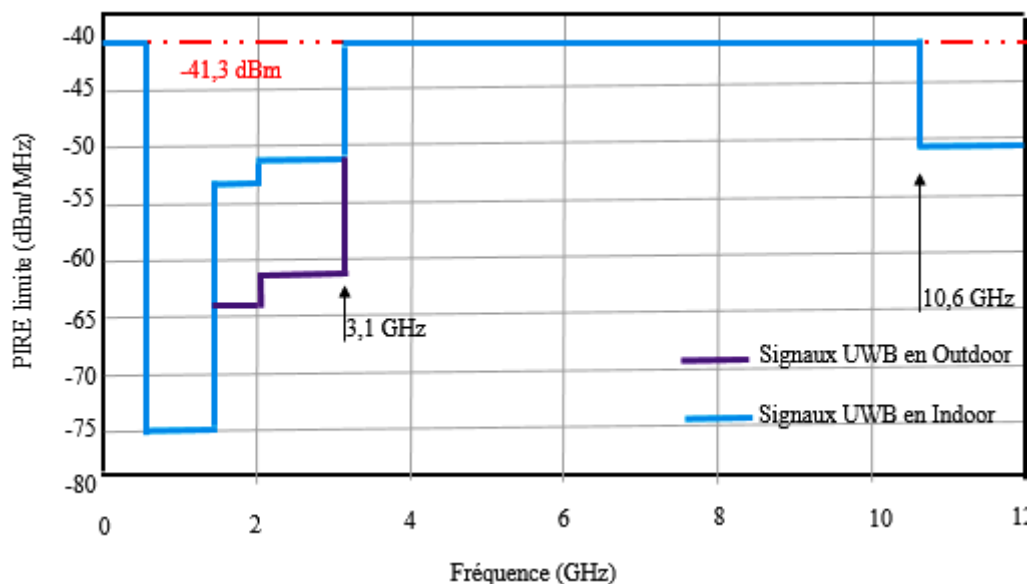


Figure 30 : Masque FCC pour l'émission des signaux UWB en indoor et en Outdoor

La FCC, aux Etats-Unis pour les usages commerciaux, personnels, gouvernementaux, exige que les systèmes UWB occupent au moins 500MHz comme largeur de bande dans la plage de fréquence comprise entre 3.1–10.6GHz. La Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) doit être en dessous des -43dBm/MHz afin d'exclure au plus toute forme d'interférences avec des technologies utilisant la même bande que l'UWB.

La situation sur le continent européen est un peu différente. L'ECC (*Electronic Communication Committee*), l'institution responsable de la réglementation, aborde la réglementation de l'UWB par la FCC avec moins d'enthousiasme. En Europe, un service est brouillé si la puissance du signal interférant (I) est supérieure de 0.01 de la puissance du bruit (N) [46]. Pour que ce signal ne soit pas évalué comme interférent, il devra satisfaire la condition $\frac{I}{N} < -20\text{ dB}$. Ceci n'est pas le cas aux Etats-Unis où $\frac{I}{N} < 0\text{ dB}$. La puissance du signal I doit donc avoir le niveau de la puissance du bruit pour être évalué comme perturbateur. Pour cela, l'ECC a mis en place un standard européen pour les systèmes UWB. Il a proposé un ajustement du masque de la FCC afin de mieux protéger les autres systèmes opérant dans la plage 3.1–10.6 GHz sans modifier les performances de l'UWB dans cette plage. Ceci dit, la restriction en puissance en indoor reste la même que celle prescrite par la FCC. En outdoor, l'ECC ajoute une marge de 20dB par rapport au standard américain, soit -61.3dBm/MHz .

En Asie, l'IDA (*Infocomm Development Authority*) qui est l'autorité de régulation a autorisé en même temps que la FCC, l'émission de la radio impulsionnelle UWB pour une période d'observation de 2 ans. Le but de cette expérimentation était de mener des études sur la coexistence de la radio impulsionnelle UWB avec les systèmes existants en vue d'une réglementation définitive. Au Japon, l'organisme en charge de la réglementation a introduit l'UWB avec les mêmes DSP fixées par la FCC (-41.3dBm/MHz) avec des fréquences autorisées dans la bande $3.4 - 4.8\text{GHz}$ et $7.25 - 10.25\text{GHz}$.

1.6.4 La radio impulsionnelle *Ultra Wide Band* (IR-UWB)

1.6.4.1 La définition du symbole du signal IR-UWB

Avec la modulation de saut temporel (*Time Hopping*) TH-UWB, l'expression générale d'un signal symbole $p_s(t)$ de durée T_s émis en IR est donnée par l'équation 25. La durée symbole T_s est composée de N_f trames. Chacune de ses trames est de durée T_f . Chaque trame comporte N_c chips et chacune est de durée T_c [42].

$$p_s(t) = \sum_{i=0}^{N_f-1} p(t - c_i T_c - i T_f) \quad (25)$$

Où $p(t)$ représente la forme de l'impulsion transmise, de durée T_p ($T_p < T_c$).

$\{c_0, \dots, c_{N_f-1}\}$ est le code pseudo-aléatoire du saut temporel d'un utilisateur particulier avec $c_i \in [0, N_c-1]$.

1.6.4.2 Les avantages de la radio impulsionnelle (IR-UWB)

L'information IR-UWB est codée et transmise sous forme d'impulsions de très courte durée et sur une très large bande. La technologie IR-UWB dispose de nombreux avantages :

- La simplicité : l'absence de porteuse simplifie grandement la réalisation de l'architecture.
- La technique *time-hopping* permet d'avoir la possibilité un accès multi-utilisateur.
- La très faible consommation d'énergie : La simplicité des circuits mis en œuvre assure une faible consommation d'énergie et un faible encombrement.
- La résistance aux multi-trajets : La prise en compte du *delay-spread* permet de réduire l'impact des multi-trajets. Remarquons que le *delay-spread* représente le temps nécessaire pour la stabilisation du canal.
- La faible probabilité de collision : Le signal IR-UWB n'occupe le support que pendant une durée très courte, avec un rapport cyclique faible (un chip dans chaque trame). La faible durée des impulsions réduit la probabilité de collision des impulsions émises.
- La faible probabilité d'interception : L'utilisation de séquences de *time-hopping* permet de rendre le signal imperceptible pour une entité ne disposant pas d'information sur l'algorithme de génération des séquences.

Localisation et *Tracking* : la très faible durée des impulsions permet un timestamping précis et donc une localisation très précise.

1.6.4.3 La modulation dans l'IR-UWB

Plusieurs techniques de modulation peuvent être utilisées pour coder l'information avant la transmission des impulsions.

1.6.4.3.1 Modulation par amplitude de l'impulsion (PAM)

Cette technique consiste à affecter une amplitude donnée à l'impulsion en fonction de la donnée à émettre. Le signal $s(t)$ modulé en amplitude s'exprime ainsi :

$$s(t) = \sum_j \alpha_j P(t - jT_s) \quad (26)$$

$p(t)$ est l'impulsion élémentaire $\alpha_j \in R$ est l'amplitude associée au symbole j à transmettre. T_s est la durée des symboles.

Cette technique peut s'appliquer avec M états d'amplitude différents, ce qui va augmenter l'efficacité spectrale. Mais pour une puissance moyenne d'émission fixée, ceci va accroître le nombre d'états M et détériorer la probabilité d'erreur si toutes les amplitudes sont de même signe.

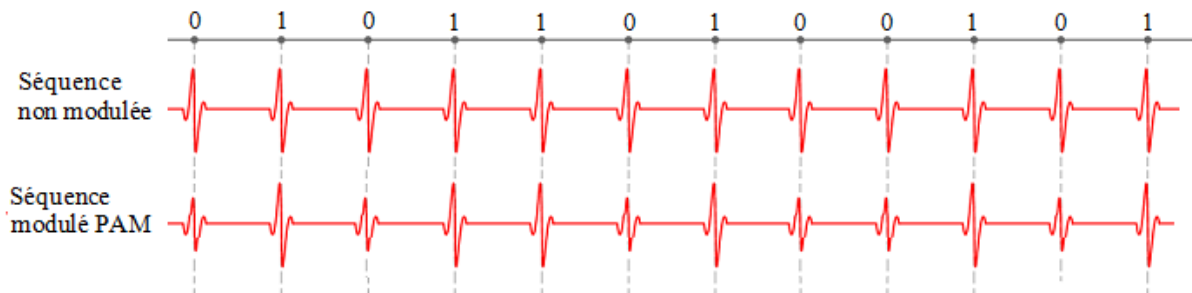


Figure 31 : Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en PAM

La figure 31 nous présente un exemple de modulation d'amplitude à quatre états (4-PAM), avec une représentation grossière d'impulsions à amplitude positive.

1.6.4.3.2 Modulation On Off Keying (OOK) ou tout ou rien

La modulation OOK est une modulation d'amplitude extrêmement simplifiée. L'impulsion est transmise au moment prévu, ou non en fonction du symbole à transmettre. Les avantages de cette modulation sont les suivants [46] :

- Elle est facile à mettre en œuvre aussi bien à l'émission qu'au niveau de la réception. Sa synchronisation est simple car la position et la phase de l'impulsion ne varient pas.
- Cette technique est implémentable dans des récepteurs et est facile à mettre en œuvre, en particulier le détecteur d'énergie.
- elle réalise à puissance moyenne et débit équivalents, l'émission des impulsions dont le niveau de puissance peut être deux fois supérieur à une technique de type PPM. Cela facilite la détection des impulsions à la réception dans le cas des récepteurs à détection d'énergie.

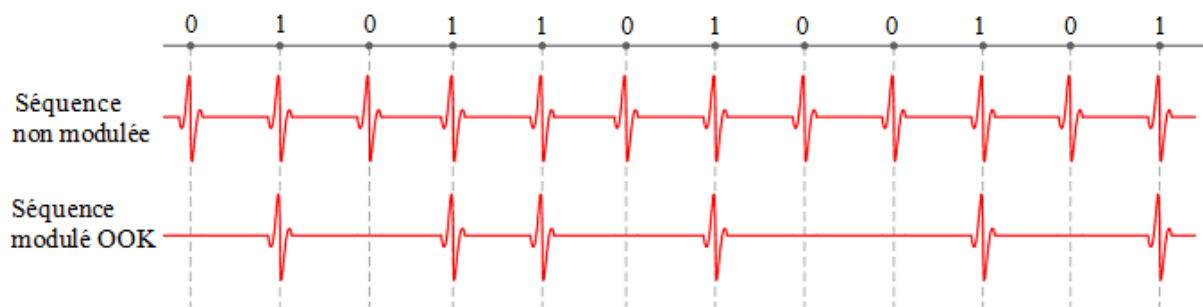


Figure 32 : Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en OOK.

1.6.4.3.3 Modulation par la position de l'impulsion (PPM)

Cette modulation [47, 48] consiste à décaler la position de l'impulsion dans le temps en fonction du symbole à émettre. Cette technique de modulation a les avantages suivants :

- Elle évite la périodicité des chaînes d'impulsions, ce qui aplanit son spectre, et répartit mieux la puissance sur la bande à condition que les données à émettre n'aient pas de longues suites de symboles similaires.
- Elle est parfaitement compatible à une modulation à grand nombre d'états grâce à la définition de plusieurs valeurs de décalage en temps.
- La technique se distingue aussi par la simplicité de sa mise en œuvre à l'émission, il suffit juste de contrôler l'instant d'émission de l'impulsion.

1.6.4.3.4 Modulation à deux états de phase (BPSK)

Le principe repose sur la multiplication de l'impulsion par "1" ou "-1" en fonction du symbole à émettre. Elle est très peu utilisée car elle a fait son apparition plus récemment que la PPM. La BPSK conduit à une meilleure probabilité d'erreur binaire que l'OOK et la BPPM. De plus, le signal moyen est généralement nul si les bits sont équiprobables, cela va favoriser la suppression des composantes discrètes (raies des spectres) lorsque le signal est aléatoire et stationnaire [49 ; 50].

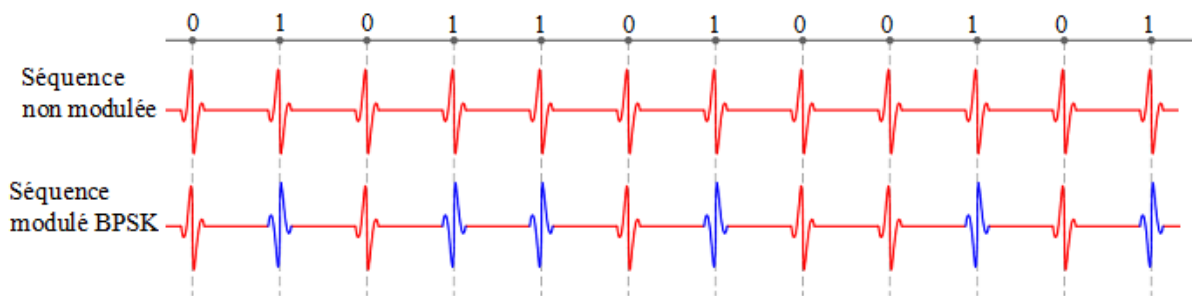


Figure 33 : Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en BPSK

1.6.5 Le standard IEEE 802.15.4a

Le groupe de travail (*Task Group* : TG) de l'IEEE 802.15.4 a entrepris des travaux sur les solutions bas débits à très faible consommation d'énergie pour des applications destinées au WPAN. Comme vu précédemment, ces travaux de recherches ont débouché à la publication du standard IEEE 802.15.4 [51]. Dans le prolongement des travaux, le TG a présenté en 2007 un amendement à la couche physique de cette première version du standard par la mise en œuvre d'une couche physique alternative fondée sur

l'IR-UWB. Cette correction a fait l'objet de publication d'un nouveau standard IEEE 802.15.4a [1]. Ce nouveau standard a pris en compte les fonctionnalités de l'IR-UWB présentée plus haut mais avec des changements dans le format du symbole.

Le paquet du standard IEEE 802.15.4a est divisé en deux parties : un préambule et les données. Le préambule sert à la synchronisation, la détection du paquet, l'estimation du canal. Les symboles du préambule sont émis à l'aide d'un code ternaire $\in \{-1, 0, 1\}$ ayant une longueur de 31 ou 127 en fonction de la valeur de la PRP¹⁰. Ce standard est parfaitement identique à la couche physique IR-UWB classique avec le rassemblement des impulsions isolées d'un symbole TH-UWB en un seul « burst » de durée T_{burst} composée de N_{cpb} impulsions.

1.6.5.1 Présentation de la couche physique UWB

1.6.5.1.1 Caractérisations de l'allocation fréquentielle

Les spécifications dévoilées dans le standard IEEE 802.15.4a à propos de la couche PHY-UWB, font partie des caractéristiques du PMD (*Physical Medium Dependence*) du standard. La norme définit 16 canaux alloués à trois gammes de fréquence disjointes pour la couche PHY-UWB (Tableau 4).

Tableau 4 : Bandes de fréquence de la couche PHY-UWB du standard IEEE 802.15.4a [1][2]

Band group ^a (decimal)	Channel number (decimal)	Center frequency, f_c (MHz)	Band width (MHz)	Mandatory/Optional
0	0	499.2	499.2	Mandatory below 1 GHz
1	1	3494.4	499.2	Optional
	2	3993.6	499.2	Optional
	3	4492.8	499.2	Mandatory in low band
	4	3993.6	1331.2	Optional
2	5	6489.6	499.2	Optional
	6	6988.8	499.2	Optional
	7	6489.6	1081.6	Optional
	8	7488.0	499.2	Optional
	9	7987.2	499.2	Mandatory in high band
	10	8486.4	499.2	Optional
	11	7987.2	1331.2	Optional
	12	8985.6	499.2	Optional
	13	9484.8	499.2	Optional
	14	9984.0	499.2	Optional
	15	9484.8	1354.97	Optional

Un équipement compatible UWB doit pouvoir fonctionner dans l'une des trois plages de fréquences définies et doit obligatoirement adresser le canal obligatoire de la ou des gammes choisies. Ces trois gammes sont les suivantes :

- la bande « Sub-GHz » dispose d'un canal unique compris entre 250MHz et 749MHz,
- la bande « Low-Band » définit un ensemble de 4 canaux compris entre 3245MHz et 4742MHz,
- la bande « High-Band » comprends 11 canaux compris entre 5949MHz et 10234MHz.

Dans la bande « Low-Band », le canal obligatoire est le 3. Il est centré sur 4492.8MHz avec une largeur de bande de 499.2MHz définie comme étant la largeur de l'impulsion mesurée à 3dB. Dans la bande « High-Band », c'est le canal 9 qui est centré à 7987.2MHz avec une largeur de bande de 499.2MHz. C'est le canal obligatoire.

¹⁰ Pulse Repetition Period

1.6.5.1.2 Format de la trame UWB et technique de modulation

La Figure 34 représente les différentes étapes permettant la création et la modulation d'une donnée au niveau de la couche physique. La séquence des étapes indiquées ici pour l'émetteur est utilisée comme base pour expliquer la création de la forme d'onde. Cette partie réceptrice de la Figure 34 est informative et considérée uniquement comme un guide pour les étapes essentielles que tout récepteur UWB. Tout récepteur UWB doit disposer de ses prérequis afin de décoder correctement un signal transmis. Concernant l'émission, on peut voir les parties de mise en forme de la trame.

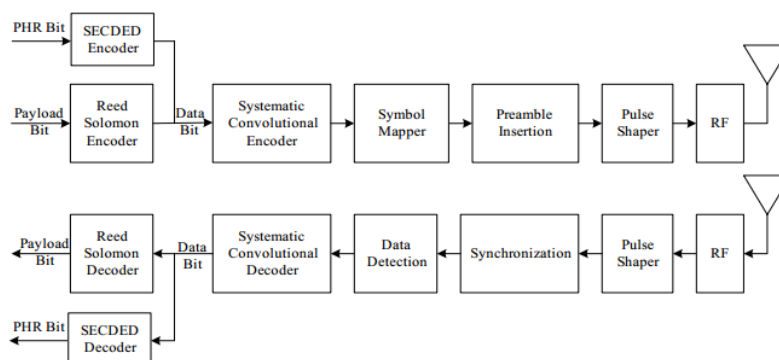


Figure 34 : Diagramme des opérations de la couche IEEE 802.15.4a PHY-UWB [1][2]

La **Figure 35** montre le format pour la trame UWB, qui est composé de trois principaux éléments : le préambule de synchronisation SHR (*Synchronization Header*), l'entête PHR (*Physical Header*) et la Data issue PSDU (*Physical Service Data Unit*). Le préambule SHR est scindé en deux parties. La partie appelée SYNC (*Synchronization*), est utilisée pour la synchronisation, l'estimation du canal et la mesure de distance. Elle peut avoir une longueur de 16, 64, 1024 ou 4096 symboles et chaque symbole est encodé par un unique code ternaire, soit $[+1, 0, -1]$, de longueurs 31 ou 127. L'autre partie est nommée SFD (*Start Frame Delimiter*). Elle est responsable de la délimitation des trames transmises.

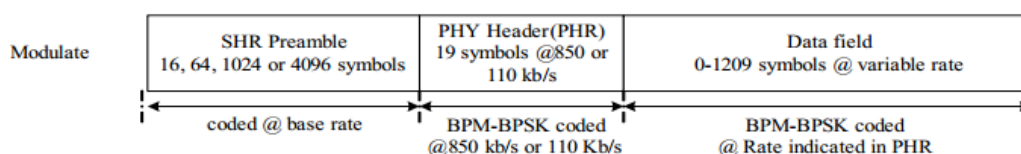


Figure 35 : Format de la trame UWB [1][2]

Le SHR est suivi de la *PHY Header* (PHR), elle transmet les informations essentielles au bon décodage des bits de la trame telle que le débit utilisé pour la transmission des données. Le BPM-BPSK est la technique de modulation utilisée pour le PHR. Dans le dernier champ, nous avons les données issues du PSDU. Ces données sont encodées par le code *Reed Solomon* de type $(K + 8, K)$. Les bits de ce champ sont modulés par une modulation de type BPM-BPSK.

1.6.6 Les avantages de l'IR-UWB dans les réseaux de capteurs sans fil

On ne peut parler d'avantages de la technologie à ultra large bande dans les réseaux de capteurs sans fil sans faire le rapprochement avec les systèmes à bande étroite. On peut se poser des questions sur l'importance des communications large bande par rapport à la bande étroite. Le théorème de Shannon donne un élément de réponse à cette question. Il expose la formule de la capacité d'un canal de communication [52]. Shannon montre que la capacité d'un canal de communication augmente de façon linéaire avec la largeur de bande du signal et de façon logarithmique avec le rapport signal sur bruit. En conséquence, il est plus intéressant d'accroître la largeur de bande afin d'obtenir des débits importants au lieu d'augmenter le rapport signal sur bruit. C'est le fondement majeur de la large bande par rapport aux systèmes à bande étroite. Pour les applications à faible débit, la large bande permet d'obtenir des communications sur des portées plus importantes.

Comme autre avantage de la IR-UWB, on peut citer sa très grande résolution temporelle. Cette particularité rend les systèmes UWB plus robustes aux phénomènes d'évanouissements multi-trajets. Le récepteur UWB est plus apte à discerner chacun des trajets [53]. C'est ce qui explique la faible probabilité de recombinaison destructive des trajets. Une autre conséquence importante de la très bonne résolution temporelle de la IR-UWB est son exploitation dans les systèmes de localisation. Ce service est obtenu par la mesure du *Time of Flight* (ou temps de vol présenté précédemment en 1.3.1.2.2.) qui permet d'atteindre une précision de l'ordre de quelques centimètres. La technologie UWB se positionne donc comme le candidat pour l'implémentation des systèmes de positionnement en environnement cloisonné [54].

Le tableau 5 récapitule les principaux bénéfices et avantages et des systèmes de communication UWB par rapport aux systèmes à bande étroite.

Tableau 5 : Bénéfices et avantages et des systèmes UWB par rapport aux systèmes à bande étroite [55]

Avantage de l'ULB Impulsionnelle	Bénéfice par rapport radio bande étroite
Coexistence avec des systèmes radio à bande étroite et à large bande	Evite les licences coûteuses
Grande capacité de canal	Haut débit pour supporter de la vidéo haute définition en temps réel
Aptitude à travailler avec un faible SNR	Offre une haute performance dans des environnements bruyants
Faible puissance d'émission	Fournit une sécurité élevée avec une faible probabilité de détection et d'interception
Haute performance en multicanaux	Plus grande puissance du signal dans des conditions défavorables
Architecture simple	Faible consommation et faible coût

Une comparaison effectuée dans [54] est présentée dans le tableau 6. Elle expose les différences entre les techniques de transmission en bande étroite et les techniques UWB.

Tableau 6 : Comparaison des techniques bande étroite et ultra large bande

	Bande étroite	Ultra Large Bande
Effets de la propagation	Sensible au fading	Résistant au fading
Disponibilité du spectre	Faible	Elevée
Implémentation	Analogique/Numérique	Tout Numérique possible
Erreur de localisation	27.0%	0.01%
Energie consommée en émission	40mW	1mW
Energie consommée en réception	40mW	20mW
Débit	250 Kbps	0.85 Mbps
Bande passante	1 MHz	500 MHz
Fréquence centrale	868MHz, 2.4GHz	4GHz, 7GHz
Portée typique	10 à 100 m	10 à 40 m

Dans cette section, nous avons présenté la couche physique de la technologie UWB. Nous avons présenté ses bandes de fréquences, son format de trame tout en mettant l'accent sur ses avantages dans les réseaux de capteurs sans fil. Elle a été introduite particulièrement dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil grâce à ses nombreux avantages, notamment en ce qui concerne la précision de la localisation par des techniques de temps vol. Cette dernière caractéristique nous a encouragé à étudier cette technologie dans un contexte de localisation.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par exposer la problématique générale de nos travaux de recherche. Ensuite, nous avons rappelé les principales métriques de ranging et les protocoles de référence de ranging rencontrés dans la littérature. Enfin nous avons passé en revue des technologies sans fil à basse consommation où nous avons porté une attention particulière sur la technologie UWB. Les avantages de cette technologie sont la simplicité de l'architecture des capteurs, la résistance aux évanouissements, sa faible consommation énergétique mais surtout sa très forte résolution temporelle qui peut être exploitée dans le contexte de notre travail qui est la localisation par ranging de type ToF.

Chapitre 2

PROPOSITION D'UN PROTOCOLE DE RANGING POUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL ULTRA WIDE BAND

2.1 Position du problème

Bien que les signaux UWB soient particulièrement robustes (DSP limitées qui permet d'éviter des interférences, plus le caractère impulsionnel qui confère une bonne résistance aux évanouissements), ses bonnes propriétés ne suffisent pas pour obtenir un *ranging* de qualité : la précision du *ranging* dépend fortement des quartz des nœuds car ils entraînent par définition des horloges différentes. La dérive des horloges n'est pas négligeable lors des échanges. Maintenir la synchronisation des nœuds nécessite par exemple l'usage de plusieurs messages de contrôle ou un ajout de matériel (très onéreux) pour réduire la dérive de l'horloge. Compte tenu des caractéristiques matérielles généralement recherchées dans les réseaux de capteurs sans fil, ces solutions ne sont pas adaptées pour un système de *ranging* dans un tel réseau.

La performance du *ranging* dépend aussi de la souplesse du protocole (d'un point de vue surcharge protocolaire) et de la capacité du protocole à pouvoir faire communiquer de façon séquentielle tous les nœuds du réseau.

Dans ce deuxième chapitre, nous justifions le choix du ToF par rapport au RSSI, pour parvenir à un *ranging* de qualité. Nous présentons par la suite la problématique de notre travail puis le cahier de charges. Nous faisons, pour terminer, une présentation théorique de notre protocole.

2.1.1 Problématiques de recherche

L'objectif principal de ce travail de thèse consiste à proposer et implémenter un système d'évaluation de la distance basé sur le ToF offrant suffisamment de précision pour localiser un objet connecté. Ce système doit être à la fois robuste, original et adapté à la localisation en intérieur. Comme objectif final, nous prévoyons d'intégrer les informations de *ranging* dans le trafic natif du réseau. Cette spécificité de notre système nous permettra de développer le concept de "*ranging* opportuniste", c'est-à-dire évaluer la distance entre deux nœuds (objets connectés par exemple) du réseau à chaque échange de trame.

Notre solution devra prendre en compte les propriétés intrinsèques des réseaux de capteurs sans fil. Il doit être très léger du point de vue de l'*overhead*¹¹, et devra reposer sur des mécanismes de la couche physique de l'Ultra Wide Band, définie dans le standard [1] [2] et améliorée par [4] afin d'obtenir un *ranging* performant.

La topologie est une caractéristique importante dans les réseaux de capteurs sans fil. Elle devrait minimiser des contraintes comme la consommation énergie et tenir compte de la faible ressource (CPU, RAM, débit sur les liens sans fil, portée radio...) dont disposent les nœuds capteurs pour le traitement et l'échange des données.

Le coût énergétique d'une trame reçue, par exemple, dépend en particulier de sa taille. Le coût énergétique dans l'état de réception est généralement plus important que l'état d'émission [4][56]. La topologie va, par exemple, définir si les trames doivent être transmises en mode *unicast*, c'est-à-dire envoyées à un destinataire ou en mode *broadcast*, c'est-à-dire diffusées à tous les nœuds à portée. Elle doit aussi assurer un taux d'interférence négligeable et une portée entre les nœuds qui minimisent la probabilité de perte de trame.

Dans la solution que nous proposons, nous prévoyons des nœuds fixes et des nœuds mobiles, certains à portée radio donc à un saut. Chaque nœud diffuse sa trame et se met en réception pendant une période définie dans l'attente d'une trame diffusée. Nous nous proposons aussi d'améliorer les performances du *ranging* en apportant une attention particulière sur le nombre de trames échangées.

¹¹ Overhead : surcharge protocolaire

2.1.2 Hypothèses

Afin d'avoir une vision claire de notre démarche, nous allons nous baser sur trois hypothèses :

- 1) Dans la norme IEEE 802.15.4-2011, lors des échanges, les protocoles de *ranging* ont la capacité de marquer les instants d'émission et de réception des trames. Chaque nœud dispose de sa propre estampille temporelle et à la fin de la session, une dernière trame est émise par un nœud contenant ses propres estampilles d'émission et de réception (section 1.4). Dans notre contexte d'étude, nous souhaitons déposer (c'est-à-dire transporter) l'instant d'émission d'une trame dans un champ de cette trame émise. Nous validerons cette hypothèse dans le chapitre 3 par une solution technologique.
- 2) La topologie des réseaux de nœuds communicants est parfois basée sur le principe de réseau complètement maillé ou *full mesh*, qualifié également de clique. Nous disposons de nœuds fixes (ou ancres) dont on connaît la position et des nœuds mobiles qui cherchent à connaître leur position. Tous ces nœuds sont à portée les uns des autres et à un saut. Si tous les liens entre les nœuds ne sont pas possibles, on parle alors de topologie partiellement maillée (ou simplement maillée). C'est le cas le plus courant et sur lequel nous allons travailler (**Figure 36**). La portée entre les nœuds est une conséquence des caractéristiques de la couche physique imposée par le standard. Elle est réduite (jusqu'à quelques dizaines de mètres) à cause du niveau de puissance définie (-41.3 dBm/Mhz).

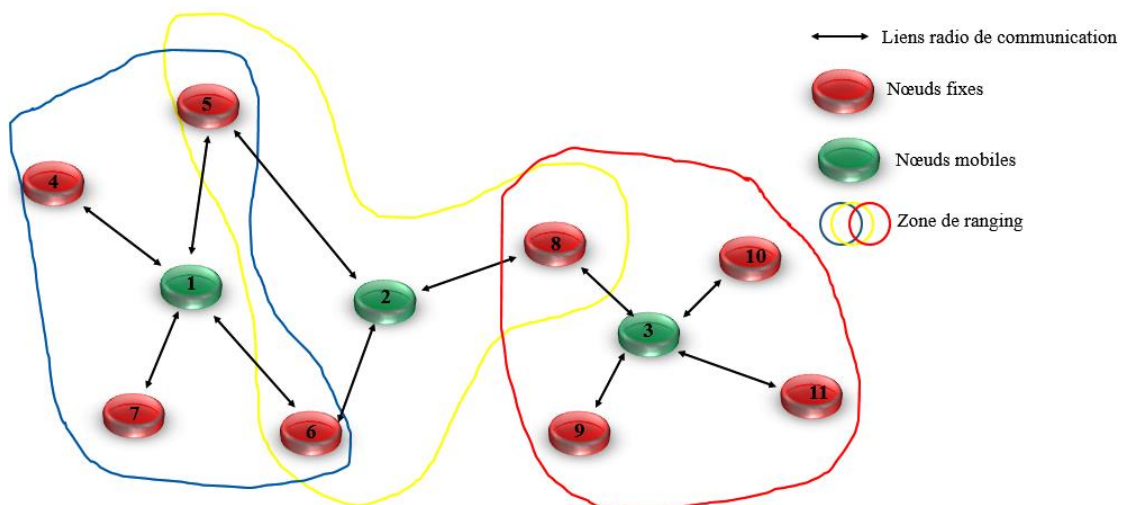


Figure 36 : Topologie générale du réseau de nœuds communicants dans un contexte de localisation

Une telle topologie est composée de plusieurs zones de *ranging*. Une zone de *ranging* est un ensemble de nœuds fixes et mobiles qui s'échangent des trames dans le but de se localiser dans l'environnement. Dans la Figure 36, il existe trois zones de *ranging* : en bleu, rouge et jaune. Dans la première zone (en bleu) se trouvent 5 nœuds. Quatre nœuds sont fixes (nœuds d'adresse 4, 5, 6 et 7) et un nœud est mobile (nœud d'adresse 1). Le nœud d'adresse 4 va évaluer la distance qui le sépare des nœuds d'adresses 4, 5, 6 et 7 dans l'objectif de se localiser. Le nœud d'adresse 1 (nœud mobile) peut faire aussi un *ranging* avec un autre nœud mobile (le nœud d'adresse 2 par exemple), l'objectif est alors de se localiser en s'aidant aussi de ce nœud 5 si ce dernier, même mobile, connaît sa position dans l'environnement.

- 3) Dans la norme IEEE 802.15.4-2011, il est possible d'introduire des paramètres de correction d'erreur dans le protocole de *ranging* en fonction de la qualité des quartz de chaque nœud. Cette spécificité vise à réduire l'erreur de synchronisation liée à la dérive des horloges. Dans notre

contexte, nous prévoyons de pouvoir, à chaque trame reçue, effectuer une analyse d'asservissement de l'horloge de réception (DLL : Delay Locked Loop). Cette analyse, réalisée par le transceiver radio, nous permettra d'évaluer la différence d'horloge entre l'horloge du nœud récepteur et l'horloge du nœud qui vient d'émettre la trame.

Nos travaux de recherche se basent sur ces hypothèses. Nous allons, dans ce chapitre, présenter nos idées qui prennent en compte ces différentes hypothèses, et dans le chapitre suivant, les valider par des solutions techniques et informatiques, et des preuves de concept par prototypage réel.

2.1.3 Justification de choix du signal : RSSI ou Temps de vol (ToF)

Le *ranging* consiste à évaluer la distance entre deux nœuds. Cette mesure est très importante car elle peut être utilisée pour la localisation. Plusieurs techniques sont utilisées pour évaluer la distance. Certaines techniques sont précises, elles se basent des mesures factuelles de signaux physiques, convertibles en distance, c'est le cas des techniques de *Range-based*. Des informations basiques de *ranging* issues de cette technique sont disponibles sur la plupart des nœuds. Elles ne nécessitent pas en général de matériel supplémentaire.

D'autres sont peu précises, c'est le cas des techniques *Range-free*. Elles se basent sur des hypothèses de connectivité du réseau. Ces approches ont déjà fait l'objet de plusieurs études [57][58] au sein de notre équipe. Pour notre travail, nous avons retenu les techniques de types *Range-based*.

L'auteur dans [57] fait une étude expérimentale en comparant les principales méthodes utilisées par les techniques *Range-Based* à savoir le RSSI (*Received Signal Strength Indicator* ou indicateur de puissance du signal reçu) et le ToF (*Time of Flight* ou temps de vol). La stabilité de la technique du ToF a été démontrée sur le RSSI.

Le RSSI est particulièrement sensible à certaines perturbations. En intérieur par exemple, les ondes radios sont atténuées, dispersées, réfléchies ou reflétées par les murs. La présence du corps humain [59], les meubles ou encore les obstacles métalliques, provoquent également des atténuations, ainsi que des effets de multi-chemin ou *multipath* qui vont atténuer ou dégrader la valeur brute du niveau du signal reçu.

Une autre cause de dégradation de la précision de la localisation est l'antenne [60]. Dans un contexte de localisation en intérieur, le diagramme de rayonnement et la polarisation sont les paramètres de l'antenne les plus importants [61]. Un diagramme de rayonnement non-isotrope ainsi que le non-alignement des polarisations entre les antennes émettrice et réceptrice sont des facteurs qui atténuent le signal, et donc, peuvent augmenter l'imprécision dans le calcul de la distance. Pour ces raisons, la technique de mesure par RSSI ne peut être recommandée dans un milieu cloisonné, où l'on préférera utiliser les avantages intrinsèques de l'UWB.

Les mesures de ToF sont plus fiables que celles du RSSI. De ce fait, nos travaux se baseront sur la technique du temps de vol pour obtenir un *ranging*.

2.1.4 Problématiques liées à l'imprécision de la mesure du ToF

Les systèmes réels exploitant les mesures de temps de vol font nécessairement face au problème de précision du *ranging*. Les instants d'émission et de réception sont obtenus directement à la couche physique grâce à des marqueurs temporels très précis. Au-delà des problèmes de détection des signaux, les problèmes de précision sont principalement dus à la dérive des horloges, et plus spécifiquement à l'impact de ces dérives sur le temps mesuré par les nœuds.

2.1.4.1 Erreurs liées à la synchronisation et à la dérive des horloges

De nombreux problèmes peuvent être rencontrés dans les réseaux de capteurs sans fil à cause des comportements dynamiques des nœuds. Un exemple de difficulté rencontrée est la mise en place d'une méthode de partage temporel des ressources pour l'accès au canal de transmission. Le défi est également basé, tout particulièrement, sur la capacité d'un nœud du réseau à se synchroniser avec tous les autres éléments du réseau. La synchronisation pour nous signifie l'homogénéisation des quartz des nœuds du réseau. Ceci, en réalité ne serait pas possible, mais en pratique nécessite que de nouveaux paramètres soient pris en compte pour se rapprocher de la réalité.

L'estimation du ToF étant basée sur l'horloge des différents nœuds, cela va fortement contraindre la précision de l'évaluation de la distance qui en découlera si ces échanges s'étalent dans le temps.

En effet, les nœuds supposés être cadencés à la même fréquence restent très sensibles au problème de précision temporelle lié au fait que les nœuds sont basés sur des horloges pilotées par des quartz différents. Lorsque les trames seront intégrées dans le trafic usuel du réseau et soumises aux contraintes fixées par les protocoles, cette différence introduira d'énormes imprécisions si la durée entre deux messages augmente. La méthode d'accès au médium comme le CSMA/CA peut nécessiter un temps d'attente non négligeable avant l'accès au médium. L'impact de ce temps peut influencer sur la performance du *ranging*.

Le problème de l'homogénéisation des quartz des nœuds du réseau est capital pour certaines fonctionnalités qui se basent sur des mesures effectuées par rapport à des références datées. Celles-ci sont assurées par la stabilité et l'homogénéité des horloges et certains paramètres propres aux nœuds du réseau (biais, dérives). L'ensemble de ces paramètres est indexé par une seule variable : la dérive (skew), c'est à dire l'évolution du biais de l'horloge du nœud par rapport à une base de temps universelle. On peut donner l'exemple du lien entre le temps local d'une horloge et le temps universel t qui est régulièrement défini par la formule intégrale suivante [62] :

$$T(t) = T_0 + \int_{t_0}^t \varepsilon(t) dt \quad (27)$$

Avec :

$\varepsilon(t)$: la dérive instantanée,

T_0 : le biais par rapport au temps universel t_0 [63].

Dans [63], les auteurs rappellent que les performances de radiolocalisation dans les systèmes Ultra Wide Bande (UWB) sont dégradées à cause des imprécisions dues aux écarts de dérives des horloges.

Le matériel utilisé [64] sur notre *testbed* permettra à un nœud récepteur, d'évaluer la différence de fréquence entre sa propre horloge et l'horloge du nœud émetteur. Nous pouvons donc nous baser sur cette spécificité pour évaluer l'impact des retards dans les échanges sur la performance du *ranging*.

Dans ce travail, nous proposons une méthode originale, générique et efficiente de correction de l'erreur de *ranging*.

2.1.4.2 La propagation NLOS (Non-Line Of Sight)

Les capteurs sans fil, à partir des grandeurs physiques obtenues par le *ranging*, peuvent se localiser dans l'environnement. La transmission UWB est une technologie très prometteuse pour les réseaux de

capteurs dans un contexte de localisation, ceci grâce à son efficacité énergétique, et sa très forte résolution temporelle en particulier. Cependant, la communication entre le nœud émetteur et récepteur peut être obstruée, ce qui conduit à la propagation NLOS. La présence de murs ou tout autre obstacle présente un défi important en termes de localisation, car ces obstacles peuvent entraîner des estimations de distance biaisées et surévaluées. Dans des conditions NLOS, le signal initial est réfléchi et réparti en plusieurs signaux dotés de différentes puissances [65]. Dans ce cas, les estimations de distance seront biaisées en raison de la vitesse apparente de propagation qui est réduite car inférieure à la vitesse c attendue de la lumière.

Il existe cependant différents types de NLOS selon le type d'obstacle [21]. On distingue le NLOS classique et un type plus sévère de NLOS. Dans le premier cas, on est en présence d'obstacles moins denses comme des cloisons, le signal est reçu par le récepteur mais simplement atténué. Si le récepteur est encore capable d'identifier ce faible signal, le ToF ne s'en trouve pas affecté. Le deuxième type se définit par la présence d'obstacles plus denses comme un mur en béton armé. Dans ce cas, le signal direct est inexistant, seuls peuvent parvenir au récepteur des signaux indirects plus longs (réfléchis, rampants...). Ici, le ToF est surestimé si ces signaux indirects ont suffisamment de puissance au niveau du récepteur, car le chemin est plus long que le signal direct.

2.1.5 Problématiques liées à la surcharge protocolaire (*overhead*)

L'*overhead* (surcharge protocolaire) peut se définir comme l'ensemble des informations supplémentaires lors de l'échange d'une trame. Ces informations peuvent être sous forme d'entête, des fonctions pour contrôler l'accès au médium, etc.

Plusieurs protocoles au niveau MAC utilisent également des messages de contrôle pour assurer des fonctionnalités comme la signalisation, l'évitement de collisions, la définition du plan d'accès, la connectivité, etc. Tous ces messages additionnels dans la plupart des cas requièrent de l'énergie supplémentaire.

Dans la norme 802.11 par exemple, les fonctions RTS/CTS (*Request to Send/Clear to Send*) sont utilisées pour contrôler l'accès au médium. Egalement, lors d'une communication point à point, plusieurs protocoles différents seront mis en œuvre, ce qui va se traduire par une série d'encapsulation. Ces informations supplémentaires encapsulées sont indispensables à l'acheminement de l'information, elles vont augmenter la surcharge protocolaire et dégrader la performance du réseau.

La solution que nous proposons vise à être implémentée dans un réseau de capteur sans fil. Elle devra tenir compte du problème lié à l'*overhead*, de contraintes intrinsèques aux réseaux de capteurs sans fil comme les ressources énergétiques faibles, la portée limitée, les faibles débits sur les liens radios, le peu de mémoire généralement disponible, etc. Dans un réseau de capteurs sans fil, les messages envoyés sont généralement de petite taille, cette particularité permet de réduire la surcharge protocolaire dans les échanges. Les protocoles mis en œuvre (dans les réseaux de capteurs sans fil) sont soit en *unicast* ou en *broadcast*.

Les protocoles de types *broadcast* conçus pour les réseaux de capteurs ont la plupart du temps de bonnes performances. La raison essentielle est que les protocoles *broadcast* dans un contexte de localisation en intérieur, peuvent réduire la charge du réseau si les échanges s'effectuent avec plusieurs dizaines de nœuds en même temps via des trames diffusées. Une seule trame sera donc envoyée vers tous les autres nœuds du réseau à portée radio. Le gain au niveau de la performance et de l'énergie sera très important contrairement à un protocole qui se base sur le principe de l'*unicast* qui nécessite un message par destinataire.

Dans notre travail, nous allons prendre en compte le problème de surcharge protocolaire car il constitue un challenge scientifique intéressant. Le protocole que nous avons proposé (2M-TWR¹²) [64] améliore

¹² 2 Messages - TWR

le problème de surcharge protocolaire, il offre l'avantage de souplesse et en générant moins d'*overhead*. Il réduit le nombre de trames pendant les sessions de *ranging*, ce qui sera très important et original pour la suite de notre travail.

2.2 Cahier des charges

Nous souhaitons à l'aboutissement de ce travail, effectuer un *ranging* séquentiel et continu pour un réseau dont la taille est de l'ordre d'une dizaine de nœuds. Tous les nœuds à portée radio pourront échanger des informations *ranging* puis évaluer la distance qui les sépare des autres nœuds. Pour y parvenir, nous avons proposé un protocole original appelé BB-TWR (*Broadcast Based-Two Way Ranging*). Ce protocole sera présenté dans la section 2.4.3.

Notre travail de recherche s'inscrit dans le contexte des réseaux capteurs sans fil (WSN) et des réseaux de collecte de l'Internet des objets (DL-IoT) [66]. La minimisation de l'énergie consommée par un nœud est une contrainte importante à prendre en compte pour minimiser la perte d'énergie. Les causes de pertes d'énergie ont été évoquées dans la section 1.2.2. Nous allons prendre en compte cette sous-couche MAC pour réduire la consommation énergétique dans le réseau.

Dans le cadre de la localisation en intérieur, l'intérêt de la technologie UWB ne se traduit principalement pas en termes de débit mais en termes de forte résolution temporelle de l'ordre de la quinzaine de picosecondes. Cette fonctionnalité permet la mesure du temps de vol (ToF) avec une précision de l'ordre de dix centimètres quand on convertit la durée en distance. Cette technologie est donc une candidate idéale pour l'implémentation des systèmes de localisation en environnement cloisonné. Elle offre les outils nécessaires pour la mesure de ce ToF en estampillant directement à la couche physique les instants d'émission et de réception des trames.

La mesure du ToF du premier trajet (*first path*) du signal reçu est estimée avec une précision satisfaisante dans le cas d'une visibilité directe ou *Line of Sight* (LOS) c'est-à-dire en absence d'obstacles entre le nœud émetteur et le nœud récepteur. Cependant, dans le cas où les nœuds ne se sont pas en visibilité direct *Non Line of Sight* (NLOS), c'est à dire en présence d'obstacles entre le nœud émetteur et le nœud récepteur, le ToF est désastreusement mal estimé et par conséquent dégrade les performances de localisation. Ce phénomène est très rencontré en *indoor* comme en milieu urbain où le signal initialement direct entre en collision avec un obstacle. Plusieurs travaux de recherche ont été menés [65][67] pour améliorer la mesure du ToF dans le cas NLOS.

L'objectif visé par cette thèse est la réalisation d'un prototype de localisation mobile permettant la localisation en 2 dimensions (2D) de personnes ou d'objets à l'intérieur d'un bâtiment. Cette solution sera destinée à titre d'exemple au monde industriel, dans le domaine médical pour les applications de suivi des patients etc.

Enfin pour terminer, les informations de *ranging* devront être encapsulables dans le trafic du réseau existant. Les données échangées dans ce réseau doivent être diffusées par tous les équipements du réseau. Le protocole de *ranging* envisagé ne devrait donc pas avoir à imposer de contrainte au niveau MAC puisqu'il sera soumis aux contraintes fixées par le trafic natif du réseau. Les trames seront par défaut émises par les nœuds de façon aléatoire, sans maîtrise par le protocole de *ranging*.

2.3 Proposition d'un formalisme générique pour les techniques de *ranging* par ToF

Dans cette section, nous allons proposer et présenter un formalisme de notation des timestamps pour les protocoles de ranging par ToF. Ce formalisme se veut le plus générique possible et indépendant de tout

protocole de ranging. Puis nous allons proposer et présenter un formalisme de notation de message. Nous terminerons par plusieurs exemples qui utilisent ses deux formalismes sur des protocoles connus.

2.3.1 Formalisme de notation des timestamps

Afin de présenter le plus clairement possible les différents instants liés au protocole que nous souhaitons concevoir, nous avons tout d'abord spécifié un formalisme adapté pour noter toute estampille temporelle dans un protocole de *ranging* par temps de vol. En effet, si la notation des timestamps dans le protocole TWR se résume à t_1, t_2, t_3, t_4 , dans notre protocole, les timestamps seront plus nombreux et spécifiques, ce qui justifie la proposition d'un formalisme.

Dans notre formalisme, une estampille temporelle se présente sous la forme :

$$T_{dir\ src, dst}^{Nseq(src)} \quad (28)$$

avec :

T : estampille temporelle (*timestamp*),

dir : direction du message : cette notation en indice indique si l'estampille est liée à un message transmis (T) ou reçu (R).

src, dst : source et destination du message : *src* indique l'adresse ou le nom du nœud émetteur lié à cette estampille, et *dst* l'adresse ou le nom du nœud qui a estampillé le message à la réception. Le nom ou l'adresse du nœud (pour les deux cas *src* et *dst*) est noté. Si un message est diffusé à tous les nœuds à portée, *src* est l'adresse ou le nom du nœud émetteur, et *dst* est noté par une astérisque pour indiquer une diffusion à un saut.

Nseq(src) : cette notation en exposant indique le numéro de séquence du timestamp émis et non de la trame. Le numéro de séquence dépend de l'adresse de l'émetteur seulement. Ce numéro est incrémenté à chaque nouveau timestamp ; pour le calcul du ToF, l'algorithme de traitement devra systématiquement faire correspondre un **T_R** avec le **T_T** correspondant, c'est-à-dire correspondant aux mêmes adresses et numéros de séquence. Un exemple de ce calcul est donné dans la section 2.3.3.

Nous donnons ici à titre d'exemple la première estampille temporelle d'un message diffusé par le nœud A (**T_{T A, B}^{Nseq(A)}**) à destination des voisins B et C (**Figure 37**) :

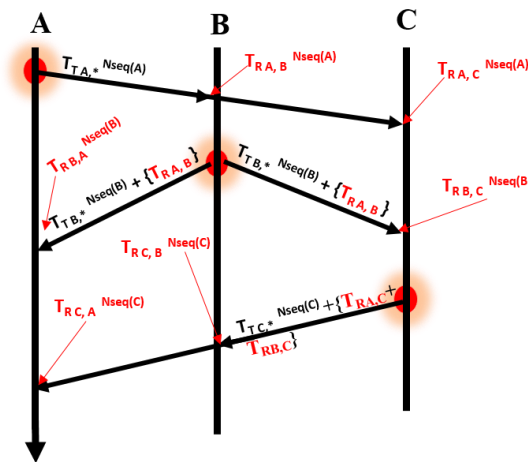


Figure 37 : Exemple de marquage d'estampille

Le numéro de séquence $N_{seq(A)}$ indique que c'est le premier message du nœud A, ce numéro sera incrémenté ($N_{seq(A)+1}$) lors de la prochaine émission de trame du nœud A.

Le timestamp $T_{R A, B}^{N_{seq(A)}}$, marqué par le nœud B puis intégré dans sa trame à destination du nœud A, permet au nœud A de retrouver à quel T_T ($T_{T A, *}^{N_{seq(A)}}$) le timestamp reçu est associé. Et pour cela, le numéro de séquence devient indispensable. Sans ce numéro de séquence de timestamp, les timestamps reçus pourront être associés à d'autres T_T .

Ce formalisme se veut générique et pourrait être réutilisé dans d'autres protocoles.

2.3.2 Formalisme de notation des messages

L'objectif de ce formalisme est de spécifier un format générique pour le contenu des protocoles de ranging.

- Les messages peuvent transporter 0, 1 ou plusieurs timestamps. Ces timestamps sont au format précédemment défini.
- Les messages peuvent être envoyés à un seul destinataire ou diffusés.

Dans le diagramme de séquence, nous représenterons par un point rouge l'émetteur de ce message si celui est diffusé. Les timestamps transportés seront séparés par des virgules. Si ces timestamps sont homogènes (uniquement des timestamps de réception), ils pourront être regroupés par des accolades.

Pour plus de clarté dans le diagramme de séquence, les timestamps d'émission seront en noir et les timestamps de réception seront en rouge.

2.3.3 Exemples d'utilisation des formalismes

Dans cette section, nous allons appliquer le formalisme proposé à des protocoles de référence déjà étudiés et qui seront implémentés plus tard.

2.3.3.1 Sur TWR

Le ToF dans le protocole TWR est réalisé à partir de 4 estampilles t_1, t_2, t_3 et t_4 (Figure 38)

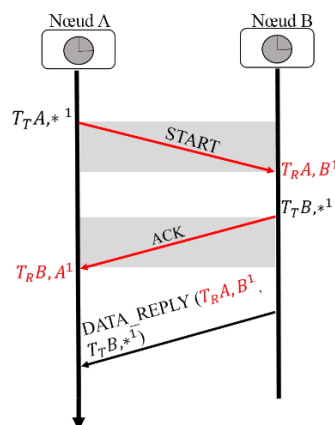


Figure 38 : Le protocole TWR

Le ToF est calculé selon l'équation suivante :

$$ToF_{TWR} = \frac{(T_{RB,A^1} - T_{TA,*^1}) - (T_{TB,*^1} - T_{RA,B^1})}{2} \quad (29)$$

2.3.3.2 Sur SDS-TWR

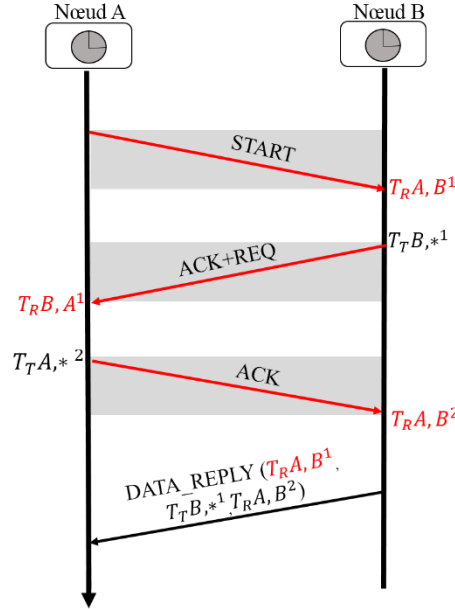


Figure 39 : Le protocole SDS-TWR

Les 6 estampilles (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 et t_6) du protocole SDS-TWR (Figure 39) permettent de calculer le ToF dans l'équation suivante :

$$ToF_{SDS-TWR} = \frac{(T_{RB,A^1} - T_{TA,*^1}) - (T_{TB,*^1} - T_{RA,B^1}) + (T_{RA,B^2} - T_{TB,*^2}) - (T_{TA,*^2} - T_{RB,A^2})}{4} \quad (30)$$

2.4 Proposition de protocoles de ranging intégrables dans le trafic usuel du réseau

Nous avons présenté dans la section 1.3.1.2 les protocoles de *ranging* exploitant les mesures du temps de vol. Nous avons aussi défini notre piste de recherche en expliquant que le protocole TWR serait un candidat parfait pour la suite de nos travaux.

Dans cette section, nous allons proposer deux protocoles de *ranging* qui présentent toutes les caractéristiques nécessaires pour être intégrables dans des messages typiques (*beacons*, données, acquittements).

2.4.1 Présentation de la fonction *Delayed Transmission*

Parmi les nombreuses caractéristiques du module DW1000 de DecaWave, on peut noter la fonction *Delayed Transmission*. Cette fonctionnalité permet à la couche physique de retarder l'émission d'une trame, c'est-à-dire de programmer de façon très précise l'instant auquel la trame de *ranging* (RFRAME, *Ranging Frame*) sera émise.

Dans la RFRAME, se trouve un bit spécial appelé RMARKER (*Ranging Marker*). Ce bit situé dans l'entête de la trame de *ranging* (Figure 40 et Figure 41) permet de marquer avec une très grande précision – de l'ordre de la quinzaine de picoseconde – un instant dans la trame de *ranging*.

La norme IEEE 802.15.4-2011 définit toute trame qui dispose de ce bit dans l'entête de sa couche physique comme trame de *ranging* (RFRAM).

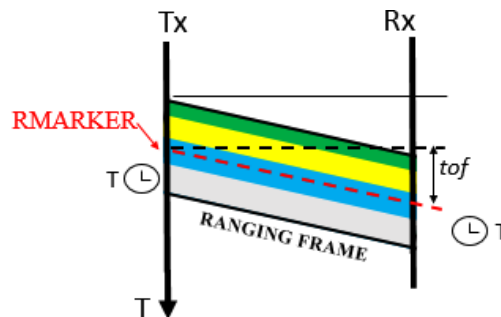


Figure 40 : Le bit RMARKER dans la trame de ranging

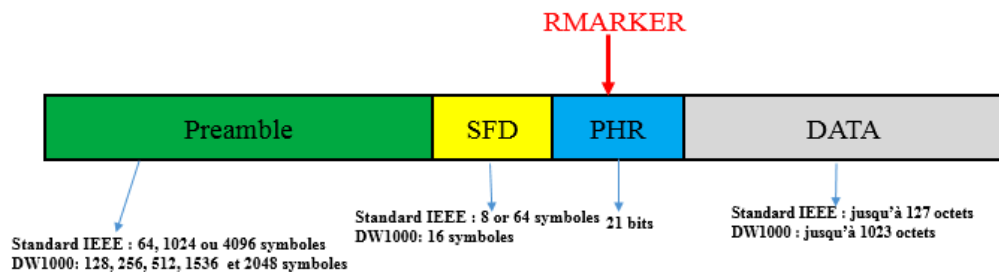


Figure 41 : Format de la trame de ranging définie par le standard IEEE et DecaWave

Les *transceivers* UWB utilisés vont se servir de ce bit de référence pour marquer les instants d'émission et de réception des trames.

On peut retrouver une utilisation quasi similaire de la *Delayed Transmission* dans le protocole SDS-TWR présenté dans le chapitre 1 (1.4.3.), où il est important de disposer des mêmes temps de réponse dans les deux extrémités (nœuds A et B) pour réduire les erreurs dans l'estimation du *ranging*. Le nœud dans ce cas quitte l'état de réception et passe en mode veille - en retardant l'émission de sa trame jusqu'à ce que le temps indiqué dans état expire- puis se met dans l'état émission pour émettre sa trame. C'est le principe de la symétrie dans SDS-TWR. Dans des circonstances normales, le microcontrôleur a besoin de quelques microsecondes pour mettre l'émetteur sous tension (lorsqu'il quitte l'état de veille). Ce temps est correctement pris en compte par le bit RMARKER lors des estampilles temporelles [4]. En effectuant une transmission différée, le DW1000 calcule un instant de démarrage interne pour savoir quand commencer à envoyer le préambule. Cela permettra que la valeur de *timestamp* fournie par le RMARKER soit en harmonie avec le temps de transmission programmé.

Cette originalité va permettre de pré-calculer l'instant d'émission d'un message et éventuellement l'intégrer dans le message qui sera transmis. Dans la section suivante, nous allons exploiter pleinement les avantages de cette solution en améliorant le protocole de référence TWR.

2.4.2 2M-TWR (2 Messages – TWR)

L'objectif visé par la fonctionnalité *Delayed transmission* est de nous permettre de pouvoir programmer l'instant auquel la trame sera envoyée. Cette originalité devra aussi nous permettre d'intégrer les instants d'émission dans la trame puisque nous avons prédéfini le moment où elle sera envoyée. Cela devra nous permettre d'améliorer le protocole TWR en réduisant le nombre de trame.

Dans la Figure 42, nous présentons le protocole de base TWR. Dans notre environnement, nous avons la possibilité de récupérer l'heure du système appelée dans cet exemple *SysDate* représenté sur cette même figure. La fonctionnalité *Delayed Transmission* présentée sur la figure par *Delay*, définira le temps (le retard) que la trame passera en mode veille.

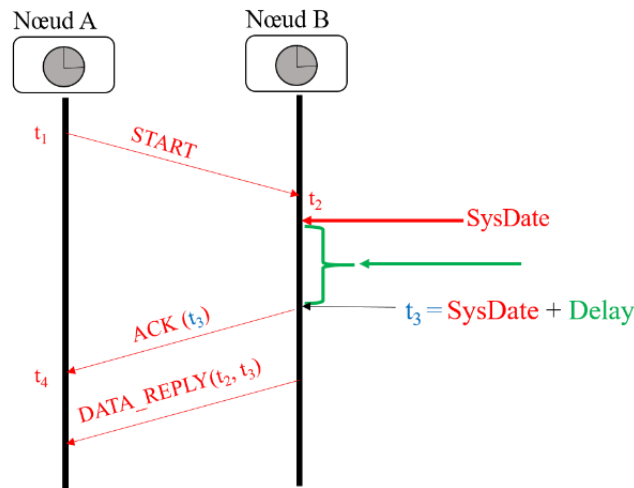


Figure 42 : Le protocole TWR dans sa version de base

Avant l'émission de la trame, B récupère l'horloge système (*SysDate*) à laquelle il ajoute le retard de transmission (*Delay*). La somme de ses deux paramètres est en réalité l'instant d'émission de trame (t_3) pour la trame *ACK*. Cet instant étant connu avant même l'émission de la trame *ACK* par le nœud B, ce dernier va l'ajouter dans la trame lors de son formatage, pour qu'elle soit envoyée et partagée le cas échéant avec les autres nœuds.

Dans le protocole TWR, le message *DATA_REPLY*(t_2, t_3) est utilisé par un nœud (ici le nœud B) pour envoyer les instants t_2 et t_3 non connus de l'initiateur du *ranging* (nœud A dans notre cas), lui permettant ainsi de calculer le ToF puis la distance entre A et B.

Avec cette originalité, nous optimisons le protocole classique TWR. En disposant des instants d'émission dans la trame, nous pouvons aussi nous permettre d'intégrer l'instant t_2 dans la trame à envoyer puisque lui aussi il est connu dès la réception de la trame *START*. Nous pouvons ainsi nous séparer du message *DATA_REPLY*(t_2, t_3). Nous passons de trois messages (TWR) à deux messages (2M-TWR) comme représenté dans la Figure 43.

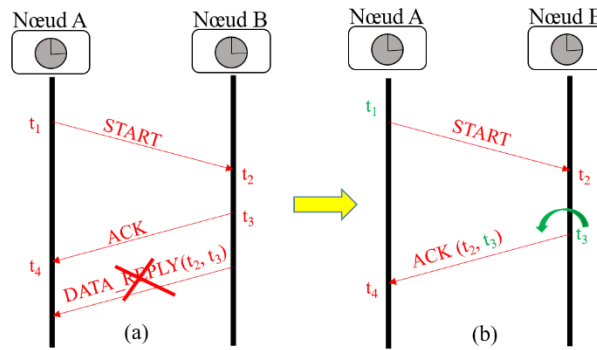


Figure 43 : Le protocole TWR (a) et sa version améliorée 2M-TWR (2Message-TWR) (b)

2M-TWR présente deux avantages majeurs :

- Il réduit la charge protocolaire en réduisant à deux le nombre de messages nécessaires pour effectuer un TWR.
- Il présente une forme compatible avec un échange standard de type DATA/ACK. Ainsi, en encapsulant les *timestamps* t_2 et t_3 dans les acquittements, tout nœud du réseau peut effectuer un *ranging* à chaque envoi de données, sans ajout de message supplémentaire. Dès lors, le *ranging* est intégré dans le trafic usuel du réseau, dans chaque échange DATA/ACK.

Les analyses de performances du protocole 2M-TWR (2-Message TWR) seront présentées dans le chapitre 3.

2.4.3 Proposition du protocole BB-TWR

Si 2M-TWR est intéressant, il se limite seulement à une paire de nœuds. BB-TWR (*Broadcast Based TWR*) est un protocole de collecte d'estampilles temporelles que l'on peut considérer comme une généralisation de 2M-TWR, mais à n nœuds. C'est un protocole basé essentiellement sur la diffusion de message beacon (ou tout autre message diffusé). De même que 2M-TWR peut être intégré dans les échanges DATA/ACK, nous allons voir que BB-TWR peut être intégré dans les *beacons*. Il est bien sûr également applicable à tout message en unicast, mais bien sûr moins performant car chaque trame ne permettra le *ranging* qu'entre les 2 nœuds communicants. On pourrait aussi imaginer que toute trame unicast diffusée en radio puisse aussi être exploitée par les autres nœuds non destinataires à portée, mais il faudrait pour cela que le *transceiver* radio ne filtre pas une trame radio ne lui étant pas destinée pour que le CPU puisse y récupérer les timestamps.

Dans BB-TWR, chaque nœud dispose d'une table de voisinage. Le remplissage de cette table se fait à chaque échange de trame *beacon*. Chaque nœud diffuse ses trames à tous les nœuds à portée à un saut suivant le principe de timestamping inspiré de 2M-TWR. Le calcul du ToF et de la distance se fait une fois que l'un des nœuds du réseau dispose des informations nécessaires pour le faire. Nous détaillerons cette condition en 2.4.3.1.

Dans le protocole que nous proposons, toutes les trames utilisées pour le *ranging* sont diffusées et les instants d'émission et de réception sont déposés dans chaque trame transmise. Une trame diffusée est composée d'un ou plusieurs Timestamp. Un timestamp est composé d'un champ Timestamp (T), d'un champ Direction (dir = T/R) qui renseigne si la trame est en émission ou en réception, un champ @src renseigne l'adresse du nœud émetteur, un champ @dst contient toujours une étoile (*) à l'émission pour dire que la trame est diffusée, et enfin un numéro de séquence.

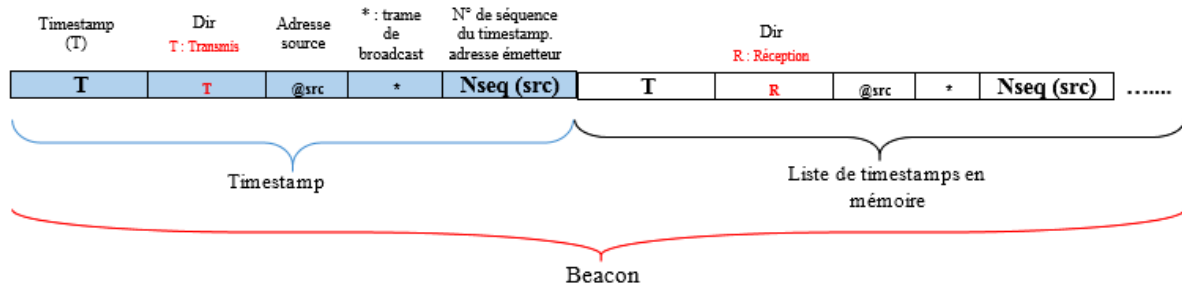


Figure 44 : Format de la trame BB-TWR

Une trame diffusée sera donc de la forme entête : Timestamp : $T_{dir\ src,\ dst}^{Nseq(src)}$ + (éventuellement) une liste de Timestamp de réception précédemment reçus, conservés en mémoire, et représentée entre accolades : $\{T_{R\ src,\ dst}^{Nseq(src)}\}$.

A titre d'exemple, la Figure 45 illustre l'émission d'un message par un nœud B à destination d'un nœud A.

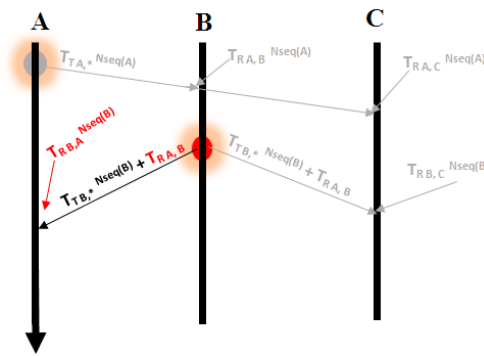


Figure 45 : Exemple de diffusion de trame

Dans cet exemple, le nœud B a conservé en mémoire l'instant de réception de la trame émise par le nœud A ($T_{R A,B}^{Nseq(A)}$). Lors de la diffusion de sa trame, le nœud B disposera aussi de sa propre estampille d'émission ($T_{T B,*}^{Nseq(B)}$) et des informations de la trame du nœud 1 reçue en mémoire. Le contenu de sa trame sera donc de la forme :

$$T_{T B,*}^{Nseq(B)} + \{T_{R A,B}^{Nseq(A)}\}$$

Comme nous l'avons vu auparavant, chaque message émis par un nœud porte son timestamp d'émission et éventuellement de timestamps de réception qu'il a en mémoire. Dans l'exemple illustratif présenté un peu plus tard en 2.4.4, nous allons utiliser trois nœuds pour illustrer le fonctionnement de notre protocole. Nous présenterons le diagramme de séquence de ces nœuds. Nous allons expliquer le processus de remplissage de la table des estampilles qui se fera au fur et à mesure que les messages seront échangés tout en présentant le contenu des messages.

2.4.3.1 Présentation générale du protocole BB-TWR

BB-TWR est un protocole basé essentiellement sur la diffusion de trames beacon par tous les nœuds du réseau destiné à tous les nœuds à portée. Chaque nœud estampille l'instant d'émission de sa propre trame, le transporte dans sa trame et dispose le cas échéant à la réception d'une trame, de son instant de

réception. Ces différentes estampilles temporelles sont portées dans la trame et diffusées aux autres nœuds.

Suivant le principe issu de 2M-TWR, deux messages suffisent pour que le nœud qui commence à émettre dispose des informations nécessaires lui permettant d'évaluer la distance qui le sépare d'un autre nœud. A chaque réception ou émission de trame, chaque nœud remplit sa table des estampilles nécessaires pour le calcul du ToF, ce qui lui permettra ensuite de calculer la distance correspondante.

La Figure 46 et la Figure 47 représentent respectivement la topologie générale du réseau et le diagramme de séquence général du protocole BB-TWR. Dans toute topologie, y compris celle présentée ici, tous les nœuds peuvent pratiquer le ranging dès lors qu'ils sont à portée l'un de l'autre.

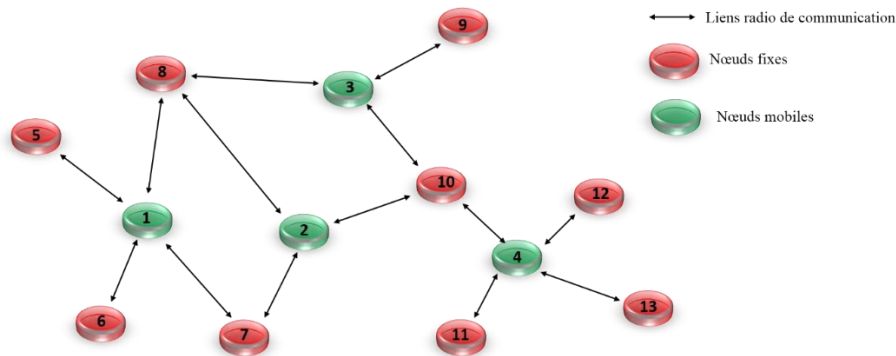


Figure 46 : Topologie générale du réseau utilisant le protocole BB-TWR

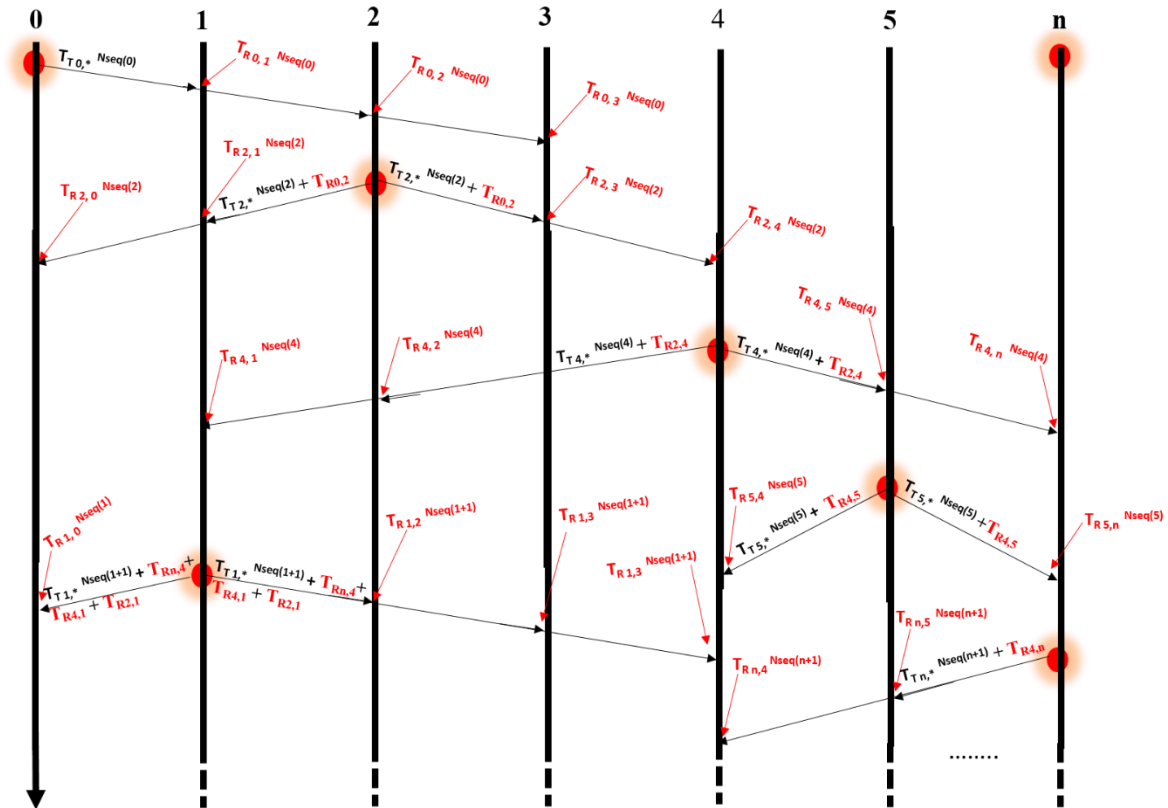


Figure 47 : Diagramme de séquence du protocole BB-TWR

Dans ce diagramme de séquence (Figure 47), chaque trame diffusée est matérialisée par un point rouge. Le nœud 0 est à portée des nœuds 1, 2 et 3. Le nœud 1 est à portée des nœuds 0, 2, 3 et 4. Le nœud 2 est à portée des nœuds 0, 1, 3 et 4. Le nœud 3 est à portée des nœuds 0, 1 et 2. Le nœud 4 est à portée des 1, 2, 3, 5 et 6. Le nœud 5 est à portée des nœuds 4 et 6 et le nœud 6 est à portée des nœuds 4 et 5. Le nœud 2 par exemple diffuse (dans sa période d'émission) sa trame à tous les nœuds après avoir reçu les trames des nœuds 0 et 1. Sa trame de diffusion comportera donc deux parties : son estampille d'émission ($T_{T2,*}^{Nseq(2)}$) et les instants de réception des trames du nœud 0 ($T_{R0,2}^{Nseq(0)}$) et du nœud 1 ($T_{R1,2}^{Nseq(0)}$). Ces estampilles de réception seront nécessaires pour les nœuds 0 et 1 pour le calcul du ToF et de la distance. A la réception de la trame du nœud 2, les nœuds 0 et 1 vont marquer l'instant de réception de cette trame puis récupérer l'estampille de réception marquée par le nœud 2 lors de leur réception de leur ainsi que l'instant d'émission de la trame du nœud 2. C'est quatre timestamps (y compris l'instant de diffusion de la trame du nœud des nœuds 0 et 2) permettront aux nœuds 0 et 1 d'estimer le ToF et la distance.

Dans l'exemple de la Figure 48, les échanges se font de manière synchrone, c'est-à-dire les nœuds émettent leurs trames dans des périodes d'émission bien définies. C'est le cas idéal dans la mesure où il n'y a pas de conflit d'accès au médium. Le protocole BB-TWR étant destiné à être encapsulé dans le trafic natif du réseau, ce cas idéal ne conviendrait pas à cet objectif. Le protocole BB-TWR ne devrait pas imposer de contraintes temporelles à une couche MAC chargée d'envoyer les beacons, qui ont déjà leurs propres contraintes temporelles, comme nous l'avons vu dans la section 2.2.

Pour nous rapprocher de cette réalité, il serait important d'envisager un mode asynchrone du protocole BB-TWR où les nœuds diffusent leurs trames de manière aléatoire, du moins sans maîtrise de l'instant précis de l'envoi. Dans ce mode, chaque nœud tire de manière aléatoire une période d'émission, diffuse sa trame et attend que sa table d'estampille soit remplie pour effectuer le calcul de la distance. Nous n'allons pas nous attarder sur ce mode dans ce chapitre 2, nous présenterons les performances de mode dans le chapitre 3.

2.4.3.2 Table d'estampille du protocole BB-TWR

Pour gérer efficacement les informations issues des échanges, un nœud a besoin de les stocker dans une table dédiée à cela. Lorsque cette table est remplie, il procède au calcul du ToF et donc de la distance. Nous allons présenter à titre d'exemple, le contenu de la table d'estampille du nœud d'adresse 0 avec ses voisins à portée (Tableau 7).

Dans cet exemple, le nœud 0 est à portée des nœuds 1, 2 et 3. Le tableau 7 représente la table d'estampille du nœud 0 comportant l'adresse des nœuds voisins à portée. Cette table se remplit à chaque émission et réception de trame. Les informations sont stockées suivant le formalisme défini dans la section 2.3.1.

Tableau 7 : Table 0, Table d'estampille du nœud d'adresse 0

Nœuds voisin	Estampille d'émission du nœud 0	Estampille de réception du nœud voisin	Estampille d'émission du nœud voisin	Estampille de réception du nœud 0
Voisin @1	$T_{T0,*}^{-1}$	$T_{R0,1}^{-1}$	$T_{T1,*}^{-1}$	$T_{R1,0}^{-1}$
Voisin @2	$T_{T0,*}^{-1}$	$T_{R0,2}^{-1}$	$T_{T2,*}^{-1}$	$T_{R2,0}^{-1}$
Voisin @3	$T_{T0,*}^{-1}$	$T_{R0,3}^{-1}$	$T_{T3,*}^{-1}$	$T_{R3,0}^{-1}$

De façon générale, chaque table est identifiée par l'adresse du nœud étudié et chaque ligne contient le nom du voisin (première colonne) et les différentes estampilles temporelles collectées, dans les quatre autres colonnes.

A la réception de la trame du nœud 0, le nœud d'adresse 1 va marquer l'instant de réception et la stocker dans une table d'estampille supplémentaires (Tableau 8 : table supplémentaire du nœud 1). Pour un nœud, cette table contient les informations de *ranging* en mémoire. Ces informations ne sont pas nécessaires pour son calcul de ToF, mais pour l'émetteur de la trame. Cette information sera émise lors de sa prochaine diffusion. Chaque nœud dispose de $n-1$ timestamp en mémoire. Le tableau 8 (table 1Sup) représente les informations supplémentaires dont dispose le nœud 1.

Tableau 8 : Table 1Sup, Table d'estampille supplémentaire du nœud 1

Nœud @1	$T_{R0,1}^1$
---------	--------------

La première colonne de cette table renseigne sur l'adresse du nœud. Les autres colonnes représentent les informations de timestamp supplémentaire. Cette table se remplira au fur et à mesure que le nœud d'adresse 1 recevra des trames.

2.4.3.3 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté le protocole qui servira de base à notre étude : le protocole BB-TWR. Dans la section 1.4 nous avons défini ce qu'était une session de ranging, étudié les protocoles références de ranging, leur amélioration et le nombre de trame utilisée pour chaque protocole. Plusieurs messages sont utilisés par les protocoles TWR-MM, SS-TWR-MA et SDS-TWR-MA. $6*n$ messages sont utilisés par le protocole SSDS-TWR et $4*n$ messages pour le PDS-TWR. Avec notre proposition, qui est la plus économe, nous avons une session de ranging composé $2*n$ messages. Avec BB-TWR, nous réduisons au maximum le nombre de message pour une session de ranging par rapport aux protocoles de référence TWR et SDS-TWR.

2.4.4 Exemple sur trois nœuds

2.4.4.1 Ordonnancement de la communication dans le protocole BB-TWR

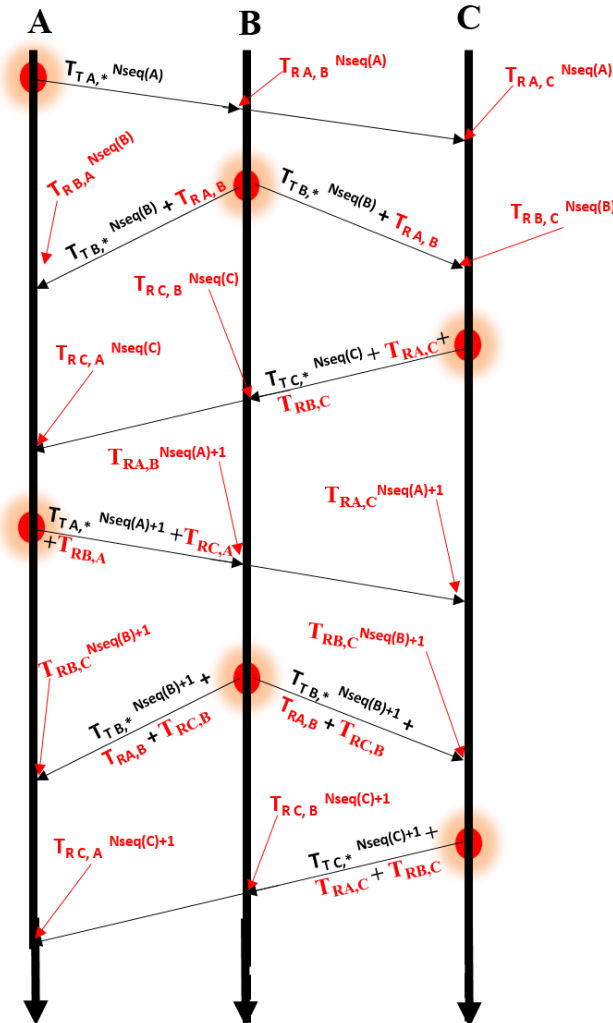


Figure 48 : Diagramme de séquence BB-TWR à 3 nœuds

La Figure 48 présente le diagramme de séquence BB-TWR avec des échanges réalisés avec trois nœuds en clique, donc tous à portée les uns des autres. Dans cet exemple, l'adresse des nœuds est représentée par les lettres A, B et C. Chaque numéro de séquence sera incrémenté et identifié à partir de l'adresse des nœuds. Nous allons expliquer le mécanisme de remplissage des différentes tables d'estampille à partir de cet exemple. Cette opération nous permettra aussi de décider à quel moment des échanges chaque nœud disposera des échanges nécessaires pour le calcul de la distance avec chacun de ses voisins directs.

2.4.4.2 Contenu des messages et remplissage des tables d'estampilles

Nous allons découvrir à titre d'exemple le contenu des trames que ces trois nœuds vont échanger suivant le principe général de BB-TWR. Nous allons par la suite remplir leur table d'estampille à chaque échange de trame. Pour chaque trame, nous disposons d'une table d'estampille qui doit contenir les informations nécessaires au calcul du *ToF* (et donc de la distance) et une table supplémentaire qui

contient des informations de *ranging* reçues mais qui ne sont pas nécessaires au nœud récepteur de la trame. Par exemple, un nœud B qui reçoit une trame d'un nœud A va forcément marquer l'instant de réception. Mais cet instant ne sera pas directement nécessaire pour lui, mais plutôt pour le nœud A émetteur de la trame ; pour cela, le nœud B va stocker cette information dans sa table supplémentaire de *ranging*. Elle sera diffusée par le nœud B, reçue et traitée par le nœud A et ignorée par les autres nœuds.

Dans notre exemple, dans la table d'estampille, les informations de *ranging* sont remplies par défaut par des informations absentes (le tableau est en rouge). Cela signifie que le nœud est en attente de ses informations pour évaluer la distance. Au fur et à mesure des échanges, ces informations changeront de couleur. Le vert ici signifie que le nœud étudié (émetteur de la trame) dispose de cette information de *ranging*.

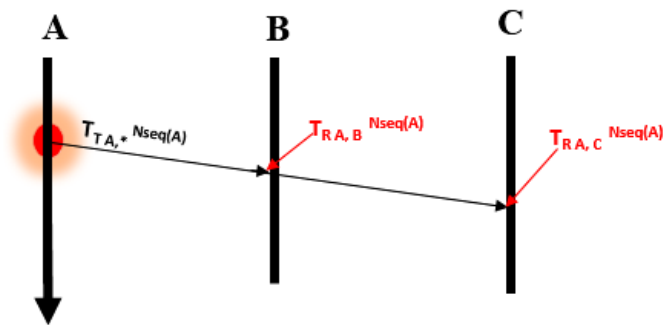


Figure 49 : Emission de la trame du nœud A

Le nœud A diffuse sa trame avec le numéro de séquence du timestamp $Nseq(A)$. Cette trame est diffusée à ses voisins : les nœuds (B et C).

Contenu de la trame : $T_{T A, *}^{Nseq(A)}$

Le nœud A dispose uniquement de son instant d'émission.

La table A renseigne sur les informations nécessaires au nœud A pour évaluer des distances le séparant des nœuds B et C. La table ASup est vide, cela signifie que le nœud A ne dispose d'aucune information supplémentaire de *ranging*.

Tableau 9 : Table A, Table d'estampille du nœud A

B	$T_{T A, *}^{Nseq(A)}$	$T_{R A, B}^{Nseq(A)}$	$T_{T B, *}^{Nseq(B)}$	$T_{R B, A}^{Nseq(B)}$
C	$T_{T A, *}^{Nseq(A)}$	$T_{R A, C}^{Nseq(A)}$	$T_{T C, *}^{Nseq(C)}$	$T_{R C, A}^{Nseq(C)}$

Tableau 10 : Table ASup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A

A				
---	--	--	--	--

Tableau 11 : Table B, Table d'estampille du nœud B

A	$T_{T B, *}^{Nseq(B)}$	$T_{R B, A}^{Nseq(B)}$	$T_{T A, *}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R A, B}^{Nseq(A)+1}$
C	$T_{T B, *}^{Nseq(B)}$	$T_{R B, C}^{Nseq(B)}$	$T_{T C, *}^{Nseq(C)}$	$T_{R C, B}^{Nseq(C)}$

Le nœud B ne dispose pas d'information (Table B en rouge) lui permettant d'effectuer un *ranging* avec les autres nœuds mais a déjà en mémoire (Table BSup) l'estampille de réception de la trame du nœud A.

Tableau 12 : Table BSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud B

B	$T_{R,A,B}^{Nseq(A)}$			
----------	-----------------------	--	--	--

Le nœud C aussi ne dispose pas d'information (Table C) lui permettant d'effectuer un *ranging* avec les autres nœuds mais a en mémoire (Table CSup) l'estampille de réception de la trame du nœud A.

Tableau 13 : Table C, Table d'estampille du nœud C

A	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,A}^{Nseq(C)}$	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R,A,C}^{Nseq(A)+1}$
B	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,B}^{Nseq(C)}$	$T_{T,B,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R,B,C}^{Nseq(B)+1}$

Tableau 14 : Table CSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud C

C	$T_{R,A,C}^{Nseq(A)}$			
----------	-----------------------	--	--	--

A cette étape, seul le nœud A dispose d'une seule information de *ranging* : l'instant d'émission de sa propre trame.

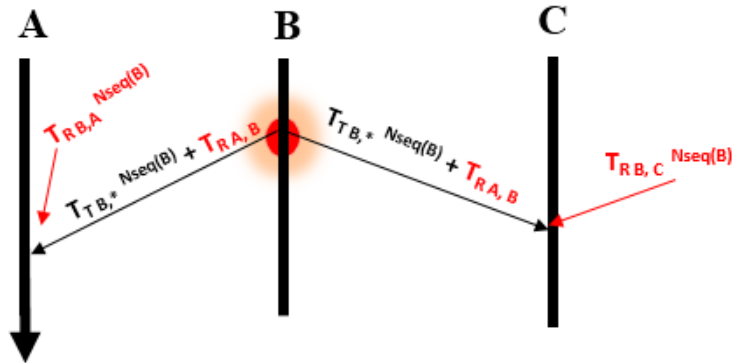


Figure 50 : Emission de la trame du nœud B

La trame suivante est diffusée par le nœud B avec le numéro de séquence du timestamp $Nseq(B)$. Le nœud B dispose dans sa table de *ranging* (table B en vert) de l'instant d'émission de sa trame et a en mémoire (Table BSup) l'instant de réception de la trame émise par A ($T_{R,A,B}$). Sa trame comporte donc l'instant d'émission de sa propre trame et l'instant de réception de la trame du nœud A.

Contenu de la trame : $T_{TB,*}^{Nseq(B)} + \{T_{RA,B}^{Nseq(A)}\}$

Tableau 15 : Table B, Table d'estampille du nœud B

A	$T_{TB,*}^{Nseq(B)}$	$T_{RB,A}^{Nseq(B)}$	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R,A,B}^{Nseq(A)+1}$
C	$T_{TB,*}^{Nseq(B)}$	$T_{RB,C}^{Nseq(B)}$	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,B}^{Nseq(C)}$

Tableau 16 : Table BSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud C

B	$T_{R,A,B}^{Nseq(A)}$			
----------	-----------------------	--	--	--

A cette étape, le nœud A dispose de suffisamment d'informations lui permettant d'évaluer la distance le séparant du nœud B seulement (Table A) (toute la ligne est en vert).

Tableau 17 : Table A, Table d'estampille du nœud A

B	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)}$	$T_{R,A,B}^{Nseq(A)}$	$T_{T,B,*}^{Nseq(B)}$	$T_{R,B,A}^{Nseq(B)}$
C	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)}$	$T_{R,A,C}^{Nseq(A)}$	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,A}^{Nseq(C)}$

Tableau 18 : Table ASup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A

A				
----------	--	--	--	--

La table d'estampille du nœud C (Table C en rouge) est pour le moment vide. Il n'a pas encore émis de trames. Il dispose cependant d'informations supplémentaires (Table CSup), ce sont les instants d'émission et de réception des nœuds A et B.

Tableau 19 : Table C, Table d'estampille du nœud C

A	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,A}^{Nseq(C)}$	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R,A,C}^{Nseq(A)+1}$
B	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,B}^{Nseq(C)}$	$T_{T,B,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R,B,C}^{Nseq(B)+1}$

Tableau 20 : Table CSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A

C	$T_{R,A,C}^{Nseq(A)}$	$T_{R,B,C}^{Nseq(B)}$		
----------	-----------------------	-----------------------	--	--

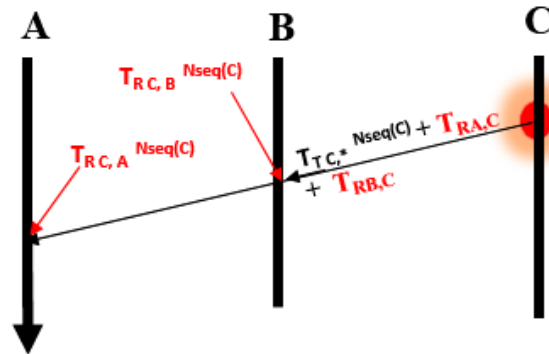


Figure 51 : Émission de la trame du nœud C

Le nœud C, à son tour, diffuse sa trame avec le numéro de séquence du timestamp $Nseq(C)$.

Contenu de la trame : $T_{T,C,*}^{Nseq(C)} + \{T_{R,A,C}^{Nseq(A)}, T_{R,B,C}^{Nseq(B)}\}$

Le nœud C a en mémoire (Table CSup) l'instant de réception de la trame des nœuds A et B. Sa trame comporte donc l'instant d'émission de sa propre trame et l'instant de réception de la trame des nœuds A et B.

Tableau 21 : Table C, Table d'estampille du nœud C

A	$T_{T C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R C,A}^{Nseq(C)}$	$T_{T A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R A,C}^{Nseq(A)+1}$
B	$T_{T C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R C,B}^{Nseq(C)}$	$T_{T B,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R B,C}^{Nseq(B)+1}$

Sa table d'estampille commence à se remplir (Table C en vert partiellement). Il dispose dans un premier temps de l'instant d'émission de sa propre trame.

A la réception de la trame du nœud C, les nœuds A et B peuvent évaluer la distance qui les sépare du nœud C (Table A et B en vert). Ils disposent de l'estampille d'émission de la trame du nœud C comme information supplémentaire (Table ASup et BSup).

Tableau 22 : Table A, Table d'estampille du nœud A

B	$T_{T A,*}^{Nseq(A)}$	$T_{R A,B}^{Nseq(A)}$	$T_{T B,*}^{Nseq(B)}$	$T_{R B,A}^{Nseq(B)}$
C	$T_{T A,*}^{Nseq(A)}$	$T_{R A,C}^{Nseq(A)}$	$T_{T C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R C,A}^{Nseq(C)}$

Tableau 23 : Table ASup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A

A	$T_{T C,*}^{Nseq(C)}$			
----------	-----------------------	--	--	--

Tableau 24 : Table B, Table d'estampille du nœud B

A	$T_{T B,*}^{Nseq(B)}$	$T_{R B,A}^{Nseq(B)}$	$T_{T A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R A,B}^{Nseq(A)+1}$
C	$T_{T B,*}^{Nseq(B)}$	$T_{R B,C}^{Nseq(B)}$	$T_{T C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R C,B}^{Nseq(C)}$

Tableau 25 : Table BSup, Table d'estampille du nœud B

B	$T_{R A,B}^{Nseq(A)}$	$T_{T C,*}^{Nseq(C)}$		
----------	-----------------------	-----------------------	--	--

La formule du temps de vol est donnée (ToF) dans les équations 1, 2 et 3.

$$ToF_{A-B} = \frac{(T_{R B,A}^{Nseq(B)} - T_{T A,*}^{Nseq(A)}) - (T_{T B,*}^{Nseq(B)} - T_{R A,B}^{Nseq(A)})}{2} \quad (31)$$

$$ToF_{A-C} = \frac{(T_{R C,A}^{Nseq(C)} - T_{T A,*}^{Nseq(A)}) - (T_{T C,*}^{Nseq(C)} - T_{R A,C}^{Nseq(A)})}{2} \quad (32)$$

$$ToF_{B-C} = \frac{(T_{R C,B}^{Nseq(C)} - T_{T B,*}^{Nseq(B)}) - (T_{T C,*}^{Nseq(C)} - T_{R B,C}^{Nseq(B)})}{2} \quad (33)$$

$$distance = ToF * C \quad (34)$$

Soit c = vitesse de propagation du signal dans l'espace.

Ces trois équations montrent comment le calcul du ToF s'effectue à partir des estampilles reçues.

Le nœud A peut évaluer la distance qui le sépare des nœuds B et C (Table A, équations 31 et 32). Le nœud B peut évaluer la distance qui le sépare seulement du nœud C (Table B, équation 33). Dans les prochains échanges, les informations supplémentaires permettront au nœud B d'évaluer la distance qui le sépare du nœud A, et au nœud C d'évaluer la distance qui le sépare des nœuds A et B.

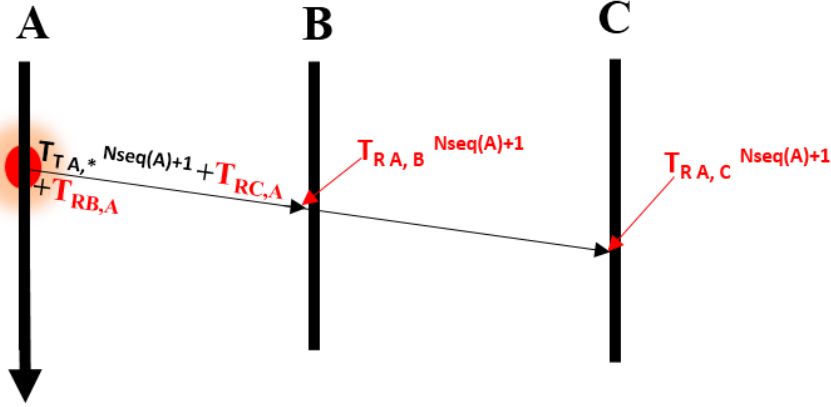


Figure 52 : Émission de la deuxième trame du nœud A

A cette étape, nœud A va diffuser sa deuxième trame, le numéro de séquence du timestamp sera incrémenté ($Nseq(A)+1$).

Contenu de la trame : $T_{TA,*}^{Nseq(A)+1} + \{T_{RB,A}^{Nseq(B)}, T_{RC,A}^{Nseq(C)}\}$

Le nœud A, à cette étape dispose d'une nouvelle table d'estampille (Table A), il a en mémoire les instants de réception des premières trames émises par les nœuds B et C (Table BSup).

Tableau 26 : Table A, Table d'estampille du nœud A

B	$T_{TA,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{RA,B}^{Nseq(A)+1}$	$T_{TB,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{RB,A}^{Nseq(B)+1}$
C	$T_{TA,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{RA,C}^{Nseq(A)+1}$	$T_{TC,*}^{Nseq(C)+1}$	$T_{RC,A}^{Nseq(C)+1}$

Tableau 27 : Table BSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud B

B	$T_{RB,A}^{Nseq(B)}$	$T_{RC,A}^{Nseq(C)}$		
----------	----------------------	----------------------	--	--

La trame 4 porte son propre instant d'émission (beacon numéro $Nseq(A)+1$), les instants de réception des trames du nœud B et du nœud C nécessaires pour les nœuds B et C. A la réception de cette trame (deuxième trame du nœud A), les nœuds B et C pourront remplir leur table de *ranging* (Table B et C en vert) et effectuer le calcul de la mesure du temps de vol, ce qui leur permettra d'évaluer la distance qui les sépare du nœud A.

Tableau 28 : Table B, Table d'estampille du nœud B

A	$T_{TB,*}^{Nseq(B)}$	$T_{RB,A}^{Nseq(B)}$	$T_{TA,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{RA,B}^{Nseq(A)+1}$
C	$T_{TB,*}^{Nseq(B)}$	$T_{RB,C}^{Nseq(B)}$	$T_{TC,*}^{Nseq(C)}$	$T_{RC,B}^{Nseq(C)}$

Tableau 29 : Table C, Table d'estampille du nœud C

A	$T_{TC,*}^{Nseq(C)}$	$T_{RC,A}^{Nseq(C)}$	$T_{TA,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{RA,C}^{Nseq(A)+1}$
B	$T_{TC,*}^{Nseq(C)}$	$T_{RC,B}^{Nseq(C)}$	$T_{TB,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{RB,C}^{Nseq(C)+1}$

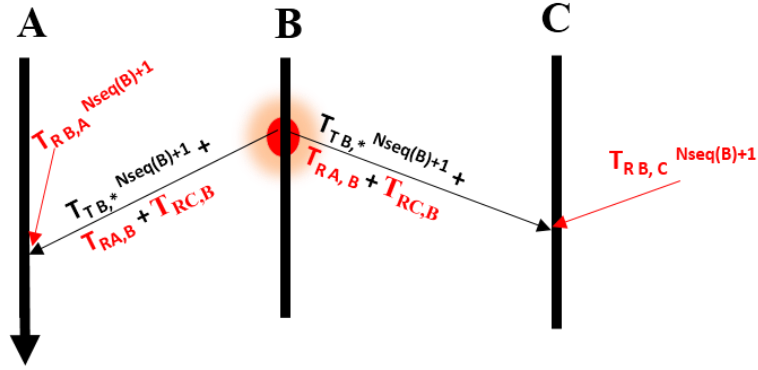


Figure 53 : Émission de la deuxième trame du nœud B

Le nœud B diffuse sa deuxième trame avec le numéro de séquence du timestamp $Nseq(B)+1$.

Contenu de la trame : $T_{T,B,*}^{Nseq(B)+1} + \{T_{R,C,B}^{Nseq(B)}, T_{R,A,B}^{Nseq(B)+1}\}$

Cette trame contient son instant d'émission et l'instant de réception des trames des nœuds C et A.

Tableau 30 : Table C, Table d'estampille du nœud C

A	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,A}^{Nseq(C)}$	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R,A,C}^{Nseq(A)+1}$
B	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)}$	$T_{R,C,B}^{Nseq(C)}$	$T_{T,B,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R,B,C}^{Nseq(C)+1}$

Tableau 31 : Table A, Table d'estampille du nœud A

B	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R,A,B}^{Nseq(A)+1}$	$T_{T,B,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R,B,A}^{Nseq(B)+1}$
C	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R,A,C}^{Nseq(A)+1}$	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)+1}$	$T_{R,C,A}^{Nseq(C)+1}$

Tableau 32 : Table B, Table d'estampille du nœud B

A	$T_{T,B,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R,B,A}^{Nseq(B)+1}$	$T_{T,A,*}^{Nseq(A)+2}$	$T_{R,A,B}^{Nseq(A)+2}$
C	$T_{T,B,*}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R,B,C}^{Nseq(B)+1}$	$T_{T,C,*}^{Nseq(C)+1}$	$T_{R,C,B}^{Nseq(C)+1}$

A partir de ces informations, le nœud C pourra évaluer la distance qui le sépare du nœud B (Table C), le nœud A pourra une seconde fois évaluer la distance qui le sépare du nœud B (Table A) avec les nouvelles informations de ranging, et le nœud B pourra dans le prochain échange évaluer la distance qui le sépare du nœud C ; de même pour le nœud A qui pourra évaluer la distance qui le sépare du nœud C. La table d'estampille du nœud B (Table B) contient seulement l'instant d'émission de sa trame.

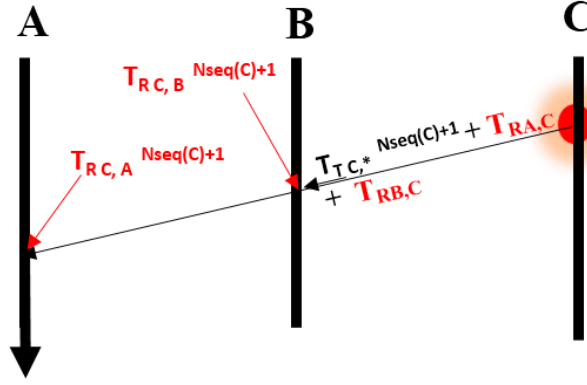


Figure 54 : Emission de la deuxième trame du nœud C

Le nœud C diffuse sa deuxième trame avec le numéro de séquence du timestamp $Nseq(C+1)$.

Contenu de la trame : $T_{T C, *}^{Nseq(A+1)} + \{T_{R A, C}^{Nseq(A+1)}, T_{R B, C}^{Nseq(B+1)}\}$

Elle transporte son propre instant d'émission et a en mémoire les instants de réception des deuxièmes trames des nœuds A et B. A la réception de cette trame, les nœuds A et B pourront évaluer la distance qui les sépare du nœud C.

Tableau 33 : Table A, Table d'estampille du nœud A

B	$T_{T A, *}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R A, B}^{Nseq(A)+1}$	$T_{T B, *}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R B, A}^{Nseq(B)+1}$
C	$T_{T A, *}^{Nseq(A)+1}$	$T_{R A, C}^{Nseq(A)+1}$	$T_{T C, *}^{Nseq(C)+1}$	$T_{R C, A}^{Nseq(C)+1}$

Tableau 34 : Table B, Table d'estampille du nœud B

A	$T_{T B, *}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R B, A}^{Nseq(B)+1}$	$T_{T A, *}^{Nseq(A)+2}$	$T_{R A, B}^{Nseq(A)+2}$
C	$T_{T B, *}^{Nseq(B)+1}$	$T_{R B, C}^{Nseq(B)+1}$	$T_{T C, *}^{Nseq(C)+1}$	$T_{R C, B}^{Nseq(C)+1}$

Tous les nœuds disposent à cet instant des informations nécessaires pour la mesure de distance avec leurs voisins. Deux échanges par nœuds sont indispensables pour le calcul des distances avec trois nœuds.

Les performances de BB-TWR seront présentées dans le chapitre suivant.

2.5 Conclusion

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, la technologie UWB se présente comme le bon candidat permettant d'obtenir un *ranging* performant basé sur le temps de vol. Les protocoles de *ranging* adapté à la localisation en intérieur, dans un réseau de capteurs sans fil et pouvant exploiter la technologie UWB sont nombreux. Ils peuvent cependant avoir des fonctionnements très variés.

A l'issue de notre étude préliminaire sur les travaux existants issus de la communauté scientifique, une solution nous a semblé donner une orientation favorable à notre travail. C'est le protocole TWR. Nous avons choisi de l'utiliser car sa faible complexité nous donne une base intéressante à améliorer, il est performant d'un point de vue surcharge protocolaire. Cette solution nous a offert des perspectives intéressantes dans le cas d'une intégration du trafic de *ranging* dans le trafic usuel du réseau, dès l'instant où il sera moins sensible aux contraintes fixées par les protocoles du réseau.

Nous avons proposé le protocole de *ranging* 2M-TWR qui est une amélioration de ce protocole. Nous avons augmenté ainsi la performance du protocole en réduisant de 33% le nombre de messages envoyés. Enfin nous avons proposé un protocole de *ranging* BB-TWR issu des principes de 2M-TWR, utilisant des trames diffusées et qui permettent d'effectuer le *ranging* avec n nœuds.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le testbed sur lequel nous avons prototypé, notre environnement de travail ainsi les performances des protocoles proposés.

Chapitre 3

PREUVE DE CONCEPTION ET ANALYSE DE PERFORMANCE

Après avoir fait une présentation détaillée de nos propositions protocolaires, nous allons dans ce chapitre, étudier leurs performances. Notre objectif est d'avoir une approche du monde réel en nous basant sur des vrais nœuds. Nous allons donc valider ces propositions par un prototypage réel. Pour cela, nous allons exploiter le testbed OpenWiNo[68] composés de nœud WiNo (Wireless Node).

Dans ce qui suit, nous allons étudier le testbed OpenWiNo dans lequel nous avons, dans un premier temps, implémenté les protocoles de base de ranging TWR et SDS-TWR ainsi que la version améliorée du protocole TWR nommé 2M-TWR. Nous avons, sur ce même testbed, évalué l'impact de la dérive des horloges des nœuds. BB-TWR est finalement implémenté dans ce testbed.

Nous allons, dans ce chapitre, analyser puis interpréter les différents protocoles implémentés dans notre environnement de travail. Nous avons exposé théoriquement dans les sections 1.4 et 2.1.4.1 l'impact protocolaire lié à la dérive des horloges. Nous allons donc porter une attention particulière sur cet aspect dans l'implémentation de nos protocoles.

3.1 Présentation de l'environnement de travail

Un testbed (appelé aussi banc d'essai) est une plateforme permettant d'effectuer des tests très appliqués, et reproductibles. Ces plateformes ont pour but de tester et de valider de nouveaux protocoles, des théories scientifiques, des outils informatiques etc.

Le terme testbed est utilisé dans de nombreuses disciplines comme l'informatique, l'automobile, l'aéronautique etc., pour décrire la recherche expérimentale. Ces plateformes peuvent être composées d'un grand nombre de nœuds, permettant aux utilisateurs de tester leurs protocoles, via Internet ou en local, sur des nœuds réels en tenant compte du passage à l'échelle.

Pour notre étude, nous avons exploité utilement les plateformes de prototypage rapide de protocole OpenWiNo. Dans ce qui suit, nous allons présenter ces testbeds utilisés pour tester nos différents protocoles.

3.1.1 Testbed OpenWiNo

OpenWiNo est une plateforme matérielle et logicielle développée à l'IRIT dans l'équipe IRT hébergée dans les locaux de recherche de l'IUT de Blagnac, permettant le prototypage rapide de protocoles des réseaux de capteurs sans fil et les réseaux de collecte de l'Internet des Objets.

La plateforme fournit un environnement de développement incluant une grande versatilité au niveau de couche physique. Le tableau 35 et la Figure 55 résument les différents types de nœuds WiNo élaborés jusqu'ici. Le WiNoRF22 (a), le TeensyWiNo (b), le DecaWiNo (c) et le WiNoIR (d).

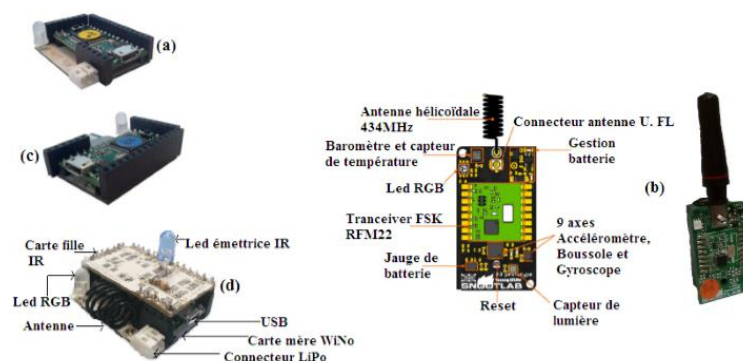


Figure 55 : Les nœuds WiNos

Pour notre étude, nous avons utilisé les nœuds DecaWiNo (Nœud C) qui sont des WiNos compatibles UWB. Nous ferons une présentation détaillée de ce nœud dans la section 3.1.2.

Tableau 35 : Caractéristiques des WiNos développés [69] [70]

	WiNoRF22	TeensyWiNo	DecaWiNo	WiNoVW	WiNoLoRa	WiNoIR
CPU/RAM/ Flash	ARM Cortex M4 (32bit) 72MHz, 64kB RAM, 256kB Flash (PJRC Teensy 3.1)					
Transceiver	HopeRF RFM22b : 200-900MHz, 1-125kbps, GFSK/FSK/OOK, +20dBm		DWM1000 : UWB IEEE 802.15.4	Variés	RFM95	RF22 + Diodes IR
Librairie	RadioHead		DecaDuino	VirtualWire	RadioHead	IrRemote
Capteurs	Température, Luminosité	Température, Luminosité, Baromètre, Magnétomètre, Accéléromètre, Gyromètre	Température, Luminosité			
Usage	WSN, IoT		IoT avec Ranging, localisation en intérieur, courte portée	Communication très bas débit sur médiums non conventionnels	Longue portée, très bas débit	
Disponibilité	DIY	snootlab.com	DIY (<i>Do It Yourself</i> , à assembler soi-même)			
Autres	RGB LED, GPIOs, PWM, ADC/DAC, SPI, I2C, CANbus					

L'approche *Open Hardware* de cette plateforme permet de changer facilement de couche Physique, en changeant le *transceiver* et le driver associé.

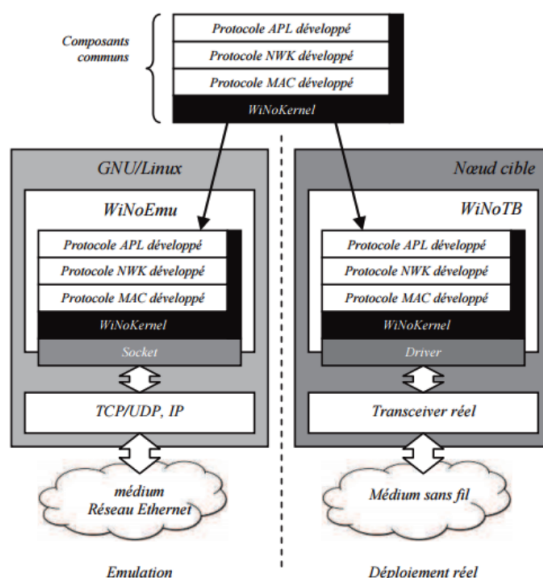


Figure 56 : Architecture

OpenWiNo est composé initialement des sous-systèmes WiNoEmu (Emulator) et WiNoTB (Testbed) partageant un noyau commun WiNoKernel. La Figure 56 illustre les liens entre ses trois sous-systèmes.

- Le noyau (kernel) fournit les outils réseaux de base (horloge, encapsulation, gestion des files d'attente) et l'empilement protocolaire, le nœud ne possède généralement pas de système d'exploitation,
- L'environnement d'émulation permet d'expérimenter les protocoles réalisés dans un environnement robuste et maîtrisé,
- L'environnement de déploiement réel est le lieu où le noyau sera exécuté sur des nœuds réels.

Le langage de développement utilisé dans OpenWiNo est le Langage C et les nœuds WiNo s'appuient sur l'environnement matériel et logiciel ouvert Arduino, ce qui le rend très facilement interopérable avec des capteurs et actionneurs réels. Le module Arduino utilisé ici est un Teensy 3.1 [71]. Il est basé sur un processeur ARM Cortex M4. L'environnement OpenWiNo dispose d'un design favorisant une totale mise en veille, contrairement à la plupart des modules Arduinos.

OpenWiNo est une plateforme fortement adaptée aux protocoles contraints en énergie. Son rapport capacité de traitement sur énergie consommée est très convenable. La politique d'économie d'énergie appliquée aux WiNos permet aux nœuds de fonctionner pendant plusieurs mois en utilisant deux piles AAA [72]. Le tableau 36 donne un aperçu précis sur l'état de consommation des nœuds.

Tableau 36 : Consommation d'énergie des nœuds WiNo [70]

Elément	Etat	Consommation énergétique (Vcc = 3.7 v)
CPU	En activité, 96MHz	129mW
	En activité, 72MHz	103mW
	En activité, 48MHz	88.8mW
	En activité, 24MHz	55.5mW
Freescale MK20DX256 VLH7	En mode <i>Sleep</i> , toute fréquence, LPTMR wake	2mW
	En mode <i>DeepSleep</i> , toute fréquence, LPTMR wake	650µW
	En mode <i>Hibernate</i> , toute fréquence, LPTMR wake	<30µW
Transceiver	Transmission (10dBm)	76mW
	Réception	57mW
HopeRF RFM22b	<i>Idle</i>	26mW
	<i>Sleep</i>	<5µW

OpenWiNo permet aussi l'administration du réseau déployé à distance, grâce au *remote shell* intégré (programmation des WiNo et reprogrammation du micro logiciel, débogage, suivi de déploiement). Une interface web appelée Webino (Figure 57) a été développée pour faciliter la gestion simple des nœuds WiNo en expérimentation.

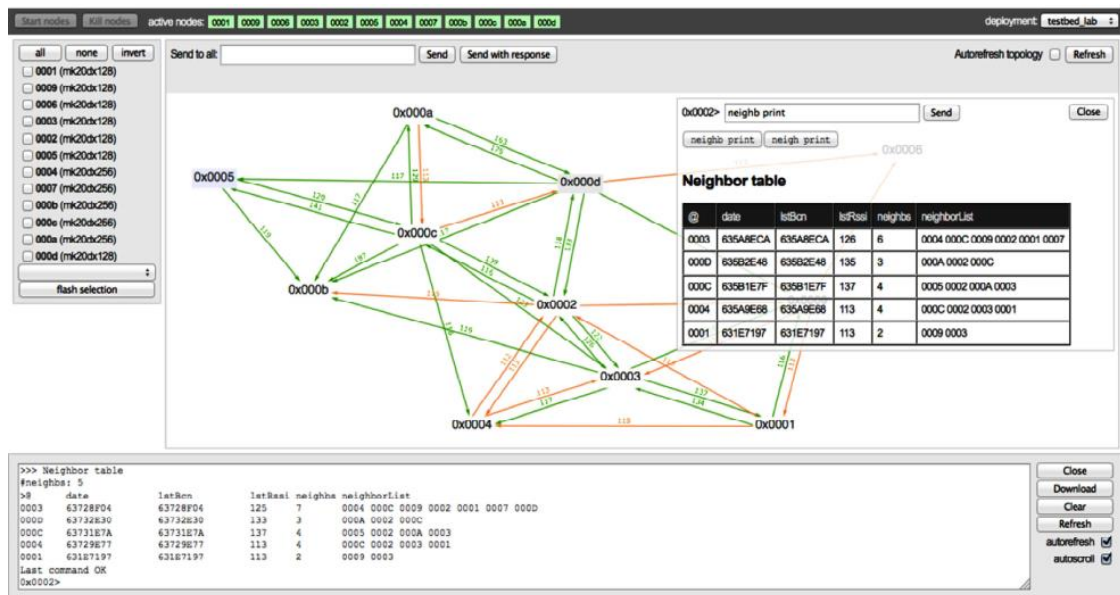


Figure 57 : Gestion des nœuds WiNo via l'interface web Webino [68]

Avec OpenWiNo, le prototypage des protocoles devient simple. De plus, les nœuds WiNo sont de très petites tailles et consomment très peu d'énergie. Les nœuds autonomes en énergie peuvent être testés sur plusieurs mois.

3.1.2 Les nœuds DecaWiNo

Comme nous l'avons mentionné dans la section 3.1.1., plusieurs variantes de nœuds WiNo ont été développées. Pour notre étude, nous avons utilisé le nœud DecaWiNo qui est un WiNo composé d'une carte Arduino (Teensy 3.2) et du module DWM1000 du constructeur DecaWave [73], comprenant un *transceiver* UWB et une antenne.

3.1.2.1 La carte Arduino Teensy 3.2

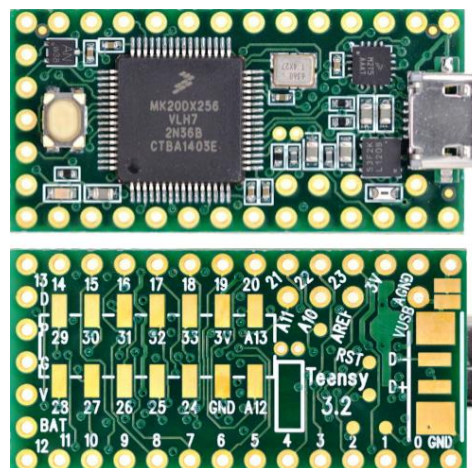


Figure 58 : Carte Teensy 3.2

Le module Arduino Teensy 3.2 est une carte non officielle de la gamme des cartes Arduino, mais le Teensyduino (logiciel complémentaire pour l'IDE Arduino) a été adapté de manière à ce que de nombreux projets Arduino soient compatibles avec la carte Teensy 3.2. C'est un module très facile à prendre en main et très peu encombrant. Il intègre deux convertisseurs (analogique/numérique), une horloge RTC (*Real-Time Clock*) et d'un port USB OTG (*On-The-Go*) pour le développement du

microcontrôleur. Tout le processus de programmation est réalisé sans avoir à passer par une machine (ou programmeur externe) intermédiaire. Il se fait directement, en langage C. Le code source est cross- compilé et envoyé via son port USB à l'aide d'un câble standard USB. Il fonctionne sous Windows, MacOS X et Linux.

Le Teensy intègre un processeur Cortex ARM M4 32 bits (MK20DX256VLH7) cadencé à une fréquence de 72 MHz avec une mémoire flash de 256 kbits. La RAM est de 64 kbits alors que 16 kbits sont largement suffisants pour toutes les bibliothèques Arduino. Les 64 kbits définis pourront donc aisément supporter des applications avancées.

La version 3.2 du Teensy dispose d'un régulateur 3,3 V plus robuste que les versions antérieures. Elle a la possibilité de pouvoir alimenter directement une carte Ethernet Wiz820io, une carte WIFI de type ESP8266 ou toute autre carte alimentée en 3.3V.

3.1.2.2 Le module DWM1000 de DecaWave

Le module DWM1000 (Figure 59) est composé d'un *transceiver* DW1000 Ultra Wide Band (UWB) (Figure 60) de DecaWave, d'une antenne, d'un symétriseur d'antenne, de circuits RF et d'un quartz. Le DWM1000 est responsable de la gestion de l'alimentation et des circuits d'horloge.

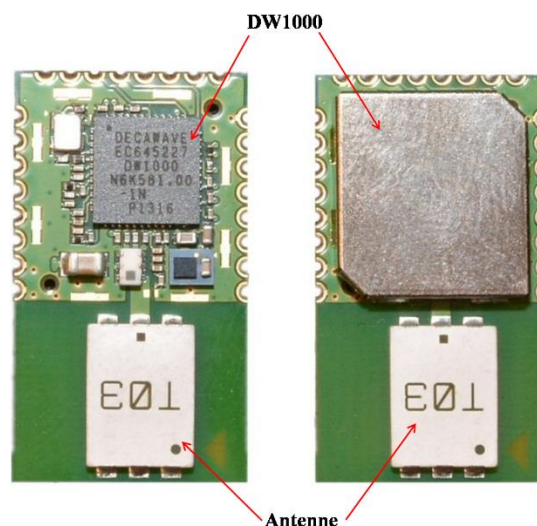


Figure 59 : Le module DWM1000 de DecaWave

3.1.2.2.1 Le transceiver DW1000

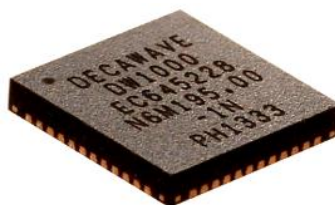


Figure 60 : Transceiver DW1000

Le DW1000 est un composant à faible consommation énergétique et à faible débit. Il est entièrement conforme au standard IEEE 802.15.4-2011 : UWB et aux masques spectraux définis par le FCC et l'ETSI tout en proposant des améliorations. Le DW1000 supporte 6 canaux (de 3,5 GHz à 6,5 GHz) (Tableau 37) définis par le standard UWB, avec des débits de transferts de données de 110 kbit/s,

850 kbit/s et de 6.8 Mbit/s. On peut envoyer des données de taille beaucoup plus grande que les 127 octets maximaux défini par le standard. Le DW1000 propose des longueurs de trame maximales de 1023 octets pour les applications à haut débit de données. La bande passante maximale du récepteur DW1000 est d'environ 900 MHz pour les canaux 4 et 7 (Tableau 37).

Tableau 37 : Les canaux UWB pris en charge par le DW1000

Numéro du canal UWB	Fréquence centrale (MHz)	Band (MHz)	Largueur de bande (MHz)
1	3494,4	3244,8-3744	499,2
2	3993,6	3774-4243,2	499,2
3	4492,8	4243,2-4742,4	499,2
4	3993,6	3328-4659,2	1331,2
5	6489,6	6240-6739,2	499,2
7	6489,6	5980,3-6998,9	1081,6

Parfaitement adapté aux systèmes de localisation en temps réel de précision (RTLS : *Real-Time Locating System*), le DW1000 est prévu pour être utilisé dans les systèmes de localisation basés sur le TWR ou le TDOA pour localiser des objets avec une précision de 10 cm [74]. Il est aussi annoncé par son fabricant pour être utilisé dans le domaine de la santé, des réseaux de capteurs sans fil, dans le domaine industriel, etc.

L'alimentation du transceiver varie de 2,8 V à 3,6 V. Les modes SLEEP et DEEP SLEEP du DW1000 consomment respectivement 2 μ A et 100 nA. Il intègre des fonctionnalités MAC comme le filtrage automatique des trames, la génération et la vérification du FCS¹³, l'acquittement automatique et un double buffer de réception. Il intègre aussi une interface SPI¹⁴ vers le processeur hôte. Il est possible de connecter une antenne au DW1000 (**Figure 61**).

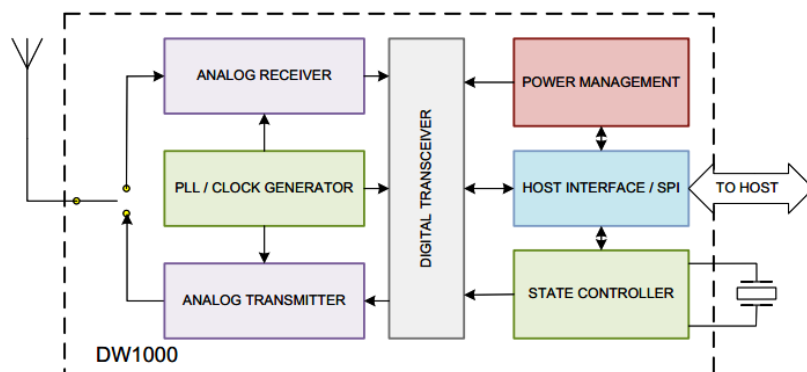


Figure 61 : Schéma du DW1000 [75]

3.1.2.2.2 Calibration du module DW1000 par l'*antenna delay*

Le calcul précis des *timestamps* est indispensable afin d'obtenir une bonne précision de la mesure de *ranging*. Pour y parvenir, le constructeur recommande le réglage de la valeur de l'*Antenna Delay*. L'*Antenna Delay* permet de compenser les retards introduits par les PCB¹⁵, les composants externes (autres modules DW1000, processeurs...), l'antenne et les retards dans le DW1000. Le DW1000 permet de calibrer l'*Antenna Delay*. Pour calibrer l'*Antenna Delay*, le ranging est réalisé à une distance connue en utilisant deux modules DW1000. L'*Antenna Delay* est réglé jusqu'à ce que la distance évaluée par

¹³ FCS: Frame Check Sequence

¹⁴ SPI: Serial Peripheral Interface

¹⁵ PCB: Printed Circuit Board

les nœuds soit exactement la même réelle. La valeur de l'*Antenna Delay* est par la suite stockée dans la mémoire OTP¹⁶ de chaque module DW1000.

Dans la section suivante, nous montrerons comment le module DWM1000 est connecté au Teensy 3.2.

3.1.2.2.3 La description du module DWM1000

Le module DWM1000 intègre un DW1000 et une antenne, il supporte toutes les caractéristiques techniques définies dans le DW1000. Le DWM1000 dispose d'un cristal de référence intégré à 38,4 MHz. Le cristal réduit l'erreur de la fréquence initiale à environ 2 ppm [76].

Un nœud DecaWiNo est composé de cet ensemble défini et présenté dans la **Figure 62**.

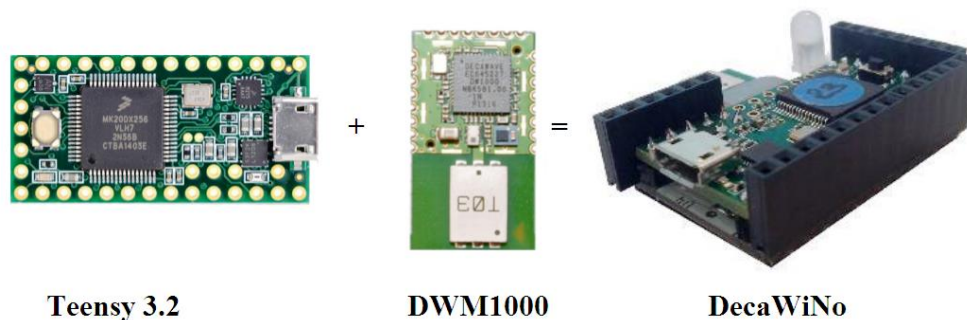


Figure 62 : Les différentes composantes du nœud DecaWiNo

Pour piloter pleinement ce nœud, l'équipe a développé en interne la librairie DecaDuino [64]. La section suivante présente cette librairie et ses fonctionnalités.

3.1.3 La librairie DecaDuino

Dans cette section, nous présentons la librairie DecaDuino, un *framework* ouvert, basé sur la couche physique UWB, qui permet le développement de protocoles de ranging basés sur le concept de la mesure du temps de vol fournie par les nœuds dans un réseau de capteurs sans fil.

3.1.3.1 Présentation générale de la librairie DecaDuino

La librairie DecaDuino est un point d'accès de service de la couche physique (PHY-SAP) comme le montre la pile protocolaire de la **Figure 63**. Elle fournit les deux interfaces physiques (*Physical-Data* : PD et *Physical Layer Management Entity* : PLME-SAP) qui permettent aux protocoles de niveau MAC d'échanger des données et de configurer le *transceiver* (vitesse de transmission, choix du canal, paramètres de préambule...). Le but de ce framework est de faciliter la mise en œuvre de protocoles basés sur la mesure du temps de vol, DecaDuino a proposé, au niveau de la couche physique, l'accès à un *timer* qui permet un *timestamping* précis des messages transmis (t_{TX}) et reçus (t_{RX}). Enfin, DecaDuino met en œuvre des fonctionnalités avancées de synchronisation et de *timestamping* comme la transmission retardée des messages (*Delayed transmission*) et *receiver skew evaluation* qui permet d'évaluer, à la réception d'un message, la différence d'horloges entre le nœud émetteur et le nœud récepteur du message. Ces fonctionnalités sont toutes indispensables pour obtenir une précision centimétrique de la mesure de la distance.

¹⁶ OTP : One Time Programmable

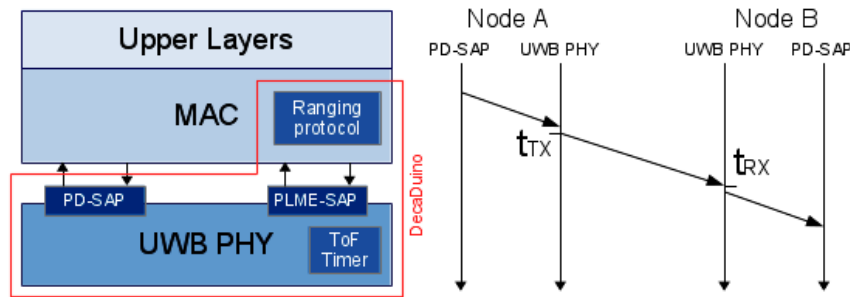


Figure 63 : La librairie DecaDuino dans la pile protocolaire et diagramme de séquence [77]

Comme nous l'avons signifié dans la section précédente, la librairie DecaDuino a été conçue pour piloter les nœuds DecaWino. C'est donc pour être compatible avec ces derniers qu'elle a été développée dans l'écosystème Arduino et est aujourd'hui disponible dans [77] en tant que bibliothèque Arduino. Le choix de l'environnement Arduino se justifie par le fait qu'il permet un prototypage et une évaluation rapides sur des *testbeds* peu coûteux mais très robustes : cet aspect permet de construire et de déployer localement ces bancs d'essai sur place pour une surveillance adéquate des expériences. DecaDuino permet aux couches supérieures de profiter pleinement des avantages offerts par les *transceivers* UWB de DecaWave, à condition qu'une antenne appropriée soit connectée au DW1000 et qu'un bus SPI connecte l'ensemble au microcontrôleur comme l'illustre la **Figure 64**.

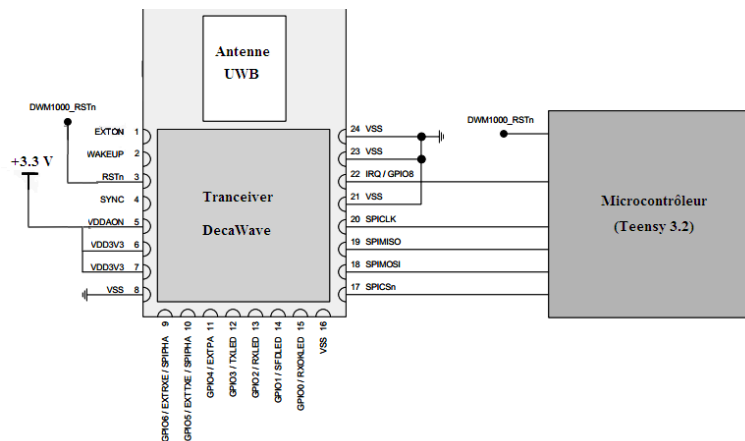


Figure 64 : Architecture physique de DecaDuino

3.1.3.2 Les principales fonctionnalités de DecaDuino

La librairie DecaDuino présente plusieurs fonctionnalités qui sont les suivantes :

- 1) **Data Service** (ou le service de données) : comme l'interface SAP de la couche physique, la librairie DecaDuino est responsable de la transmission et de la réception des trames. Les primitives principales de l'IEEE 802.15.4-2011 ont été implémentées afin de supporter l'émission et la réception des trames, la configuration du *transceiver*, etc. Le mode *doze* du *transceiver* est également disponible. Ce mode permet d'implémenter et de tester les protocoles MAC dans des scénarios réels qui permettent de tester la durée de vie des batteries des nœuds. La librairie dispose également de fonctionnalités basiques de *transceiver* comme le filtrage d'adresses et l'accusé de réception automatique.
- 2) **Ranging Service** (Service de *ranging*) : étant donné que l'objectif est de concevoir des protocoles de *ranging* basés sur la mesure ToF, DecaDuino propose les primitives principales permettant de réaliser cette tâche. Comme défini dans la norme IEEE 802.15.4-2011, les trames UWB disposent, dans la trame PHY-header, d'un bit dédié au *ranging* appelé bit RMARKER. Le bit RMARKER sert de point de référence pour le *timestamping* précis des trames émises et reçues. Pour réaliser avec une bonne précision ce *timestamping*, les *transceivers* DecaWave

disposent d'un compteur de haute précision de 40 bits cadencé à une fréquence de 64 GHz. Ce compteur a une précision de *timestamping* de l'ordre de 15,625 ps.

- 3) **Delayed Transmission** (ou l'émission retardée de la trame) : cette fonctionnalité permet à la couche MAC d'envoyer une trame à un moment précis, sur la base du compteur 64 GHz. Grâce à cette fonctionnalité, la couche MAC a la capacité de générer une PDU-MAC qui inclut l'instant d'émission de cette future trame ($T_{Tx,*}^1$) et de l'envoyer à l'instant souhaité. Avec cette fonctionnalité, le protocole TWR classique (a) peut être amélioré par 2M-TWR, comme illustré sur la Figure 65 en supprimant le message DATA_REPLY (b), car $T_{RA,B}^1$ et $T_{TB,*}^1$ peuvent être transportés par le message ACK. Cette caractéristique est très intéressante car elle va réduire le nombre de messages de 33% et améliorer la performance des protocoles qui en découleront. Une évaluation de performance du protocole 2M-TWR sera présentée dans la section 3.2.

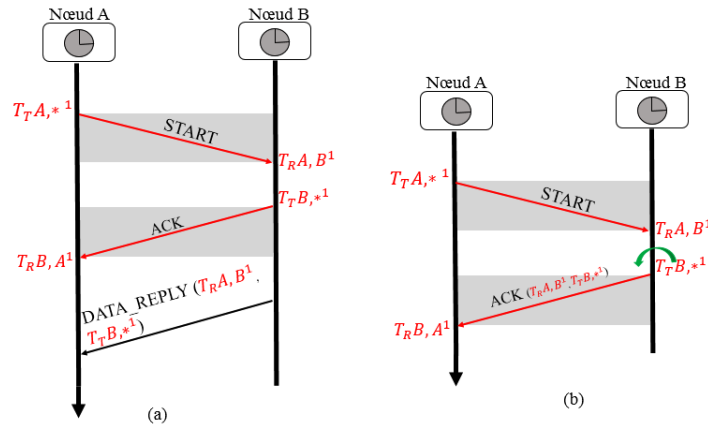


Figure 65 : Protocole TWR classique (a) et sa version améliorée 2M-TWR (b)

- 4) **Receiver Skew Evaluation** (ou évaluation de la différence des horloges entre les nœuds) : cette fonctionnalité permet à un récepteur d'évaluer la différence d'horloge entre sa propre horloge et celle de l'émetteur de la trame. Elle est connue sous le nom de *skew*. Cette fonctionnalité est propre aux *transceiver* DecaWave. Elle est basée sur une analyse de l'asservissement d'horloge (PLL : *Phase Locked Loop*) que le récepteur a réalisé pour décoder la trame. Avec cette fonctionnalité, n'importe quel nœud peut compenser les erreurs de distance liées aux dérives des horloges.

3.2 Analyse préliminaire des protocoles de ranging implémentés dans notre testbed

Dans cette section, nous allons évaluer, par prototypage réel, les performances de notre *testbed*. Nous allons présenter les implémentations que nous avons réalisées et les résultats obtenus. Cette démarche introductive a pour but de valider les implémentations de notre plateforme matérielle et logicielle. Pour cela, nous avons réalisé une étude comparative entre les protocoles de référence TWR et SDS-TWR.

3.2.1 Conditions d'expérimentations

La **Figure 66** et la **Figure 67** montrent les conditions de ces premières expériences. Dans cette expérience, nous considérons des nœuds en ligne de vue (LOS) avec une distance maximale de test de 6.14 mètres. Chaque nouvelle mesure de *ranging* s'effectue sur des supports en plastique avec un pas de 1 mètre. Les nœuds sont placés à une hauteur de 1,02 m du sol.

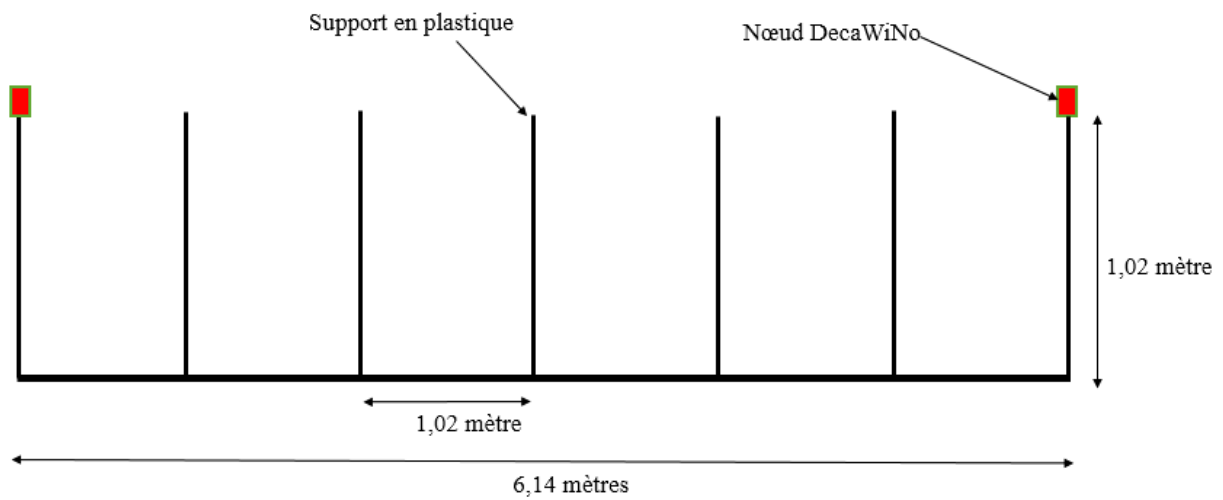


Figure 66 : Contexte de mesure

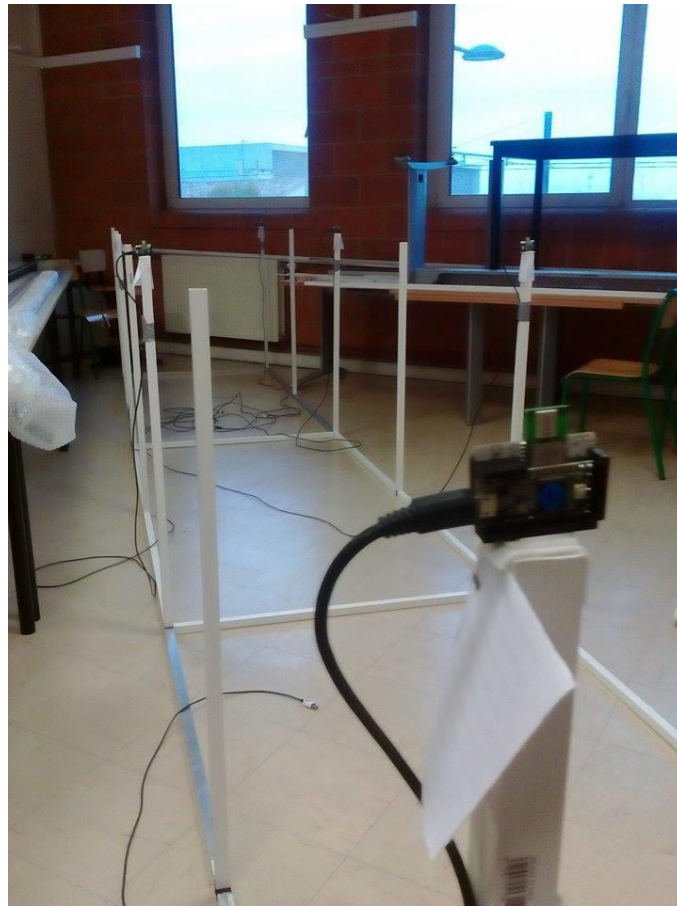


Figure 67 : Plateforme d'évaluation de la distance

Pour chacun des deux protocoles (TWR et SDS-TWR), les nœuds lancent une nouvelle campagne de *ranging* toutes les 200 ms et ceci pendant 30 secondes environ. Nous obtenons ainsi par distance et pour chaque protocole, 150 mesures.

3.2.2 Ranging par TWR

Le tableau 38 représente les données de *ranging* obtenues par l'usage du protocole TWR basés sur la mesure du temps de vol. Ces données sont représentées dans le tableau 38.

Tableau 38 : Tableau récapitulatif des erreurs du protocole TWR (en mètre)

Distance Réelle	Erreur	Ecart type	Erreur Min	Erreur Max
1,02	-0,10	0,01746732	-0,14	-0,03
2,06	-0,09	0,03083393	-0,18	-0,03
3,08	-0,10	0,02238264	-0,16	-0,05
4,12	-0,07	0,01577448	-0,11	-0,02
5,14	-0,09	0,02099438	-0,15	-0,04
6,14	-0,24	0,02105216	-0,28	-0,16

Définition : l'erreur de ranging est la différence entre la distance mesurée par le protocole de ranging et la distance réelle. Lorsque la distance est sous-estimée par le protocole, on a une erreur négative. Dans le cas contraire, l'erreur est positive. Par exemple, pour une distance réelle de 1 m, si le protocole évalue une distance mesurée de 0,95 m, l'erreur est de : -0,05 m. Elle est plus petite et meilleure qu'une erreur de -0,15 m si la distance mesurée avait été de 0,85 m.

Au regard de ce premier résultat, nous pouvons constater que la distance mesurée avec le protocole TWR semble tout à fait viable. Nous remarquons que la distance mesurée est très proche de la distance réelle et offre des performances de *ranging* raisonnables par rapport aux performances annoncées par le constructeur du *transceiver* [74]. Le faible écart type (~0.03 mètres) nous permet d'affirmer que la reproductibilité est satisfaisante.

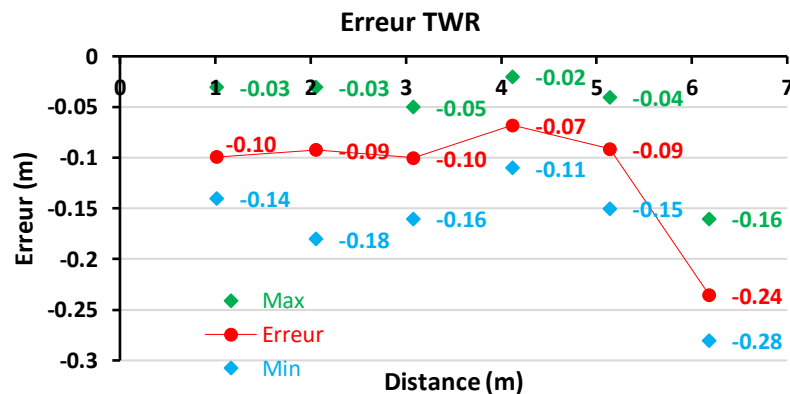


Figure 68 : Représentation de l'erreur TWR en fonction de la distance

Cette première étape nous permet d'affirmer que le protocole TWR a bien été implémenté dans notre environnement.

3.2.3 Ranging par SDS-TWR

Les informations de *ranging* obtenues par l'utilisation du protocole SDS-TWR sont disponibles dans le tableau 39 et ont été représentées par la **Figure 69**. Les conditions d'expérimentation sont identiques à celles exposées préalablement avec le protocole TWR.

Tableau 39 : Tableau récapitulatif des erreurs du protocole SDS-TWR (en mètre)

Distance Réelle	Erreur SDS-TWR	Ecart type	Min	Max
1,02	-0,02	0,01436149	-0,05	0,02
2,06	0,00	0,0189361	-0,04	0,04
3,08	0,03	0,01483921	-0,01	0,06
4,12	-0,03	0,01246144	-0,06	-0,01
5,14	-0,02	0,01570247	-0,05	0,02
6,14	-0,12	0,02365179	-0,19	-0,06

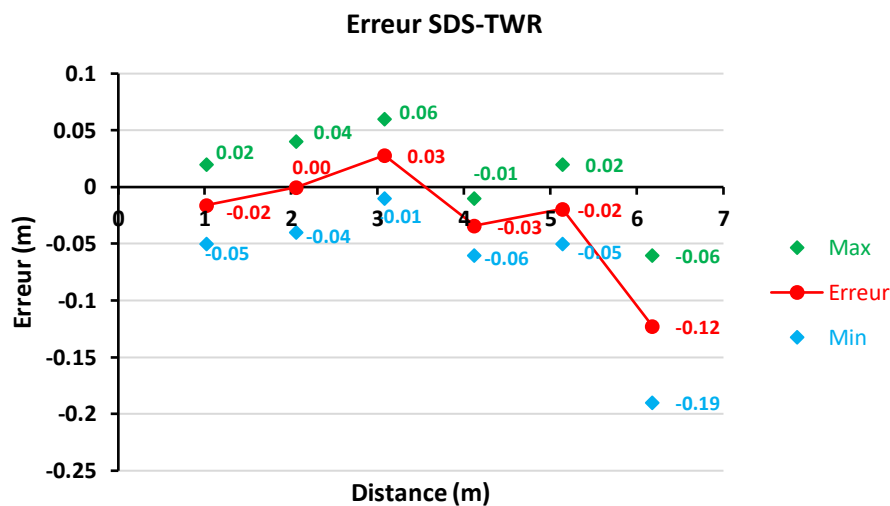


Figure 69 : Représentation de l'erreur SDS-TWR en fonction de la distance

Ici aussi, nous faisons le même constat, la distance mesurée par SDS-TWR est très proche de la distance réelle, ce qui témoigne là aussi, de la bonne implémentation du protocole SDS-TWR dans notre environnement.

3.2.3.1 Discussions et choix de la solution protocolaire

Nous constatons après analyse que les erreurs observées ne dépassent pas 16 cm pour le protocole TWR et pour les distances allant de 1 à 5.14 mètres. L'amélioration du protocole TWR est bien assurée par le protocole SDS-TWR. L'erreur absolue est alors limitée à 0.06 m pour les distances allant de 1 à 5.14 mètres alors que le constructeur du *transceiver* annonce des précisions de 10 cm dans des conditions idéales.

On remarque, dans les deux cas, pour la distance de 6.14 mètres, une surestimation de la distance par rapport aux autres distances. L'explication probable est que le nœud à 6.14 mètres, collé au mur en béton, est pénalisé par une réflexion du signal, ce qui provoque une augmentation du ToF par le nœud.

Le faible écart type observé dans les deux protocoles est la preuve que les mesures obtenues sont reproductibles. Cela signifie qu'il n'est pas nécessaire de réaliser une centaine de mesures par point pour obtenir une meilleure précision. Ceci constitue un premier résultat intéressant pour la suite de notre étude. Si la valeur de cet écart type était élevée, nous aurions dû réaliser plusieurs sessions de *ranging* pour arriver à un résultat stable, ce qui exigerait une augmentation importante de l'*overhead* du protocole de *ranging* encapsulé dans le trafic natif du réseau. Dans la suite de nos travaux, nous nous autoriserons donc à réduire le nombre de mesures.

De manière comparative, nous pouvons constater l'impact bénéfique de la symétrie du protocole SDS-TWR dans l'amélioration du protocole de base TWR. On constate des erreurs maximales de 0.06 mètres contre 0.16 mètres pour le protocole TWR, qui a systématiquement surestimé le temps de vol. On peut donc conclure en disant que l'objectif du protocole SDS-TWR qui est de diminuer l'erreur de *ranging* de TWR est satisfaisant. La Figure 70 nous montre l'impact de cette amélioration dans cette expérimentation.

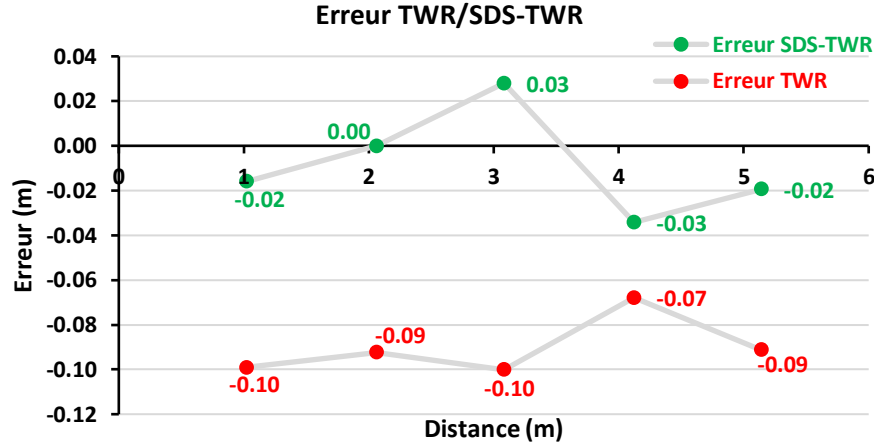


Figure 70 : Représentation de l'erreur SDS-TWR / TWR en fonction de la distance

Les protocoles de *ranging* que nous avons implémentés présentent des résultats satisfaisants. Cependant, ils ont le grand inconvénient de nécessiter des échanges de messages dédiés au *ranging*. Ces échanges doivent être surtout effectués sur une durée la plus courte possible et parfois à des moments bien définis comme l'exige la symétrie dans le cas de SDS-TWR comme annoncé dans la section 1.4.3.1. Cela contraint fortement le cadencement des messages. En effet, l'évaluation de la mesure du temps de vol est basée sur l'utilisation de deux horloges (une sur chaque nœud) qui sont supposées identiques.

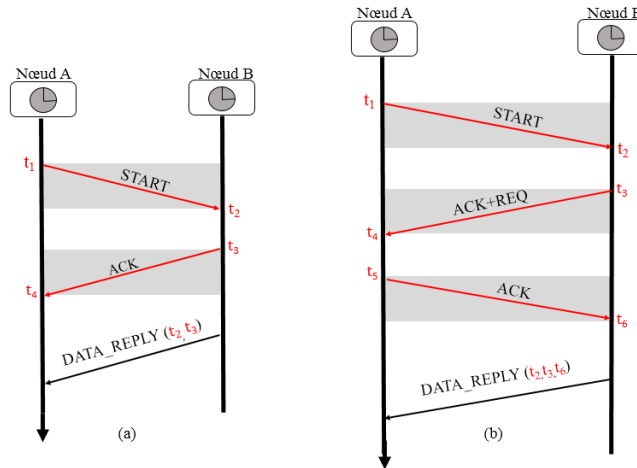


Figure 71 : Le protocole TWR (a) et le protocole SDS-TWR (b)

$$ToF_{TWR} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (35)$$

$$ToF_{SDS-TWR} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) + (t_6 - t_3) - (t_5 - t_4)}{4} \quad (36)$$

Dans l'équation (35) du protocole TWR (Figure 71a), les instants t_2 et t_3 du nœud A sont supposés être obtenus avec la même fréquence que les instants t_1 et t_4 du nœud B, alors que dans la réalité, les deux nœuds sont distincts. Aussi minime qu'elle soit, il existera toujours une différence sur les horloges.

Cette différence introduira un biais dans l'évaluation de la mesure du temps de vol, dont nous montrerons un modèle d'erreur dans la section suivante. Si la période d'échange entre les messages augmente, ce biais augmentera aussi et la mesure du temps de vol sera dégradée.

Le protocole SDS-TWR (Figure 71b), se propose justement de corriger l'erreur introduite par la différence des horloges en imposant une symétrie dans le protocole de *ranging*. Cette symétrie est cependant réalisée à partir d'un message supplémentaire, ce qui aura des conséquences sur le coût protocolaire (*overhead*). Le principe de la symétrie dans SDS-TWR suppose une parfaite maîtrise des instants d'émission et de réception des messages comme nous l'avons présenté dans la section 1.4.3.1. Or, il semble impossible de maintenir cette symétrie dans un contexte d'encapsulation du trafic de *ranging* dans le trafic natif du réseau. Les instants d'émission et de réception ne seront pas maîtrisés car ils seront fonction de la méthode d'accès au médium et aussi de l'empilement protocolaire défini. Une approche asymétrique comme TWR serait donc à privilégier.

3.2.3.2 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté et analysé les résultats préliminaires des protocoles TWR et SDS-TWR. A l'issu de cette analyse, il ressort que l'approche asymétrique du protocole TWR pouvait servir de base pour notre travail d'incorporation de trafic de *ranging* dans un trafic existant. Le protocole TWR est moins contraignant et ne nécessite que deux messages pour obtenir les instants t_1 , t_2 , t_3 et t_4 et d'un message pour le transport des instants t_2 et t_3 vers le nœud initiateur du *ranging* (dans la version 2M-TWR, ce 3^{ème} message n'est même pas nécessaire). Pour la suite de nos travaux, nous allons utiliser le protocole TWR et étudier son intégration dans le trafic natif du réseau.

3.2.4 Correction de l'imprécision à l'aide du Skew

Dans cette section, nous allons aborder le problème de synchronisation fréquemment rencontré dans les réseaux sans fil en général. Dans le cas des réseaux de capteurs sans fil, ce problème pourrait avoir un impact important dans des applications de positionnement. La précision dans le traitement des trames reçues repose essentiellement sur les horloges locales ayant des quartz qui fonctionnent à des fréquences nominales. Les quartz étant sensibles aux variations de température par exemple, la fréquence générée peut subir des dérives plus ou moins significatives pouvant corrompre la synchronisation quartz des nœuds.

Dans un contexte d'intégration de trafic de *ranging* dans un trafic natif, l'impact de la dérive des horloges pourra avoir une conséquence importante sur la précision du *ranging* dans la mesure où le temps inter-trame peut être long – en tout cas, non maîtrisé par le protocole de *ranging* car dépendant du protocole MAC. Dans ce qui suit, nous allons présenter l'impact de cette conséquence sur la précision du *ranging* et apporter les corrections.

3.2.4.1 Contexte d'étude

Comme nous l'avons souligné dans le chapitre 1 (section 1.1.), notre objectif vise à intégrer les informations de *ranging* dans le trafic natif du réseau. On peut très facilement imaginer les avantages que pourrait offrir un protocole de *ranging* complètement intégré dans les échanges de trames *beacons*. Ce protocole pourrait offrir l'opportunité d'effectuer des mesures de distance entre des nœuds à chaque échange d'informations entre les nœuds, sans trames dédiées au *ranging*. Nous voulons ici développer le concept de « *ranging* opportuniste ». Un service de *ranging*, inclus dans l'empilement protocolaire, est le moins coûteux en termes de charge protocolaire (*overhead*) et le plus transparent possible, tout en restant précis sur la mesure de distance.

Avant d'intégrer le trafic nécessaire de *ranging* dans le trafic natif du réseau, il est indispensable d'évaluer le réel impact de la dérive d'horloge sur la précision de la mesure de *ranging*. En pratique, le trafic du réseau sera enfoui dans des trames diffusées qui seront elles-mêmes soumises à des délais

intrinsèques aux protocoles. Si des trames diffusées sont transmises par exemple en respectant une méthode d'accès au médium (CSMA/CA par exemple), le *backoff* peut considérablement retarder la transmission des messages. Lorsque le trafic de *ranging* sera inclus dans une série de trame *beacons*, le délai entre les *beacons* peut être de plusieurs dizaines de millisecondes. L'impact réel de ce délai sur les performances de la mesure de *ranging* doit d'abord être évalué dans notre travail.

3.2.4.2 Evaluation de performance du protocole TWR en présence d'un délai introduit dans les échanges

Cette partie a pour but d'évaluer la précision du *ranging* en présence d'un délai dans les trames échangées. Pour cela, nous avons introduit artificiellement un délai entre les trames *START* et *ACK* du protocole TWR (Figure 72). En effet, lorsque les trames de *ranging* seront encapsulées dans le trafic habituel du réseau, d'inévitables retards seront introduits dans les échanges, particulièrement au niveau de la méthode d'accès au médium. Nous recherchons ainsi à évaluer les conséquences de ces retards sur la précision de *ranging*.

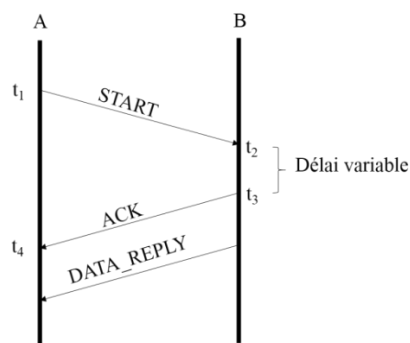


Figure 72 : Session protocolaire de ranging par TWR en présence d'un délai introduit entre la réception de la trame *START* et l'émission de la trame *ACK*

Afin de reproduire les conditions d'une communication réelle, nous avons introduit un délai entre les instants t_2 et t_3 du côté du nœud B. Plus le délai entre t_2 et t_3 est long, plus la session de *ranging* s'étale sur une longue période. La dérive d'horloge entre les deux nœuds A et B est alors fortement impactée et l'imprécision de la mesure de *ranging* augmente.

Nous avons réalisé une nouvelle expérimentation sur le même testbed présenté précédemment (Figure 67). Pour chaque point, un délai variable de 1, 5, 10, 30, 40, 70 et 100 ms était fixé. 30 mesures sont effectuées pour chaque valeur de délai, soit un total de 240 mesures de ranging par position. Pour chaque position, nous effectuons le calcul de l'erreur. Le cas des distances de 1.02 m, 3.08 m et 5.14 m ont été représentés à titre d'exemple dans la Figure 73, la Figure 74 et la Figure 75. Nous avons représenté l'erreur en fonction de la distance. Sur ce graphique, nous avons représenté en rouge (Erreur) l'erreur introduite pour chaque valeur de délai.

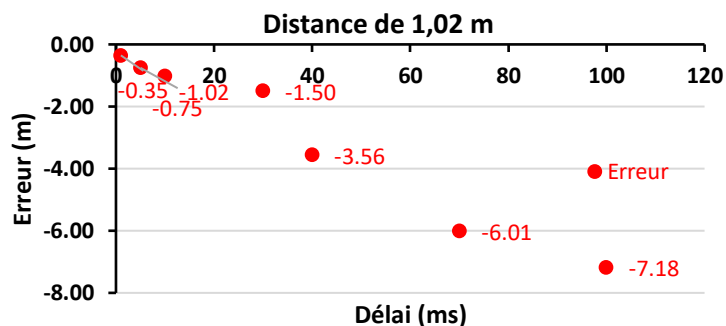


Figure 73 : Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 1.02m (TWR)

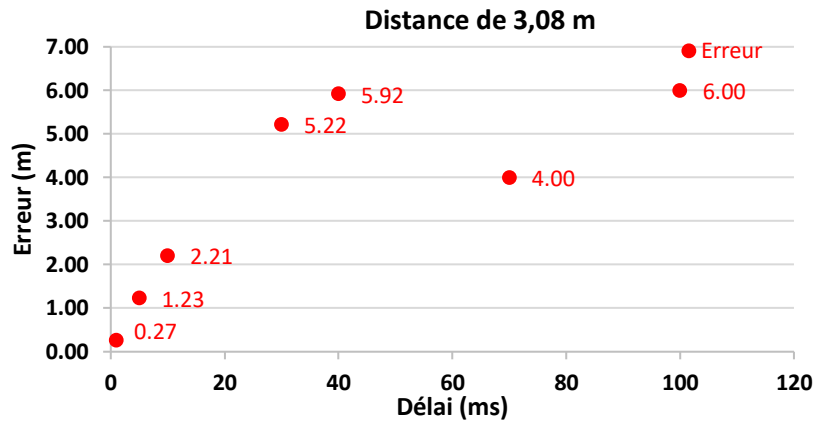


Figure 74 : Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 3.08m (TWR)

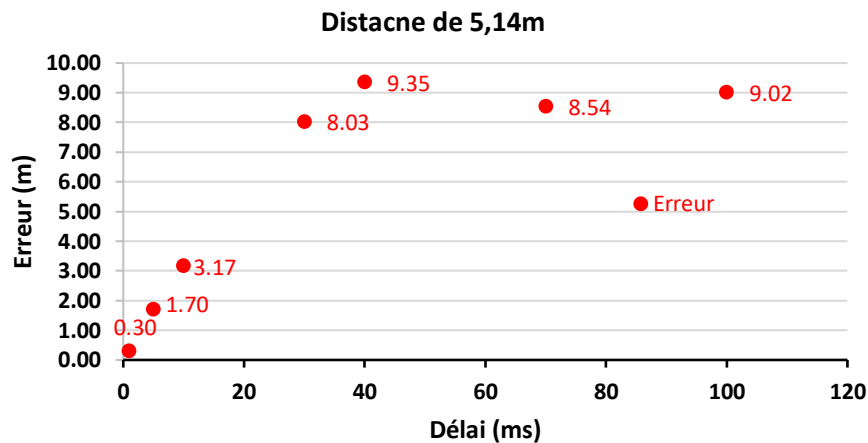


Figure 75 : Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 5.14m (TWR)

Ces trois figures (Figure 73, Figure 74, Figure 75) montrent l'impact de ce délai variable sur la performance du *ranging*. Les performances se dégradent avec l'augmentation du délai. L'explication que nous pouvons donner pour ce phénomène, est que la fréquence de résonance d'un quartz est généralement influencée par la température du composant auquel il est soumis, surtout sur des longues durées. Nous avons, lors de nos expérimentations, porté une attention singulière à cette grandeur physique mesurée grâce à un thermomètre laser (Figure 76). Lorsque la radio du nœud A reste ouverte dans l'attente de la trame ACK (la réception étant l'état du *transceiver* qui consomme le plus de courant [78]), le *transceiver* du nœud A va augmenter sa température et dériver plus que le nœud B. Cette augmentation de la température va apporter un biais important à la précision du *ranging*.

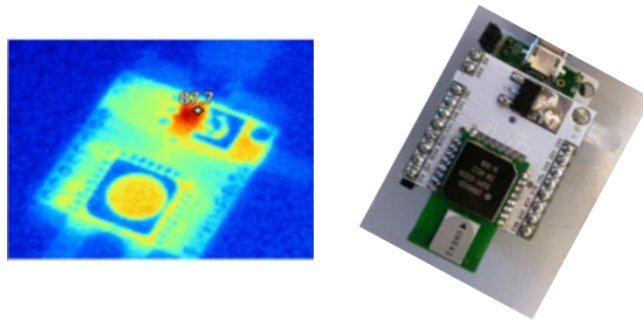


Figure 76 : Nœud DecaWino et son image dans l'infrarouge

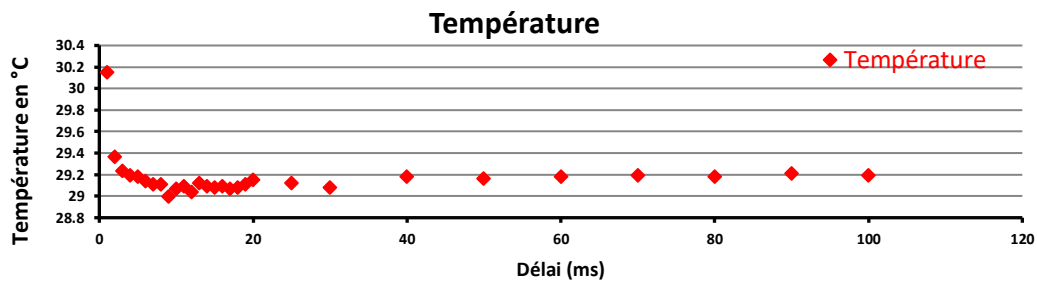


Figure 77 : Augmentation de la température en fonction du délai

On pourrait penser que ce phénomène pourrait ne pas se produire si des dispositions étaient prises pour passer peu de temps en réception. Effectivement, il est parfaitement possible de réduire le temps en réception, mais cela ne corrigera pas pour autant le problème de la dérive. Si la radio du nœud est fermée et que l'on introduit un délai variable important entre les instant t_2 et t_3 (côté nœud B), ce long délai sera alors la cause de cette dérive. Avec des valeurs importantes de délai, l'horloge du nœud B va dériver plus par rapport au nœud A et cela aura un impact sur la mesure du ranging. Ceci aggrave également la différence des horloges. Nous avons également voulu prendre un cas général où le nœud pouvait être amené à passer du temps en réception, malgré les conséquences que cela induirait sur les performances du *ranging*. Nous allons intégrer cette contrainte et apporter une solution.

Cette phase importante de notre travail montre que la problématique est bien réelle. Les performances de la mesure de ranging se détériorent avec l'augmentation de la valeur du délai dans le protocole TWR. Dans la section suivante, nous allons porter une attention particulière sur cette problématique afin de proposer une correction.

3.2.4.3 Méthode de correction de la dérive des horloges

Nous avons vu que lorsque les nœuds A et B sont impliqués dans une session de ranging, en présence d'un délai croissant dans les échanges, la précision de ranging se dégrade fortement avec ce délai qui augmente. Pour corriger ces imprécisions, on peut se baser sur la taille des trames transmises [79], sur le concept de l'acquiescement multiple [24] ou encore sur l'estimation de la différence d'horloge entre le nœud émetteur et le nœud récepteur de la trame. Cette dernière solution devrait permettre au nœud récepteur de corriger le cadencement de son horloge à partir d'une référence qui est le nœud émetteur de la trame. La solution que nous proposons est basée sur cette dernière idée, elle utilise les informations fournies par les *transceivers* DecaWave pour corriger l'imprécision introduite lors de l'augmentation du délai dans les échanges du protocole TWR. Nous proposons une méthode dynamique de correction fondée sur l'évaluation de la dérive des horloges des nœuds du réseau. Cette méthode se base sur certaines propriétés des protocoles exploitant la mesure du ToF et utilisant les propriétés de la couche physique UWB comme spécifié par la norme IEEE 802.15.4 [80] et amélioré par le constructeur DecaWave [78], et plus spécifiquement le bit RMARKER défini dans la section 2.4.1.

3.2.4.4 Principe de la correction

Nous considérons toujours deux nœuds impliqués dans un échange TWR avec un nœud A initiateur de l'échange, et un nœud B destinataire du nœud A. Le calcul du temps de vol est réalisé par le nœud A grâce à l'équation (37).

$$ToF = \frac{t_4 - t_1 - (t_3 - t_2)}{2} \quad (37)$$

En réalité, les durées $(t_4 - t_1)$ et $(t_3 - t_2)$ sont des périodes obtenues par des horloges différentes. Ces durées sont obtenues par les composants cadencées à des fréquences f_A (pour le nœud A) et f_B (pour le nœud B). La durée $(t_4 - t_1)$ est mesurée par le nœud A (à sa fréquence f_A) alors que la durée $(t_3 - t_2)$ est la durée mesurée par le nœud B (à sa fréquence f_B). Si nous supposons que les fréquences f_A et f_B sont égales, alors l'estimation de la mesure du temps de vol est correcte (si de plus, le lien radio est symétrique). Dans la réalité, les horloges des nœuds ne seront pas cadencées à la même fréquence. Cherchons donc à évaluer les durées $(t_4 - t_1)$ et $(t_3 - t_2)$ avec l'hypothèse que f_A et f_B ne sont pas constamment les mêmes.

Représentons k comme étant le coefficient différenciant les deux horloges

$$k = \frac{f_B}{f_A} \text{ avec } k \cong 1 \quad (38)$$

La nouvelle formule du temps de vol s'écrira de la manière suivante :

$$tof' = \frac{t_4 - t_1 - k * (t_3 - t_2)}{2} \quad (39)$$

Cette démarche permettra au nœud B de corriger l'erreur induite par la dérive relative entre les deux horloges, particulièrement lorsque le délai entre les instants t_2 et t_3 est important. Elle exige aussi que les nœuds aient la même configuration matérielle, étant donné la correction basée sur l'estimation du cadencement des quartz présents sur les nœuds.

Le DW1000 utilisé pour notre expérimentation offre une fonctionnalité appelée *ClockOffset*. Cette fonctionnalité permet, par une analyse de l'asservissement d'horloge (PLL) effectuée par le nœud récepteur pour démoduler la trame, d'estimer la différence de fréquence entre l'horloge du nœud émetteur et son horloge de réception. Cette différence est connue sous le nom de « skew », elle est exprimée en partie par millions (ppm, 10^{-6}). L'accès à cette information précieuse, issue de la couche physique, a été implémenté dans la librairie *Decadino* présentée dans la section 3.1.3.

Le temps d'émission ($D_{\text{émission}}$) d'une trame de 127 octets est estimé à 287 μs [79] (pages 29). Pour obtenir la durée totale (D_{totale}), nous avons écrit un code qui bloque le temps (en microseconde) depuis l'initialisation du programme et après l'émission d'une trame. La différence entre ces deux instants est estimée à 491 μs . Le temps de traitement au niveau du bus SPI est de 191 μs (**Figure 78**). Le microcontrôleur a besoin de 15.625 ps [75] pour calculer le *Skew*. Ces valeurs montrent bien pour le microcontrôleur le temps nécessaire pour effectuer le calcul du *Skew*.

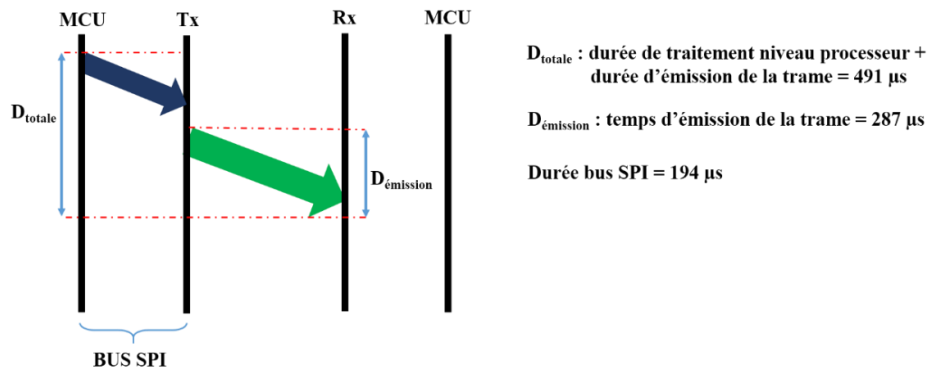


Figure 78 : Durée de traitement sur le bus SPI

Pour obtenir la valeur du coefficient k , nous faisons la moyenne de 10 valeurs de « *Skew* », propre à un voisin, mesurées par chaque couple de nœuds à la réception d'une trame. Le *ClockOffset* permet de fournir ces valeurs de *Skew*.

La mesure du temps de vol pourra ainsi être améliorée en intégrant cette différence dans l'équation (40) :

$$ToF' = \frac{t_4 - t_1 - (1 + ClockOffset * 10^{-6})(t_3 - t_2)}{2} \quad (40)$$

A la réception de la trame DATA_REPLY (contenant les t_2 , t_3 et le *ClockOffset*), le nœud A applique la correction obtenue, à partir de l'évaluation de la différence de la fréquence réalisée par le nœud B par rapport à la sienne (f_A), dans le calcul du ToF et ainsi de la distance. A partir de cette proposition, nous pouvons ainsi corriger les erreurs liées à la variation de la température ainsi que celles introduite par les délais entre les trames.

3.2.4.4.1 Evaluation des performances

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux que nous avons obtenus en appliquant le *Skew* dans la formule du ToF avec le protocole TWR retardé artificiellement. Cette nouvelle expérimentation a été faite dans les mêmes conditions que l'expérience réalisée en 3.2.5.2. Les Figure 79, Figure 80 et Figure 81 montrent pour les distances de 1.02 m, 3.08 m et 5.14 m, en rouge l'erreur absolue avant correction, et en vert la correction en fonction du délai introduit les échanges TWR. Elles résument l'ensemble des résultats obtenus.

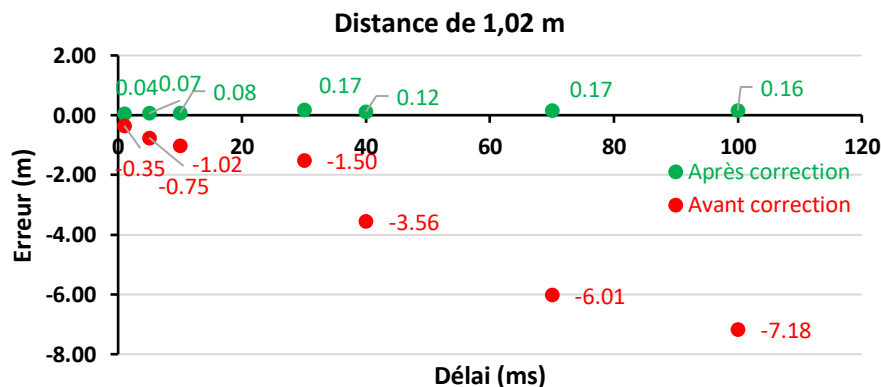


Figure 79 : Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur une distance 1,02m

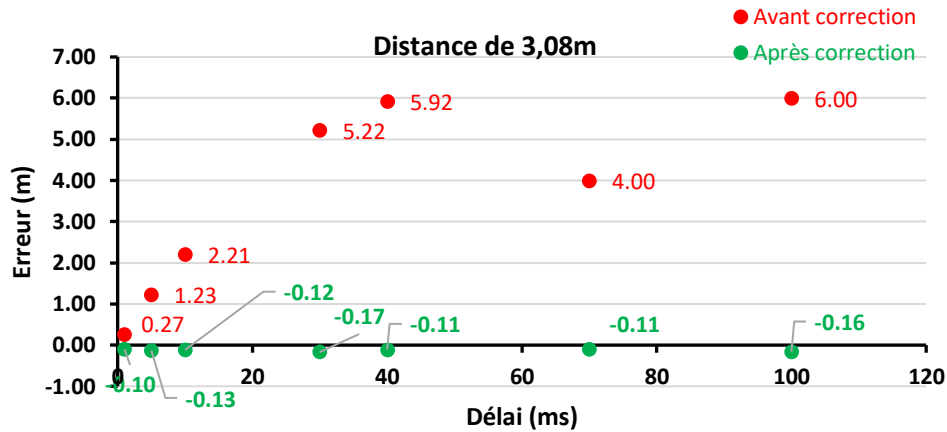


Figure 80 : Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur une distance 3,08m

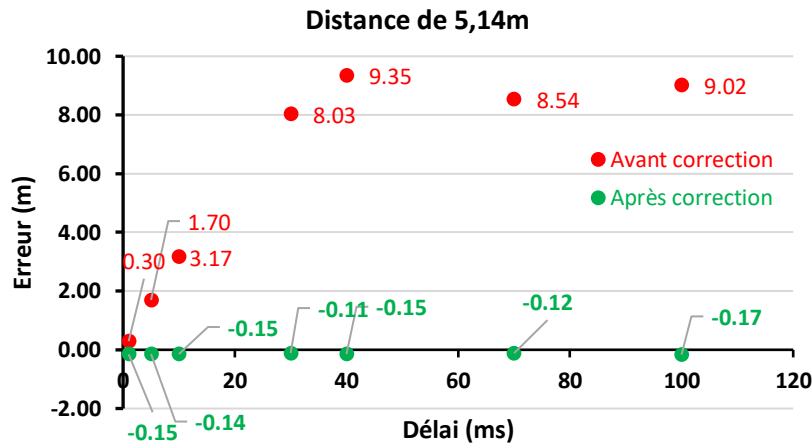


Figure 81 : Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur une distance 5,14m

Ces résultats montrent que l'imprécision liée à la dérive des horloges a diminué significativement grâce à la correction, et ce pour toutes les valeurs de délai expérimentées (jusqu'à 100 ms). La correction obtenue nous ramène aux mêmes performances qu'avec les protocoles TWR et SDS-TWR non retardés. Grâce à notre méthode de correction, nous pouvons donc obtenir les mêmes précisions de *ranging* tout en relâchant la contrainte temporelle. Ceci nous permettra d'inclure le trafic de ranging dans les trames de données, en répondant uniquement aux contraintes imposées par les protocoles usuels.

La technique de correction mise en œuvre est basée sur le *ClockOffset* qui est une fonctionnalité propre aux *transceivers* DW1000 de DecaWave. Elle dépend donc fortement du matériel, c'est-à-dire que cette méthode ne sera pas fonctionnelle sur un module ne disposant pas de cette fonctionnalité. Cependant, il reste toujours possible d'appliquer d'autres méthodes de correction, basée sur ce même transceiver, en faisant fi de la fonctionnalité *ClockOffset*. Les auteurs dans [81] proposent une approche basée sur la régression linéaire qui permet d'estimer la différence d'horloge des nœuds, et ce pour tout type de matériel. Cette approche est basée sur la méthode des moindres carrés [82] fournie dans leur expérimentation, par la bibliothèque scientifique SciPy [83] pour Python. A partir des échanges de messages TWR, le nœud A recevra, à la réception de la trame *DATA_REPLY*, les instants t_2 et t_3 représentant les instants de réceptions de la trame *START* et *ACK* (côté nœud B) (Figure 82). Cette

information serait utile au nœud A pour estimer le *Skew* du nœud B par rapport à son horloge. La Figure 82 illustre cette approche.

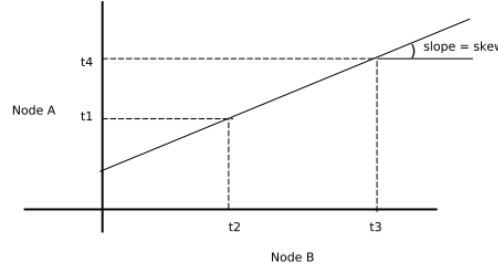


Figure 82 : Estimation du Skew [81]

Dans cette figure, l'inclinaison (*slope*) de la ligne représente le *Skew* entre les nœuds A et B. Cette première session TWR permettra au nœud A d'obtenir une première estimation approximative du *Skew* entre lui et le nœud B, sur la base de la ligne passant par les points (t_2, t_1) et (t_3, t_4) . Les échanges de messages successifs permettront au nœud A, d'obtenir une valeur plus précise du *Skew* grâce à la régression linéaire qui ne considérera pas seulement les points actuels (t_2, t_1) et (t_3, t_4) , mais aussi ceux précédemment calculés. Par le calcul successif du *slope* de la régression linéaire, l'estimation du ToF pourra être améliorée comme représentée dans l'équation (41).

$$tof'' = \frac{(t_4 - t_1 - slope * (t_3 - t_2))}{2} \quad (41)$$

Cette technique dynamique de correction, indépendante du matériel, présente l'inconvénient d'utiliser plusieurs trames pour l'évaluation du *Skew*. Dans un contexte d'intégration d'information de *ranging* dans le trafic, cette contrainte ne respecterait pas l'aspect « opportuniste » de l'évaluation de la distance. Pour obtenir un ranging performant, cette méthode imposera une contrainte d'*overhead* au trafic existant.

3.2.4.5 Conclusion

Dans cette section, nous avons abordé l'une des problématiques fondamentales rencontrées dans les réseaux de collecte de l'Internet des Objets (IoT) et les réseaux de capteurs sans fil (WSN), à savoir l'imprécision liée à la dérive des horloges. La précision des horloges dans les échanges est déterminante pour les services de localisation et d'intégration d'information de *ranging* dans le trafic natif du réseau. Pour parvenir à notre objectif, nous avons introduit une technique de correction dynamique de l'erreur de ranging basée sur la dérive des horloges, puis évalué cette correction dans des conditions réelles. Les résultats obtenus après correction sont satisfaisants. Les trames de *ranging* sont échangées sans aucune contrainte temporelle. Le protocole de ranging pourra être intégré dans les messages usuels du réseau.

Dans ce qui suit, nous allons présenter une amélioration du protocole TWR afin de permettre la localisation continue, de plusieurs voisins à portée, à un saut et dans une topologie multi-saut.

3.2.5 Ranging par l'usage de fonctionnalité *Delayed Transmission*

Dans cette section, nous allons effectuer le ranging TWR en utilisant la fonctionnalité *Delayed Transmission* comme décrit précédemment dans la section 2.4.1. Tout comme le *ClockOffset*, la fonctionnalité de *Delayed Transmission* est une spécificité du composant DW1000 de DecaWave. Elle permet au transceiver de transmettre sa trame à un instant très précis. Le protocole mis en œuvre ici est

le protocole 2M-TWR (présenté en 2.4.2.) incluant les techniques de corrections présentées dans la section précédente.

La Figure 83 illustre cette émission retardée. Dans la troisième ligne de cet extrait du code de notre implémentation, l'instant d'émission de la trame (`tl_predicted` dans ce code) est programmé grâce à la fonction `decaduino.alignDelayedTransmission`. Le retard (DELAYED_TRANSMISSION) est de 500 μ s.

```
case TWR_ENGINE_STATE_SEND_START:
    txData[0] = TWR_MSG_TYPE_START;
    tl_predicted = decaduino.alignDelayedTransmission(TRANSMISSION_DELAY);
    decaduino.pdDataRequest(txData, 1, true, tl_predicted);
    state = TWR_ENGINE_STATE_WAIT_SEND_START;
    break;
```

Figure 83 : Emission retardée lors de l'envoi de la trame

Dans cette expérience, le protocole 2M-TWR est exécuté en présence de correction et dans le même environnement dans les mêmes conditions que le protocole TWR dans sa version sans correction (section 2.3.3.1.). La transmission du message ACK (nœud B) est retardée de 500 μ s. Le calcul du ToF et de la distance sont effectués, par le nœud A, à la réception de la trame ACK.

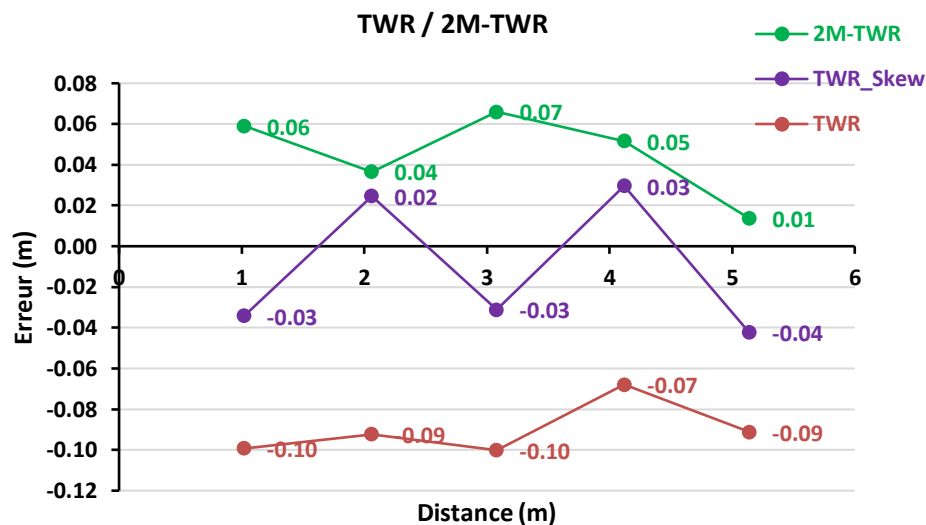


Figure 84 : Représentation des protocoles TWR et 2M-TWR en fonction de la distance

La Figure 84 montre la précision des protocoles 2M-TWR en vert avec un délai de 500 μ s, le TWR avec correction par le skew sous condition d'un délai de 5 ms introduit dans les échanges (TWR_Skew) en violet, et le protocole TWR de base sans délai entre dans les échanges et sans correction représenté en rouge. Tous ces résultats ont été représentés en fonction de la distance.

On remarque sur cette figure que le TWR de base est en dessous de zéro, le TWR avec skew (TWR_Skew) est au tour de zéro, le 2M-TWR est totalement au-dessus de zéro. Dans le premier cas, le TWR n'inclut pas de correction, l'absence de correction introduit un biais qui fait que le résultat est sous-estimé parce que le calcul du ToF est très petit. L'explication c'est que dans la formule du temps de vol (équation 8) il y'a un des deux termes qui est très élevé. ($t_4 - t_1$) est trop petit par rapport à ($t_3 - t_2$) en absence de Skew et surtout à cause du problème d'asymétrie dans le protocole TWR. Avec la

correction (TWR_Skew), on réduit ce biais, l'erreur est dans ce cas au tour de zéro. Avec le 2M-TWR qui introduit le skew dans les échanges comme le TWR_Skew, il y'a une différence de quelques centimètres. Le 2M-TWR propose une amélioration au niveau de l'*overhead*. Cette amélioration est rendue possible grâce à la fonctionnalité de l'émission retardée. Avec cette fonctionnalité, le message est envoyé plus tard, on perd donc du temps et on augmente la dérive. Ce qui confirme les résultats obtenus dans la section 3.2.4.3.2 où nous mettons en exergue l'impact de l'augmentation du délai dans les échanges.

$$ToF_{TWR} = \frac{t_4 - t_1 - (t_3 - t_2)}{2} \quad (42)$$

Nous pouvons alors analyser la précision du protocole 2M-TWR (qui inclut le Skew) par rapport au protocole TWR de base. L'erreur absolue de 2M-TWR est limitée à 7 cm. Cette constatation montre la bonne implémentation du protocole 2M-TWR dans notre testbed mais surtout la robustesse offerte par le *Skew* qui permet au protocole 2M-TWR, contraint temporellement à cause de l'émission retardée, d'avoir les mêmes performances que le protocole TWR corrigé, en condition d'un délai dans les échanges.

Ces résultats nous permettront de généraliser le protocole 2M-TWR à n nœuds. Cette étape permettra à plusieurs nœuds voisins, à portée, à un saut, et dans une topologie multi-saut, d'effectuer le ranging de manière séquentielle et de disposer d'un outil de localisation inclus dans le trafic natif du réseau, économe en énergie et très précis sur la mesure de la distance.

Dans la suite de notre travail, nous allons implémenter le protocole BB-TWR présenté dans la section 2.4.3.1, et analyser ses performances.

3.3 Implémentation et analyse de performance de BB-TWR

Dans le chapitre 2 (section 2.4.3.1.), nous avons proposé le protocole BB-TWR. Nous avons étudié ce protocole, qui est une extension à n nœuds du protocole 2M-TWR, dans un contexte de ranging à un saut et dans une topologie multi-saut, et surtout utilisant le trafic natif. Sur les bases de cette proposition, nous allons nous intéresser à son implémentation et évaluer ses performances.

3.3.1 Présentations de l'environnement de travail

Dans l'objectif de vérifier nos hypothèses, nous avons tout d'abord implémenté le protocole BB-TWR sur 5 nœuds comme présenté dans la Figure 85.

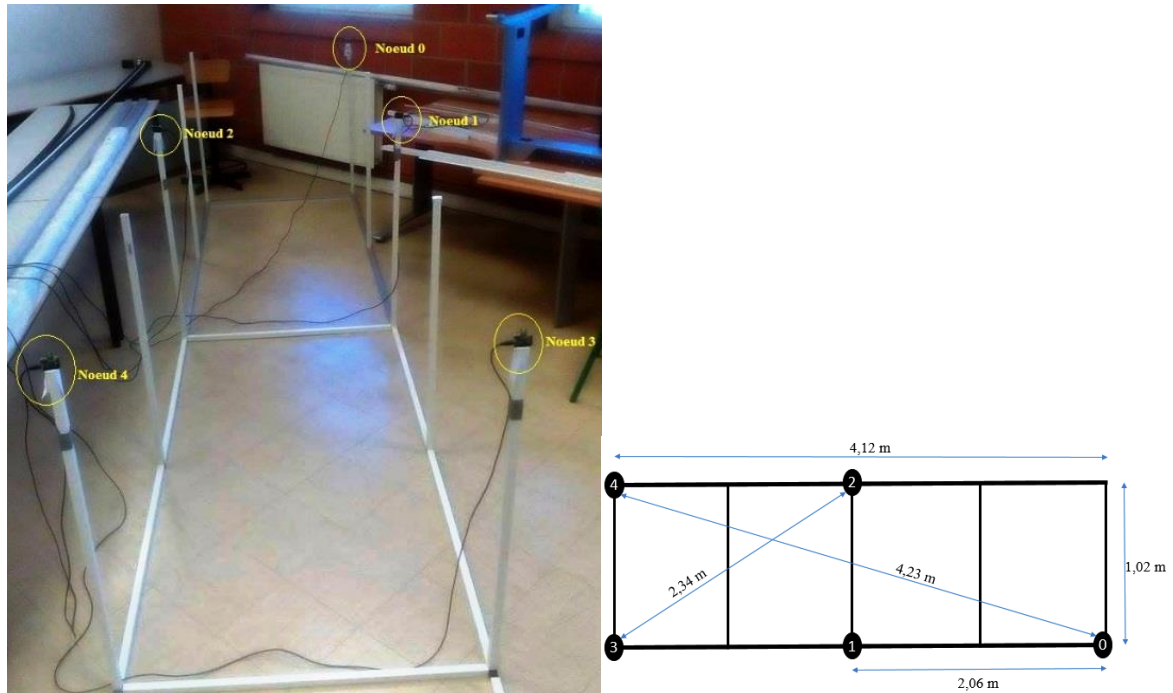


Figure 85 : Condition d'expérimentation

L'implémentation initiale du protocole BB-TWR dans notre environnement a été réalisée dans deux versions, à savoir : la version séquencée où tous les nœuds émettent à un instant dédié dans un TDMA sans collision, et la version non ordonnancée appelée *Non Schedule Direct Access*, avec un accès aléatoire où les trames peuvent entrer en collision.

3.3.2 BB-TWR en mode séquencé

Ce mode est le cas le plus simple. Bien que BB-TWR n'ait pas été conçu pour fonctionner obligatoirement en mode séquencé, cette première version simplifiée nous permettra d'évaluer la robustesse de notre protocole et de le tester dans un cas idéal servant de référence et de comparaison au cas général, plus réaliste. La Figure 86 représente l'automate du protocole BB-TWR présenté dans la section 2.4.3.1.

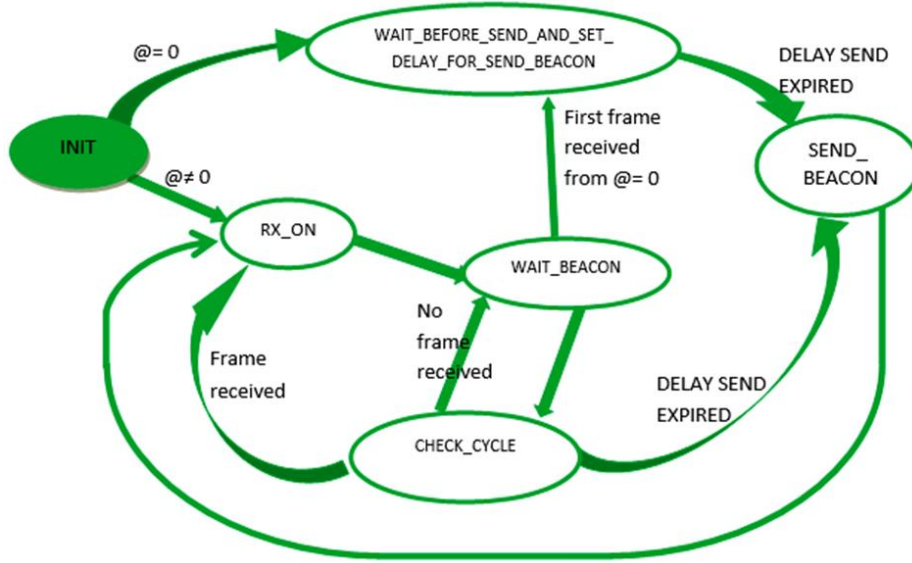


Figure 86 : Automate du protocole du protocole BB-TWR dans sa version séquencée

Dans cette version, comme son nom l'indique, les trames sont émises de façon séquentielle. Cet ordonnancement statique est réalisé selon un TDMA basé sur l'adresse des nœuds (Figure 87). Le message émis par le nœud d'adresse 0 synchronise tous les autres nœuds du réseau. L'état WAIT_BEFORE_SEND_AND_SET_DELAY_FOR_SEND_BEACON permet à chaque nœud de fixer et de connaître l'instant de sa prochaine émission. Chaque nœud dispose d'une période dont la durée est notée D_{SLOT} , décalée dans le temps, pour diffuser sa trame. Nous supposons également que dans cette première version simplifiée, tous les nœuds sont à portée radio, donc à un saut.

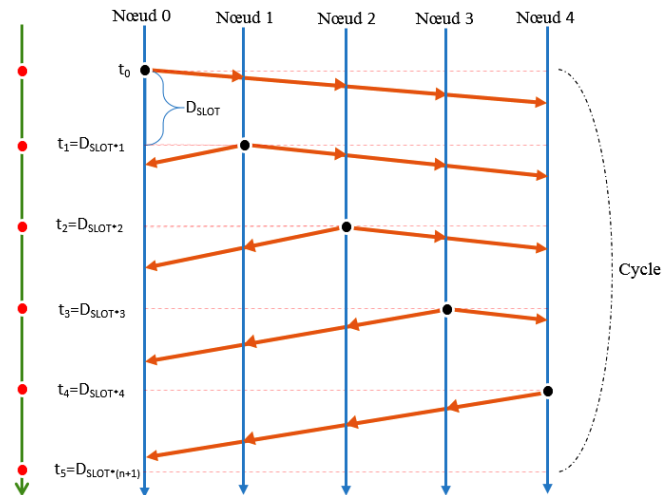


Figure 87 : Diagramme de séquence avec 5 nœuds

Ce principe nous permet d'éviter les collisions et nous permet de maîtriser la durée d'un cycle, paramètre capital pour l'évaluation des performances : le cycle comme l'illustre la Figure 87, est la période durant laquelle tous les nœuds du réseau ont un accès au médium après avoir reçu une première trame. Chaque nœud a la connaissance de la durée d'un cycle (équation (43)). Ainsi l'instant d'émission de la prochaine trame est connu par chaque nœud (équation (44)).

$$Cycle = n * D_{SLOT} \quad (43)$$

n étant le nombre total de nœud dans le réseau et D_{SLOT} la durée du slot, donc ici la durée inter-émission.

$$\text{Prochaine émission} = (n + N@) * D_{\text{SLOT}} \quad (44)$$

$N@$: adresse du nœud.

Pendant une période égale à D_{SLOT} (3, 5, 8, 10, 70 ou 100 ms en fonction des tests), le nœud d'adresse 0 (premier nœud à émettre) va diffuser sa trame à t_0 . Pour une durée de slot de 70 ms, le nœud 4 émettra à l'instant $t_4=280$ ms ($70*4$). Chaque nœud émettra de façon séquentielle sa trame et estimera la distance qui le sépare des autres nœuds.

3.3.2.1 Analyse et interprétation des résultats

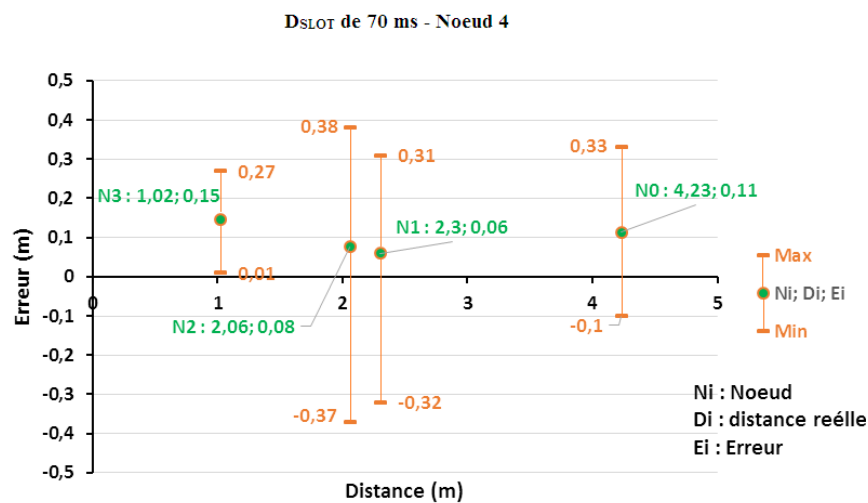


Figure 88 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 4 avec une durée de slot de 70 ms

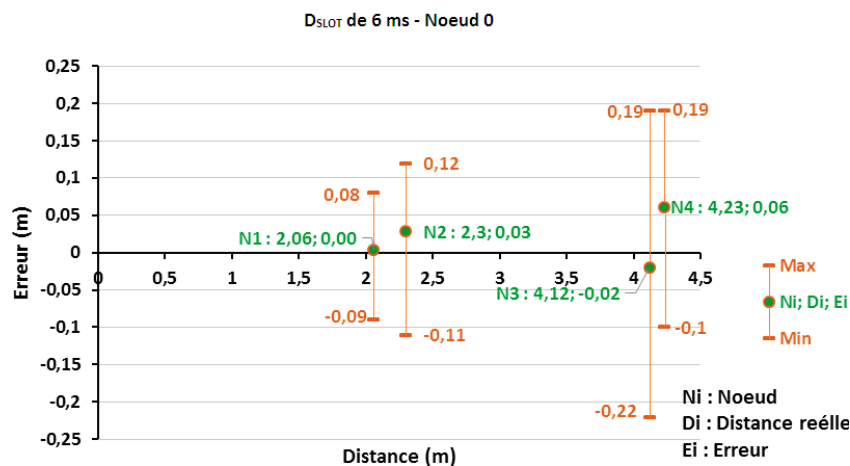


Figure 89 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 0 avec une durée de slot de 6 ms

La **Figure 88** et la **Figure 89** représentent un extrait des résultats de cette étude. On y représente l'erreur de *ranging* en fonction de la distance respectivement pour les nœuds 4 et 0, pour des D_{SLOT} respectifs de 70 et 6 ms. Sur ces figures, nous avons, pour chaque point, l'erreur minimale et maximale

représentée en orange, et en vert, l'erreur moyenne pour une centaine de mesures par point. Les *rangings* sont pratiqués avec les 4 autres nœuds. L'erreur moyenne est représentée par des coordonnées $\{N_i : D_i; E_i\}$ où N_i est l'adresse du nœud avec lequel le ranging est effectué, D_i est la distance le séparant du nœud étudié et E_i l'erreur moyenne de la distance. Dans l'exemple de la Figure 90, le nœud étudié est le nœud 0. Ce nœud est à 2.06 m du nœud 1 (**N1 : 2.06; 0.00**) et l'erreur moyenne de ranging est 0.00 m.

3.3.2.2 Les limites de la correction par le *Skew* pour les délais de 1 et 2 ms

Les résultats obtenus dans cette expérience nous montrent que, pour ces cas particuliers, les erreurs moyennes sont faibles, ce qui entraîne une distance évaluée très proche de la distance réelle. Les résultats sont acceptables dans un contexte de localisation et d'intégration d'information de ranging dans le trafic natif.

Cependant, les limites de la compensation par le *Skew* apparaissent pour la durée de slot de 1 ms. C'est le cas du nœud 0 dans la Figure 90.

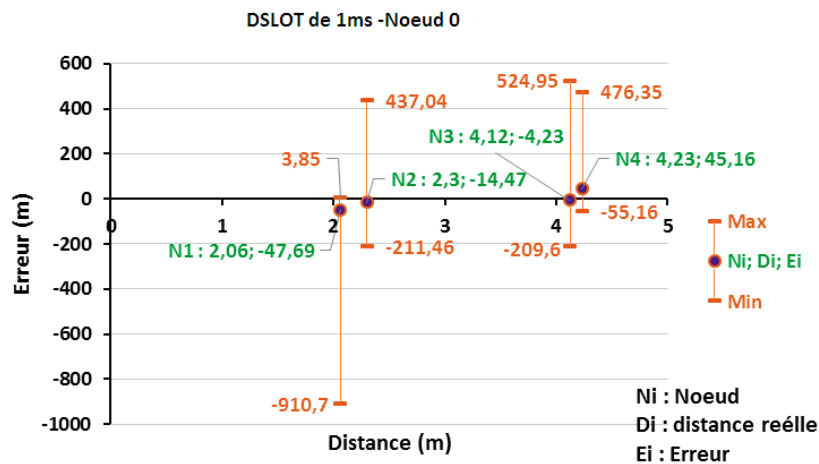


Figure 90 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 0 avec une durée de slot de 1 ms

On constate une mauvaise performance de *ranging* pour des D_{SLOT} de 1 ms et moins systématiquement pour des D_{SLOT} de 2 ms. C'est le cas de la Figure 90 où nous obtenons des erreurs minimum et maximum pouvant dépasser respectivement les -900 m et +500 m.

Cela s'explique par le temps de traitement au niveau du processeur qui est estimé à 194 μs (figure 24). A cela s'ajoute d'autres périodes comme le retard lié à la fonctionnalité *Delayed Transmission* pour l'émission estimé à 500 μs . Lorsque ces périodes sont supérieures à la durée du slot, la trame est estampillée et diffusée avec des valeurs aberrantes d'estampilles et ces valeurs seront ajoutées à d'autres couples de *timestamps*. La Figure 91 représentant le chronogramme des échanges, illustre ce phénomène.

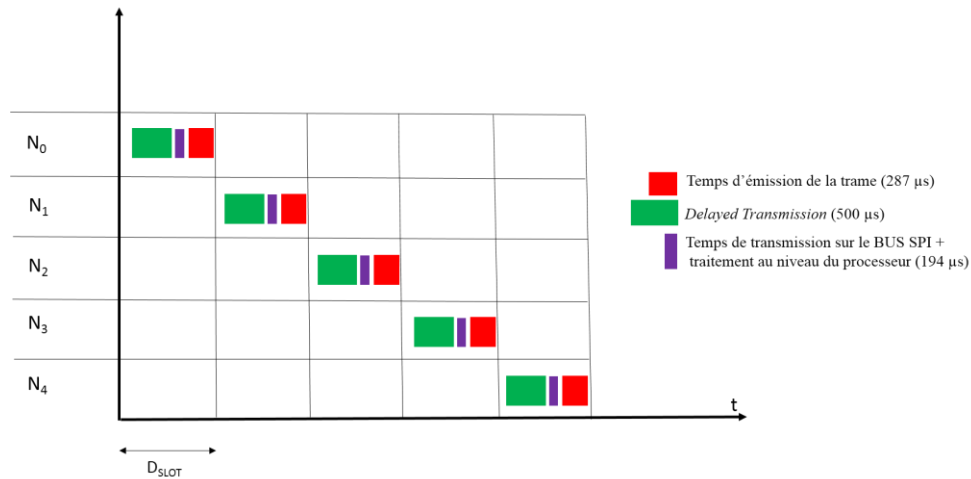


Figure 91 : Chronogramme des échanges

Le résultat dans ces cas est incohérent. C'est le cas du nœud 0 avec une durée de 1 ms dans la Figure 90. Les durées slots de 1 et 2 ms ne seront pas utilisées dans la version non séquentiée de BB-TWR.

3.3.3 BB-TWR en mode général Non Schedule Direct Access

Dans cette section, nous allons présenter la version générale non ordonnancée du protocole BB-TWR, version la plus réaliste pour être intégrée dans le trafic natif du réseau, où le protocole de *ranging* ne maîtrise pas les temps d'accès au médium. La Figure 92 représente l'automate de cette version. Chaque nœud retourne à chaque fois dans l'état INIT pour tirer de manière aléatoire un temps en milliseconde après lequel il émettra sa trame. Il n'y a plus de TDMA, ni de synchronisation sur le nœud d'adresse 0.

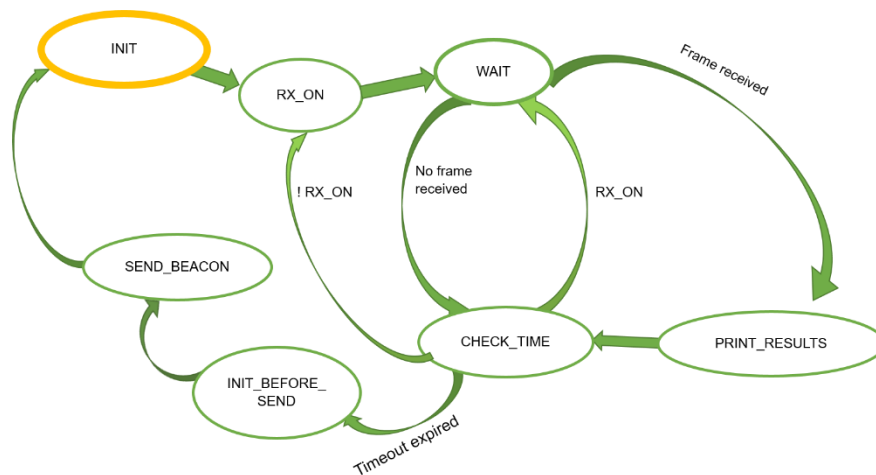


Figure 92 : Automate du protocole BB-TWR dans la version aléatoire

3.3.3.1 Méthode d'expérimentation

Dans cette version de notre protocole, la durée d'un slot est définie par des valeurs comprises en 3 et 50 ms. Chaque nœud tire de façon aléatoire un délai après lequel il diffuse sa trame. Le calcul du ToF et de la distance est réalisé en fonction des informations dont dispose le nœud, d'après les messages qu'il a reçus, avant chaque diffusion de nouvelle trame.

Les conditions de cette expérience sur le *testbed* sont les mêmes que précédemment, donc sur une topologie limitée à 5 nœuds où tous les nœuds sont à portée radio à 1 saut (clique).

3.3.3.2 Analyse et interprétation des résultats

Les Figure 93 et Figure 94 nous montrent les résultats de *ranging* des nœuds 0 et 4 dans le cas non aléatoire (*Non Schedule Direct Access*). On peut observer des erreurs maximales comprises entre -0.48 et 0.49 cm dans le cas du nœud 4 (Figure 94) alors que nous avons des erreurs comprises entre -0.22 et 0.19 cm dans le cas séquencé (Figure 89). Ces performances sont acceptables dans un contexte non séquencé quand on sait qu'une précision est basée sur une bonne maîtrise des instants d'émissions, les délais inter-émission.

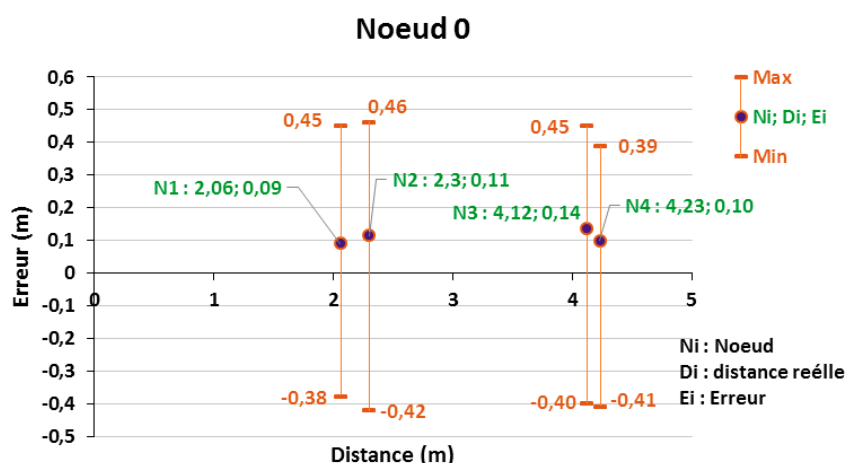


Figure 93 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 0 dans le mode Non Schedule Direct Access

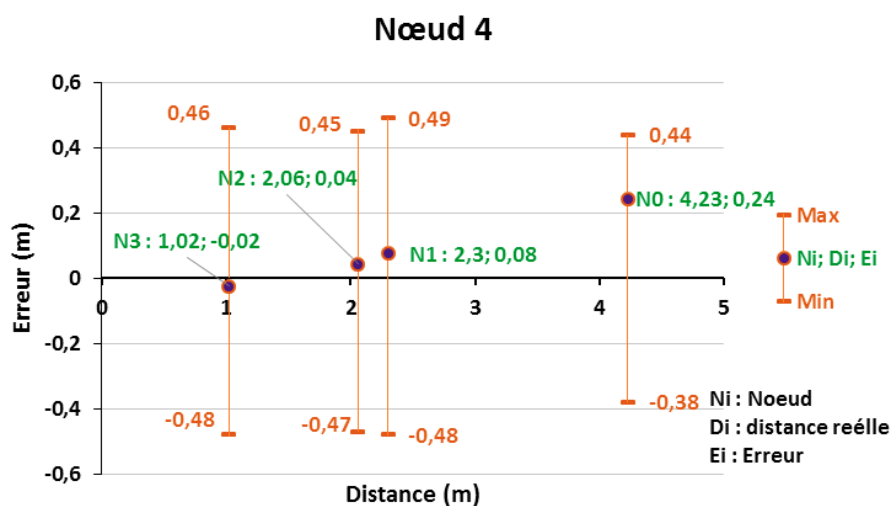


Figure 94 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 4 dans le mode Non Schedule Direct Access

3.3.4 Conclusion

De manière générale, les résultats obtenus dans les deux modes s'annoncent satisfaisants. Dans le mode séquencé, où nous avons l'avantage d'éviter les collisions et donc d'obtenir de bonnes performances de *ranging*, nous pouvons observer sur les graphiques des figures 34 et 35 que l'erreur moyenne est comprise entre -0,02 et 0,15 m. Les erreurs maximales sont comprises entre -0,37 et 0,38 m (Figure 88). Ce qui est pertinent car ces erreurs moyennes sont très proches de la distance réelle. Cette expérience, dans le mode séquencé, nous a permis de connaître les limites de la correction par le *skew*. Nous remarquons, dans cette expérience, que pour les durées de slot de 1 ms, les performances du *ranging* se dégradent (Figure 90) et parfois pour des D_{slot} de 2 ms à cause de certains délais de traitement (3.3.2.2.). Ces valeurs de délai n'ont pas été intégrées dans la suite de nos expériences dans le mode aléatoire.

Dans le mode aléatoire, où le risque de perte de trame et de collision est réel, nous pouvons observer des erreurs maximales comprises entre -0,48 et 0,49 m dans le cas du nœud 4 (Figure 94) alors que dans le mode séquencé nous avons des erreurs comprises entre -0,22 et 0,19 m (figure 35). Nous constatons aussi que dans ce mode l'erreur moyenne est comprise entre 0,09 et 0,24 m. Les grandes imprécisions sont liées à de grands délais entre les échanges. Nous porterons une attention particulière à ce problème dans les sections suivantes.

On remarque aussi que les résultats de *ranging*, l'erreur de *ranging* n'est pas égale de part et d'autre d'un couple. Lorsqu'un couple de nœuds A et B effectue le *ranging*, les résultats obtenus par chacun des deux nœuds montrent des erreurs de *ranging* différentes, alors que ces deux nœuds sont fixes. La **Figure 95** nous montre par exemple la précision du *ranging*, dans le mode séquentiel, obtenue par les nœuds 0, 2 et 4 dans les mêmes conditions (durée de slot égale à 10 ms). Le nœud 0 obtient une erreur de *ranging* moyenne de 4 cm avec le nœud 2, alors que ce dernier obtient une erreur de 12 cm avec le nœud 0. Nous faisons aussi le même constat pour les couples (0 ; 4) et (2 ; 4). L'explication c'est que la durée de l'échange TWR n'est pas la même dans les deux sens. Dans la section 3.5.5.2, nous nous porterons une attention particulière à ce phénomène.

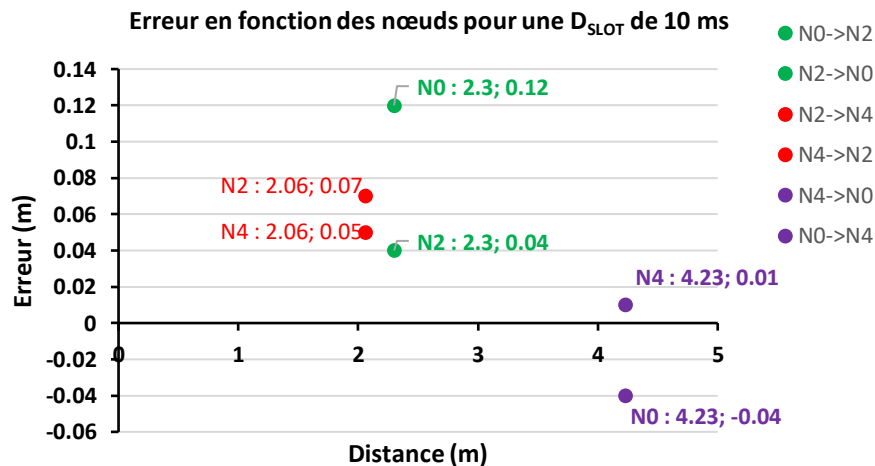


Figure 95 : Représentation de l'erreur en fonction des nœuds

Cette expérience nous montre la bonne implémentation du protocole BB-TWR dans notre environnement. L'inclusion du trafic de *ranging* dans le trafic natif du réseau s'annonce prometteuse et réaliste.

3.3.5 Précision du ranging, taux de perte de trames et collisions

Lors des échanges BB-TWR, il arrive que les nœuds ne donnent pas des valeurs cohérentes dans le calcul de la distance à cause des pertes de paquets ou des collisions. Les pertes de paquets surviennent lorsque, en version direct non séquencée en accès direct, le temps de réception expire alors que le nœud n'est pas parvenu à recevoir les estampilles de tous les nœuds. Une collision a lieu lorsque les nœuds tirent la même fin de leur durée d'attente. Un autre problème survient lorsque le temps de traitement de la trame au niveau processeur est plus grand que le délai inter-émission. Dans ces cas, les nœuds n'estampillent pas les bonnes valeurs des instants d'émission et de réception des trames. L'estimation de la distance est surestimée. Ces valeurs aberrantes sont donc estimées puis supprimées avant le calcul de la distance. Une estimation des pertes de trames est représentée dans le tableau 40.

Tableau 40 : Représentation du taux de perte

Durée du slot (D_{slot})	Taux de perte
1 ms	100 %
2 ms	< 30 %
3-70 ms	< 10 %
70-100ms	< 5 %

Ces résultats montrent que le protocole BB-TWR est efficace tant que la durée de slot est supérieure à 3 ms puisque le taux de perte de trames est inférieur à 10 %. Ces 10 % peuvent être liés aux facteurs propres à notre protocole que nous allons aborder dans la section 3.3.5.2.3. Lorsque la période inter-émission est inférieure à 3 ms, le taux de perte de paquets croît de manière considérable.

Les résultats de la Figure 96 nous montrent aussi que le protocole proposé offre de manière générale de bonnes performances. Dans cette figure, nous représentons la moyenne générale des erreurs obtenues par chaque nœud. Nous allons ici nous intéresser à l'erreur minimale et maximale qui est comprise respectivement entre -0,13 et 0,24 m. Ceci est très encourageant dans le mode aléatoire. Le protocole proposé est en mesure de fonctionner dans un trafic natif où les *beacons* peuvent être diffusés toutes les 200 ms secondes.

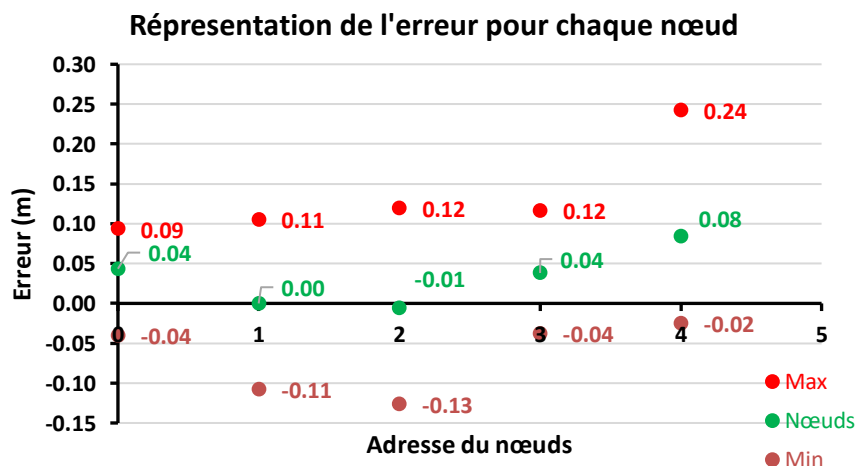


Figure 96 : Représentation générale de l'erreur de ranging en fonction de chaque nœud

3.3.6 Analyse de performance de BB-TWR dans le testbed Ophelia

3.3.6.1 Présentation du testbed Ophelia

Dans cette section, nous allons analyser les performances de BB-TWR en utilisant le testbed Ophelia. Le projet Ophelia [84] prévoit le déploiement simple de *testbeds* efficaces en vue de travailler sur la reproductibilité des résultats. Dans le laboratoire, nous avons déployé un *testbed* Ophelia composé de 18 nœuds DecaWiNos présentés dans la section 3.1.2. Dans cette expérimentation, les nœuds sont déployés dans une salle de 90 m² dans un plan 2D, à une hauteur de 2.65 m du sol ; certains sont positionnés au milieu de la pièce, et d'autres à 37 cm des murs (Figure 97).



Figure 97 : Environnement de test Ophelia

Cette nouvelle plateforme se différencie de notre premier *testbed* par le fait que les expériences sont automatisées via des contrôleurs Raspberry Pi connectés en réseau. Ces contrôleurs pilotent les nœuds DecaWiNo. Les expériences peuvent être exécutées à distance et automatisées. Pour chaque expérience, nous obtenons un fichier *log* contenant les informations de *ranging*, pour chaque nœud. À partir de ces fichiers de log, nous générons l'erreur moyenne pour chaque couple de nœuds. Nous obtenons aussi graphiquement l'erreur estimée par le nœud (en rouge sur la Figure 98) par rapport à la position du nœud sur le plan ainsi que l'erreur moyenne de tous les *rangings* (points en bleu) calculés par un nœud (Figure 99).

On peut remarquer sur cet exemple de la Figure 98 que nous avons dans ce *testbed* des nœuds qui sont en ligne de vue ou LOS (nœuds 20 et 82 par exemple), et en non ligne de vue ou NLOS (comme 2B et 25 par exemple). Les distances varient de 0,72 mètres à 9,25 mètres.

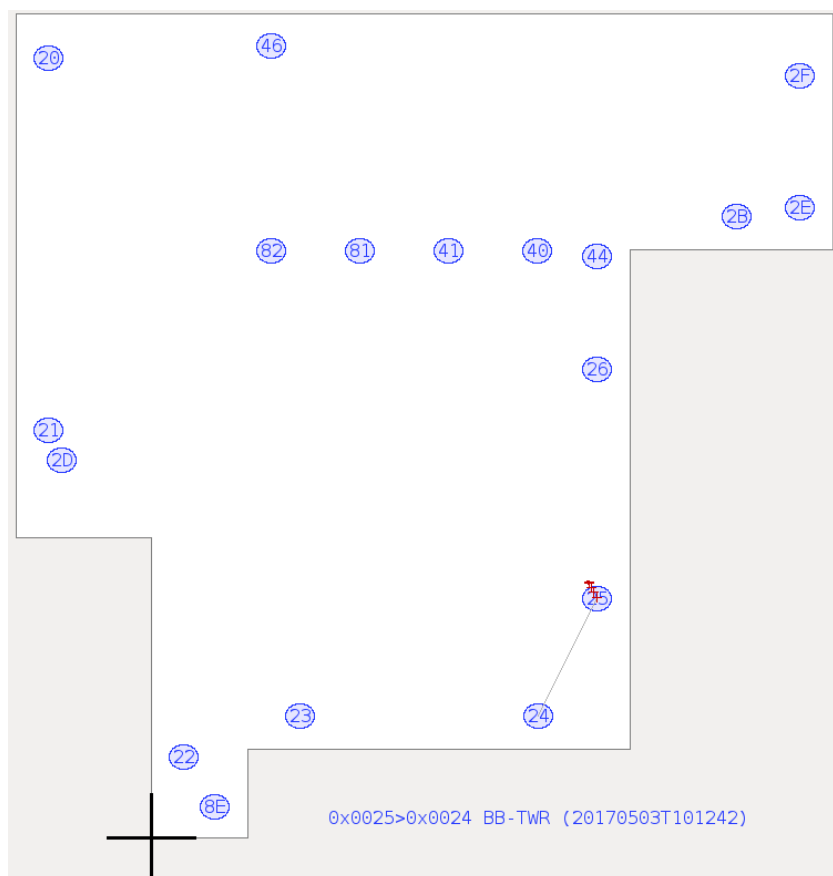


Figure 98 : Représentation en 2D de l'erreur sur le testbed Ophélia

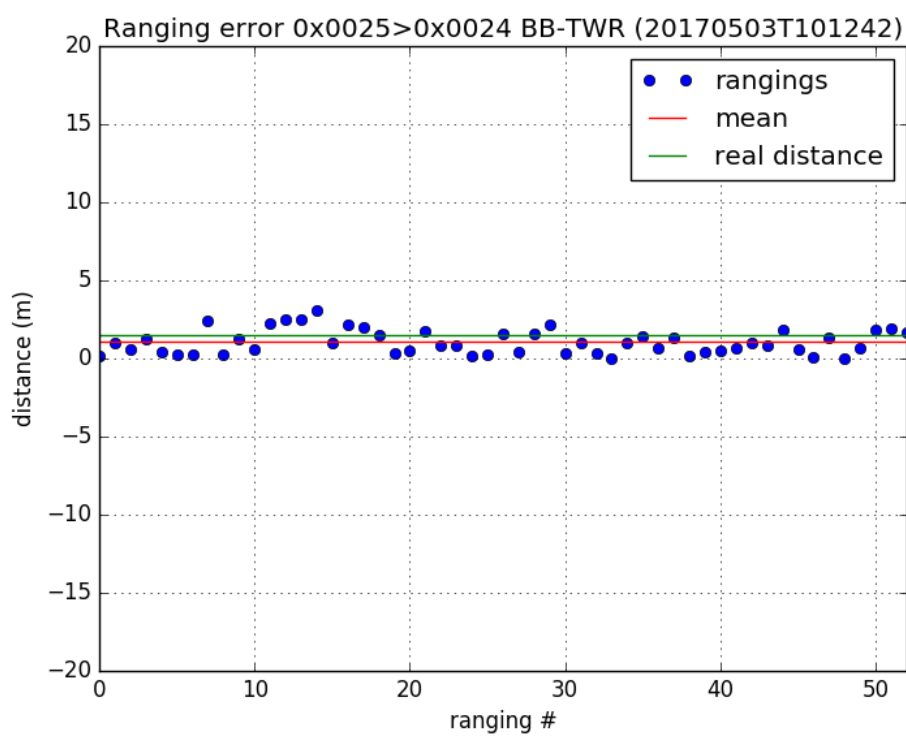


Figure 99 : Représentation graphique de l'erreur

Sur la Figure 99, les points bleus représentent l'erreur de *ranging* de toutes les sessions de ranging effectuées par le nœud 0x0025. L'erreur moyenne est représentée graphiquement par l'écart entre la distance mesurée par le protocole en rouge et la distance réelle, connue par installation, en vert.

Le résultat présenté sur ces deux figures permet de visualiser le bon fonctionnement du protocole sur ce cas précis. Dans la suite du document nous présenterons la généralisation ses résultats.

Dans ce qui suit, nous allons exploiter le protocole BB-TWR en version séquencée et aléatoire.

3.3.6.2 BB-TWR en mode séquencé et *Non Schedule Direct Access*

3.3.6.2.1 Le mode séquencé

Dans ce mode, nous réalisons deux expériences sur le *testbed* Ophélia. Pour chaque expérience, nous définissons la durée de l'expérience (60 s pour notre expérience) et la durée de slot. Une première expérience est réalisée où les nœuds ont une durée de slot de 5 ms et une deuxième une durée de slot de 50 ms. Dans ces deux expériences, nous avons des nœuds en situation de LOS et de NLOS.

La Figure 101 et la Figure 102 montrent les résultats de notre expérience avec des durées de slot D_{SLOT} de 5 et 50 ms. Nous avons représenté la précision de l'erreur en fonction du délai inter-émission. Le délai inter-beacon est représenté ici par le temps aller-retour de deux messages.

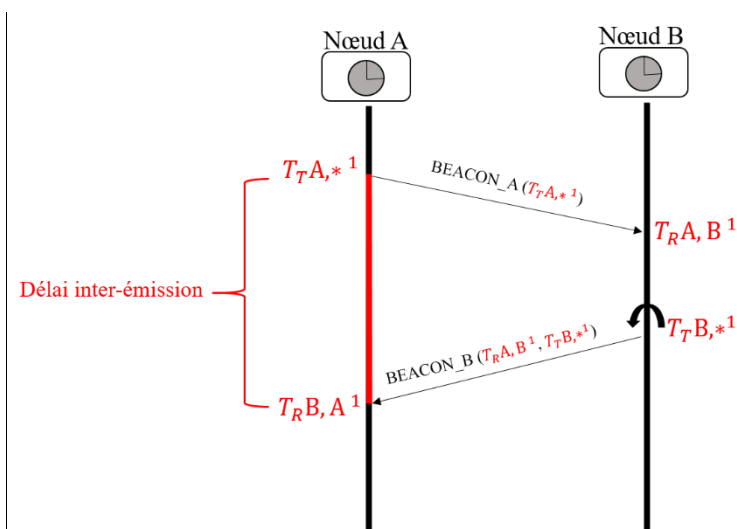


Figure 100 : Illustration du délai inter-beacon

Le délai inter-beacon est le temps $T_4 - T_1$ nécessaire pour obtenir les informations pour le calcul de ranging. Ce temps minimum pour une paire de nœuds ayant deux slots contigus est égal à la durée du slot. Plus les échanges s'étalent, plus ce temps augmente. L'équation (45) indique la durée de ce délai.

$$\text{Délai inter beacon} = N@ * D_{SLOT} \quad (45)$$

$N@$: Numéro de l'adresse du nœud

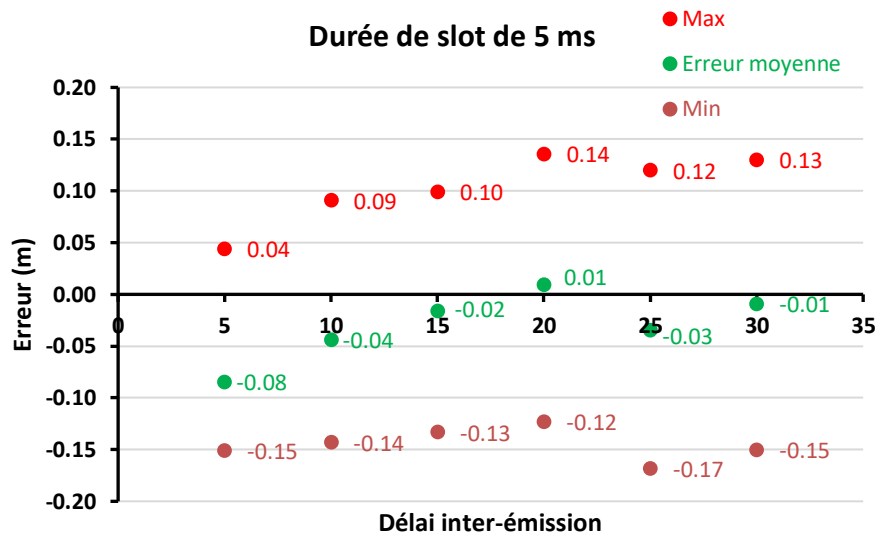


Figure 101 : Représentation de l'erreur en fonction du délai inter-beacon sur un DSLOT de 5 ms

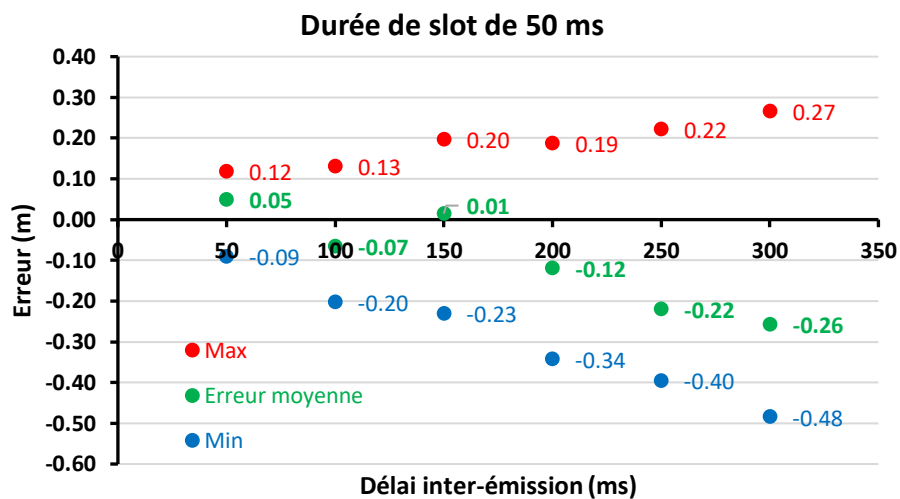


Figure 102 : Représentation de l'erreur en fonction du délai inter-beacon pour un DSLOT de 50 ms

Il est pertinent d'observer sur ces deux graphiques, l'erreur absolue dans le premier cas (D_{SLOT} de 5 ms) ne dépasse pas les 17 cm et ce, pour des délais inter-beacon allant jusqu'à 30 ms. Nous avons bien cette même tendance pour la première valeur du deuxième cas (D_{SLOT} de 50 ms). Le début du deuxième cas (D_{SLOT} de 50 ms) montre bien la fin du premier cas (D_{SLOT} de 5 ms) comme le montre la Figure 101

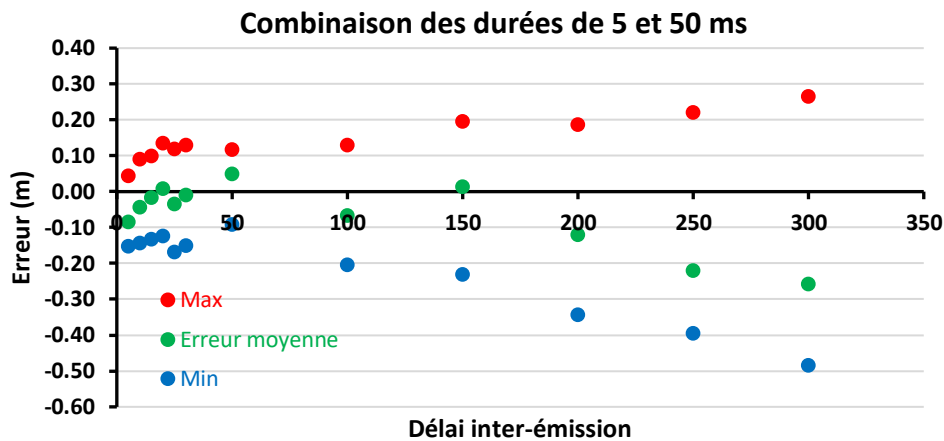


Figure 103 : Combinaison des durées de slot de 5 et 50 ms

La Figure 103 combine bien ces deux résultats et montre la bonne implémentation du protocole dans notre environnement de travail. L'erreur maximale est inférieure à 50 cm dans les cas les plus défavorables étudiés dans cette expérimentation, c'est-à-dire avec une durée inter-beacon de 300 ms.

3.3.6.2.2 Le mode Non Schedule Direct Acces

Après le mode séquencé, nous avons réalisé une expérience dans le mode non séquencé. Le mode séquencé présente l'avantage d'éviter les collisions et, donc, d'obtenir les performances du protocole de *ranging* brutes. Avec le mode non séquencé, le scénario est plus réaliste, mais le risque de collision est présent, les pertes de trames aussi. Ce mode a été exécuté dans les mêmes conditions que le mode séquencé mais avec des délais variables compris entre 3 et 300 ms.

La Figure 104 représente les résultats obtenus dans ce mode. Nous avons représenté la précision du *ranging* en fonction du délai inter-beacon dans les plages de 3 à 50 ms, de 51 à 100 ms, de 101 à 200 ms et 201 à 300 ms.

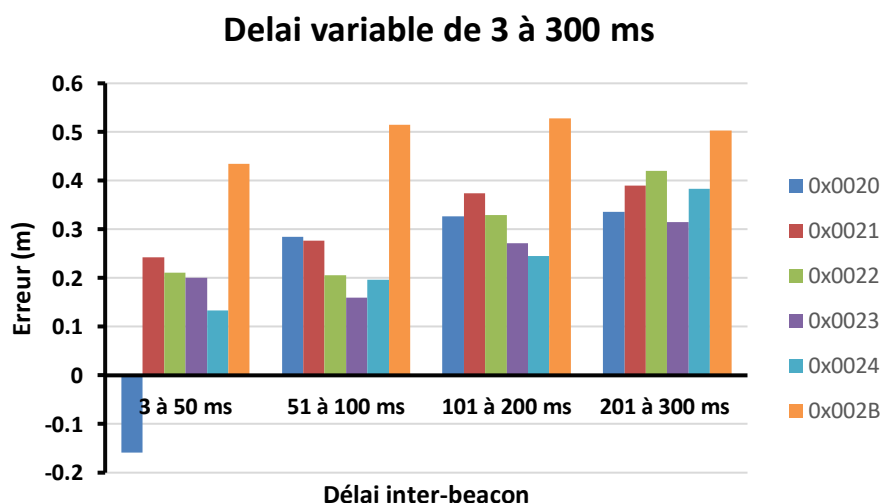


Figure 104 : Représentation de l'erreur en fonction du délai inter-beacon pour un D_{slot} compris en 3 et 300 ms

Chaque nœud est représenté par une barre verticale dans une plage de délai. La moyenne de l'erreur de *ranging* est représentée pour chaque nœud dans cette plage de délai.

Nous constatons encore ici que la précision, dans les pires cas, est groupée autour de 40 cm comme précédemment, excepté dans le cas du nœud 0x002B qui est dans une situation sévère de NLOS : ce nœud est en non visibilité directe avec la plupart des autres nœuds. La distance est dans ce cas surestimée avec les nœuds concernés. L'erreur moyenne globale aussi.

Les fortes imprécisions sont la conséquence de grands délais. Nous constatons aussi que plus le délai inter-*beacon* est long, moins on corrige avec le *Skew*.

3.3.6.2.3 Evaluation de la précision du ranging par rapport au nombre de collision ou aux pertes de trames

On pourrait affirmer que l'erreur, dans le cas aléatoire, est liée aux nombreuses collisions ou de pertes de trames lors des échanges. Les collisions interviennent lorsque deux nœuds diffusent leur *beacon* de manière simultanée. Il y a pertes de trames lorsqu'un nœud, après une courte période de slot, quitte l'état de réception pour traiter les informations reçues. Dans cet état de traitement, il perd des trames qui lui sont destinées.

Nous voulons ici évaluer ce critère réseau important pour mesurer la performance de notre protocole. En effet, pour un médium peu chargé et où il y a peu de collision, on devrait donc théoriquement obtenir une bonne précision de *ranging* ; dans le cas contraire, s'il y a beaucoup de collisions, on devrait s'attendre à une mauvaise précision. La Figure 105 montre la précision du ranging en fonction du taux de perte de trames.

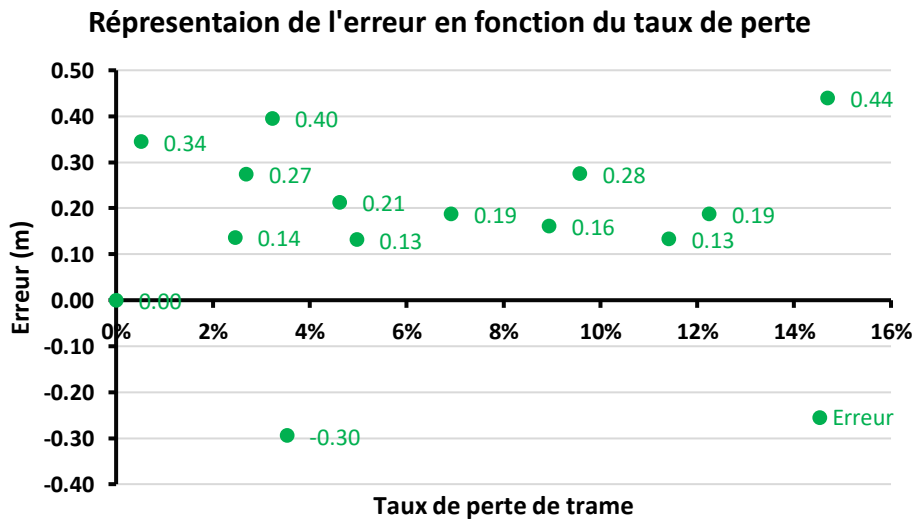


Figure 105 : Représentation de l'erreur en fonction du taux de perte pour un D_{SLOT} compris entre 3 et 300 ms

Nous avons, pour chaque couple de nœud, évalué le nombre de trames émises et reçues et ainsi évalué le taux de perte. L'erreur moyenne de toutes les sessions de ranging étant déjà connue.

Nous constatons ici que la précision du *ranging* ne semble pas liée au taux de perte des messages. La précision du ranging devrait changer en fonction du taux de perte liée au nombre de collision. Ce n'est pas le cas. L'explication est que dans un contexte de ranging, la précision est fortement liée au temps

qui s'écoule entre les échanges, ce qui est la métrique principale. Plus les horloges sont synchronisées, moins ce temps aura un impact sur la précision du ranging, et dans notre contexte, le taux de perte liées au nombre de collision n'a aucun impact sur cette métrique temporelle. On peut donc bien perdre des trames issues des quelques voisins et obtenir une bonne précision avec les autres. On pourra aussi dans les prochains échanges obtenir une bonne précision avec les voisins absents lors de la session précédente.

Dans un contexte (avec des précautions particulières) où les nœuds devraient obligatoirement acquitter une trame reçue, une collision ou une perte de trame entraînerait la réémission de cette trame. Ceci augmenterait le temps de réponse (et rendra long les échanges) et entraînera donc un impact non négligeable sur la précision du ranging. Mais nous ne sommes pas dans ce cas. On ne peut pas se fier à la métrique du taux de perte liées au nombre de collision car dans un contexte de ranging, la précision de ranging n'est pas forcément liée au nombre de trame perdues (taux d'erreur) mais plutôt aux phénomènes temporels de synchronisation.

3.3.6.2.4 Conclusion

A l'issue des résultats obtenus avec le testbed Ophelia, nous observons que les précisions observées dans les deux modes présentent des résultats pertinents. Nous avons pour les deux modes, des erreurs comprises entre 0 à 10 cm et de 10 à 25 cm, respectivement pour des délais allant de 3 à 50 ms et 51 à 100 ms. Nous remarquons aussi que pour les délais inter-émission de 300 ms, l'erreur est concentrée autour de +/- 40 cm. C'est une performance intéressante. Cela nous permettra par exemple de diffuser du trafic TWR dans des *beacons* et maintenir une précision de ranging acceptable de 40 cm.

De plus, on a manifestement une augmentation de l'erreur de *ranging* avec une augmentation du délai inter-*beacon*. On pourrait naturellement paramétrer le délai inter-*beacon* en fonction de la précision de *ranging* attendue applicativement. Si nous souhaitons par exemple, pour un trafic natif, une précision de 10 ou 20 cm, il faudra des délais inter-*beacon* compris entre 3 et 50 ms ou 51 à 100 ms ou plus pour des applications qui ne tiendront pas compte de la précision. Si nous pouvons nous satisfaire d'une erreur de 50 cm ou plus, tout en ayant des trafics réguliers, on pourrait exploiter la précision du *ranging* avec des délais inter-*beacon* jusqu'à 300 ms.

Enfin, pour terminer, il a été nécessaire d'aborder l'impact de la dissymétrie du protocole de ranging dans les *beacons*, dont le séquençement est imposé par la couche MAC. La précision de *ranging* devrait idéalement être la même entre une paire de nœuds fixes : si un nœud 0x0001 effectue le ranging vers un 0x0002 et inversement (0x0002 vers 0x0001) alors que les nœuds sont fixes et à la même distance durant toutes les expériences, ces nœuds devraient avoir des erreurs de ranging différentes puisque que les délais inter-*beacon* ne seront pas les mêmes. C'est ce que nous avons montré dans les résultats de la Figure 96.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre 3, nous avons évalué les performances du protocole BB-TWR dans notre environnement de travail expérimental. BB-TWR est la généralisation à n du protocole 2M-TWR. C'est un protocole de collectes d'estampilles temporelles qui permet d'effectuer des *rangings* avec plusieurs nœuds à portée. Cette originalité nous permet d'effectuer le *ranging* de manière séquentielle ou non séquentielle avec plusieurs nœuds, uniquement via des trames diffusées, ce qui est très original dans ce domaine. Les résultats montrent la bonne performance de notre protocole sur plusieurs expérimentations réalisées sur différents *testbeds*, performance qui est particulièrement liée au délai inter-émission. Plus ce délai est long, moins la qualité du ranging est appréciable. Ceci à cause de la dérive comme démontré précédemment.

Conclusion générale et Perspectives

Les résultats restent toutefois corrects pour des valeurs de délais compris entre 3 et 300 ms. Dans ces conditions, l'erreur de *ranging* est d'une dizaine de centimètre pour les délais compris entre 3 et 50 ms et une vingtaine pour les délais compris entre 51 et 100 ms, et plus. Ces résultats montrent la possibilité de l'inclusion du trafic de *ranging* dans le trafic natif du réseau et la mise en place d'un système de localisation continue de plusieurs voisins tout en gardant des précisions de 40 cm pour des délais inter-émission de 300 ms. Et comme cette augmentation de l'erreur se fait en fonction de la précision, on pourrait donc être amené à prédéfinir l'erreur de *ranging* en fonction du délai inter-beacon.

Ce travail de thèse s'inscrit dans un contexte général de localisation. Il consistait à mettre en place un système de ranging, continu avec plusieurs nœuds, exploitant les propriétés de la technologie UWB utilisant le temps de vol (ToF) comme méthode de mesure temporelle. Ce système de ranging devrait être encapsulé dans le trafic natif.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les métriques de mesure de types *range-free* utilisées pour l'estimation de la distance comme le CPE, Centroid ou encore le plus répandu le DV-Hop. Nous avons aussi présenté les métriques de types *range-based* comme le AoA, ToF, TDoA, RSSI. Nous avons par la suite étudié les protocoles de ranging exploitant la mesure du temps de vol du signal. Il s'agit des protocoles OWR, TWR et SDS-TWR. Nous avons étudié leur fonctionnement et choisi le protocole TWR qui servira de base pour notre travail. La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation de la technologie Ultra-Wide Band de la technologie et en particulier ses avantages dans un système de ranging.

Dans le deuxième chapitre, nous avons justifié le choix de ToF par rapport au RSSI et exposé les problématiques liées à l'imprécision de la mesure du TOF. En effet, les systèmes exploitant les mesures du ToF font forcément face au problème de précision du *ranging* car, les instants d'émission et de réception sont obtenus à la couche physique grâce à des marqueurs temporels très précis. Mais au-delà des problèmes de détection des signaux, les problèmes de précision sont principalement dus à la dérive des horloges, et plus spécifiquement à l'impact de ces dérives sur le temps mesuré par les nœuds. Ceci étant, nous avons proposé une technique de correction dynamique basée sur la mesure des horloges des nœuds du réseau. Nous avons aussi porté une attention particulière au problème de surcharge protocolaire qui est l'une des contraintes intrinsèques des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons pour cela proposé le protocole 2M-TWR qui, grâce à la fonctionnalité *Delayed Transmission*, permet de programmer l'instant d'émission d'un message. Ce protocole améliore de plus de 33%, en passant de 3 à 2 messages, le protocole TWR. Nous avons aussi dans ce chapitre présenté le protocole BB-TWR : le protocole de ranging de notre étude. Ce protocole de collecte de timestamp est basé sur le protocole 2M-TWR. Il permet d'effectuer le ranging avec plusieurs nœuds à portée. Nous avons proposé un formalisme de notation de timestamp et de message et présenté un exemple d'utilisation dans les protocoles TWR et SDS-TWR.

Le troisième chapitre a été consacré à l'implémentation des protocoles étudiés dans le chapitre un et deux. L'expérimentation s'est faite à partir de modules radio DecaWino composés d'une carte Arduino (Teensy 3.2) et du module DWM1000 du constructeur DecaWave du constructeurs DecaWave. La première partie des expériences s'est effectuée dans le testbed OpenWiNo où les expériences étaient manuelles. Les nœuds DecaWiNo, tous en ligne de vue (LOS), étaient connectés un Laptop via un câble USB. Dans la deuxième partie des expériences, les tests étaient automatisés via le testbed Ophelia. Les nœuds, en LOS et NLOS, étaient fixés au mur à une hauteur de 2.65 m et à 35 cm du mur. Leur prise en main se faisait à distance. Dans tous les cas, les mesures de ToF sont obtenues après chaque échange

puis converties en distance. Dans le testbed OpenWiNo, nous avons implémenté les protocoles TWR et SDS-TWR et notre technique de correction. De manière générale, les résultats obtenus ont montré de bonnes performances. Nous avons pu constater l'impact de la symétrie du protocole SDS-TWR dans la correction du protocole de base. Ces premiers résultats nous ont permis de valider notre environnement et comparer ces différents protocoles. Le TWR, de par son asymétrie, a été choisi et implémenté dans notre environnement de travail. Le protocole 2M-TWR a été implémenté ainsi que le protocole BB-TWR dans sa version aléatoire et séquencée. Dans le testbed Ophelia, nous avons implémenté le protocole BB-TWR dans ses deux versions. Les résultats obtenus sont satisfaisants, la précision du ranging est fonction des délais inter-beacon. Plus ce délai est long, moins le *Skew* corrige. On pourrait donc, pour une précision escomptée, définir le délai inter-émission. Ceci laisse envisager une possible inclusion du trafic de *ranging* dans le trafic usuel du réseau tout en ayant des trafics réguliers et une localisation continue des nœuds voisins à un saut.

Le travail de thèse que nous avons réalisé a ouvert plusieurs pistes qui mériteraient d'être approfondies, à savoir :

- Utilisation des anciennes informations de ranging en cas de collision ou de perte de trame : dans BB-TWR, en cas de collision ou de perte de trame, le nœud affiche pour cette session « information manquante » et n'évalue pas la distance dans cette situation. Il serait pertinent dans ce cas d'utiliser les anciennes informations de ranging, en se basant par exemple sur le principe d'une double table : la table actuellement utilisée pour faire les calculs à partir des estampilles déjà présentes, et une seconde table où sont mémorisées au fur et à mesure de leur nouvelles arrivées, les estampilles récentes mais non encore complètes.
- Amélioration du ranging dans des situations de NLOS : Le ranging dans des milieux où la propagation du signal est difficile est problématique. Le ranging dans cette situation peut conduire à des erreurs importantes à cause de la propagation multi-trajet et le fait que les nœuds ne soient pas en ligne de vue (NLOS),
- Intégrer le protocole BB-TWR dans un algorithme de localisation pour permettre la localisation continue des nœuds : lorsqu'un nœud mobile dispose suffisamment d'information de ranging, il est en mesure de déterminer sa position par rapport aux nœuds fixes via des algorithmes de référence comme la trilatération, la triangulation ou le *IRingLa* qui a été développé au sein de notre équipe.
- Amélioration du testbed avec nœuds mobiles sur rail et tournant : les tests que nous réalisons se font avec des nœuds fixes, à des distances qui ne changent pas. Il serait intéressant d'évaluer la précision du ranging lorsque les nœuds sont mobiles,
- Amélioration de l'antenne UWB pour des portées plus grandes : la portée maximale des nœuds est d'une quinzaine de mètre. Au-delà il y'a des pertes de trames,
- Utilisation concrète de ce service de ranging et de localisation en partenariat avec des entreprises, pour des nouveaux projets de recherche,
- Couplage de la localisation sans couture avec une localisation *outdoor*

GLOSSAIRE

2M-TWR	2 Messages - Two Way Ranging
AMCA	Asynchronous Multi-Channel Adaptation
AOA	Angle Of Arrival
BB-TWR	Broadcast Based - Two Way Ranging
BLE	Bluetooth Low Energie
CSMA / CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DL-IoT	Device Layer - Internet of Things
DLL	Delay Locked Loop
DSME	Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension
DSP	Densité Spectrale de Puissance
IoT	Internet of Things
LLDN	Low Latency Deterministic Network
LOS	Line Of Sight
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Medium Access Control
NB	Narrow Band
NLOS	Non Line Of Sight
NSDA	Non Schedule Direct Access
Overhead	Surcharge protocolaire
OWR	One Way Ranging
PLL	Phase Locked Loop
Range-Based	Solution exploitant des mesures fournis par le système et convertibles en distance
Range-Free	Solution exploitant des hypothèses de connectivité du réseau
Ranging	Mécanisme d'évaluation de la distance
RFID Blink	Radio Frequency Identification
RFRAME	Ranging Frame
RMARKER	Ranging Marker
RSSI	Received Signal Strength Indication
SDS-TWR	Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging
SPI	Serial Peripheral Interface
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference Of Arrival
Testbed	Environnement de test
Timestamp	Estampille temporelle
ToF	Time of Flight
Transceiver	Emetteur et récepteur de signal
TSCH	Time-Slotted Channel Hopping
TWR	Two Way Ranging
UWB	Ultra Wide Band
WiNo	Wireless Node
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Aspect d'un capteur Micaz	18
Figure 2 : Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	18
Figure 3 : Composition d'un capteur	19
Figure 4 : Topologie réseau WPAN en étoile [5][6].....	21
Figure 5 : Topologie réseau WPAN entièrement maillée (Full mesh) sans coordinateur (a) et partiellement maillé avec coordinateur (b) [5][6]	22
Figure 6 : Topologie cluster-tree	22
Figure 7 : Processus de localisation	23
Figure 8 : Les principales métriques pour la localisation	24
Figure 9 : Principe de DV-hop.....	24
Figure 10 : Angle incident.....	25
Figure 11 : Mesure avec un réseau d'antenne ULA ($N_a=3$) [15]	26
Figure 12 : Temps de vol du signal	26
Figure 13 : Mesures de la différence d'instant d'arrivée (TDoA) avec 2 ancrs et 1 mobile	27
Figure 14 : One Way Ranging	29
Figure 15 : Protocole TWR effectuant la mesure du ToF entre deux nœuds « asynchrones »	30
Figure 16 : Protocole TWR effectuant la mesure du ToF avec des coordinateurs et des nœuds simples « asynchrones »	31
Figure 17 : Protocole SDS-TWR effectuant la mesure du ToF entre deux nœuds « asynchrones »	32
Figure 18 : Single-Sided Two-Way Ranging with Multiple ACK (SS-TWR-MA).....	33
Figure 19 : Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging with Multiple Acknowledgement (SDS-TWR-MA).....	34
Figure 20 : Exécution du protocole Sequential SDS-TWR (SSDS-TWR) avec trois nœuds ancrs [29].....	35
Figure 21 : Exécution du protocole PDS-TWR avec trois nœuds ancrs [29].....	35
Figure 22 : Pile de protocoles IEEE 802.15.4/ZigBee.....	37
Figure 23 : Structure de la supertrame [29].....	39
Figure 24 : Topologie mesh (a) et topologie en étoile (b)	40
Figure 25 : Couche application Zigbee.....	41
Figure 26 : Pile protocolaire de la BLE.....	43
Figure 27 : La structure multi-SF de la DSME dans l'IEEE 802.15.4e [43].....	46
Figure 28 : La supertrame LLDN avec des timeslots dédiés [43]	47
Figure 29 : Exemple de mécanisme de synchronisation dans un réseau TSCH [43].....	49
Figure 30 : Masque FCC pour l'émission des signaux UWB en indoor et en Outdoor	52
Figure 31 : Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en PAM	54
Figure 32 : Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en OOK.	55
Figure 33 : Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en BPSK	55
Figure 34 : Diagramme des opérations de la couche IEEE 802.15.4a PHY-UWB [1][2]	57
Figure 35 : Format de la trame UWB [1][2].....	57
Figure 36 : Topologie générale du réseau de nœuds communicants dans un contexte de localisation	62

Figure 37 : Exemple de marquage d'estampille	67
Figure 38 : Le protocole TWR.....	68
Figure 39 : Le protocole SDS-TWR	69
Figure 40 : Le bit RMARKER dans la trame de ranging.....	70
Figure 41 : Format de la trame de ranging définie par le standard IEEE et DecaWave	70
Figure 42 : Le protocole TWR dans sa version de base	71
Figure 43 : Le protocole TWR (a) et sa version améliorée 2M-TWR (2Message-TWR) (b)	72
Figure 44 : Format de la trame BB-TWR.....	73
Figure 45 : Exemple de diffusion de trame	73
Figure 46 : Topologie générale du réseau utilisant le protocole BB-TWR.....	74
Figure 47 : Diagramme de séquence du protocole BB-TWR.....	74
Figure 48 : Diagramme de séquence BB-TWR à 3 nœuds.....	77
Figure 49 : Emission de la trame du nœud A	78
Figure 50 : Emission de la trame du nœud B	79
Figure 51 : Émission de la trame du nœud C	80
Figure 52 : Émission de la deuxième trame du nœud A	82
Figure 53 : Émission de la deuxième trame du nœud B.....	83
Figure 54 : Emission de la deuxième trame du nœud C	84
Figure 55 : Les nœuds WiNos	87
Figure 56 : Architecture	88
Figure 57 : Gestion des nœuds WiNo via l'interface web Webino [68]	90
Figure 58 : Carte Teensy 3.2.....	90
Figure 59 : Le module DWM1000 de DecaWave	91
Figure 60 : Transceiver DW1000.....	91
Figure 61 : Schéma du DW1000 [75].....	92
Figure 62 : Les différentes composantes du nœud DecaWiNo.....	93
Figure 63 : La librairie DecaDuino dans la pile protocolaire et diagramme de séquence [77]	94
Figure 64 : Architecture physique de DecaDuino	94
Figure 65 : Protocole TWR classique (a) et sa version améliorée 2M-TWR (b)	95
Figure 66 : Contexte de mesure.....	96
Figure 67 : Plateforme d'évaluation de la distance	96
Figure 68 : Représentation de l'erreur TWR en fonction de la distance	97
Figure 69 : Représentation de l'erreur SDS-TWR en fonction de la distance	98
Figure 70 : Représentation de l'erreur SDS-TWR / TWR en fonction de la distance	99
Figure 71 : Le protocole TWR (a) et le protocole SDS-TWR (b)	99
Figure 72 : Session protocolaire de ranging par TWR en présence d'un délai introduit entre la réception de la trame START et l'émission de la trame ACK.....	101
Figure 73 : Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 1.02m (TWR)	101
Figure 74 : Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 3.08m (TWR)	102
Figure 75 : Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 5.14m (TWR)	102
Figure 76 : Nœud DecaWino et son image dans l'infrarouge	103
Figure 77 : Augmentation de la température en fonction du délai.....	103

Figure 78 : Durée de traitement sur le bus SPI	105
Figure 79 : Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur une distance 1,02m	105
Figure 80 : Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur une distance 3,08m	106
Figure 81 : Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur une distance 5,14m	106
Figure 82 : Estimation du Skew [81]	107
Figure 83 : Emission retardée lors de l'envoi de la trame	108
Figure 84 : Représentation des protocoles TWR et 2M-TWR en fonction de la distance	108
Figure 85 : Condition d'expérimentation	110
Figure 86 : Automate du protocole du protocole BB-TWR dans sa version séquencée	111
Figure 87 : Diagramme de séquence avec 5 nœuds	111
Figure 88 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 4 avec une durée de slot de 70 ms	112
Figure 89 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 0 avec une durée de slot de 6 ms	112
Figure 90 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 0 avec une durée de slot de 1 ms	113
Figure 91 : Chronogramme des échanges	114
Figure 92 : Automate du protocole BB-TWR dans la version aléatoire	114
Figure 93 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 0 dans le mode Non Schedule Direct Access	115
Figure 94 : Représentation de l'erreur de ranging du nœud 4 dans le mode Non Schedule Direct Access	115
Figure 95 : Représentation de l'erreur en fonction des nœuds	116
Figure 96 : Représentation générale de l'erreur de ranging en fonction de chaque nœud	117
Figure 97 : Environnement de test Ophelia	118
Figure 98 : Représentation en 2D de l'erreur sur le testbed Ophélie	119
Figure 99 : Représentation graphique de l'erreur	119
Figure 100 : Illustration du délai inter-beacon	120
Figure 101 : Représentation de l'erreur en fonction du délai inter-beacon sur un DSLOT de 5 ms	121
Figure 102 : Représentation de l'erreur en fonction du délai inter-beacon pour un DSLOT de 50 ms	121
Figure 103 : Combinaison des durées de slot de 5 et 50 ms	122
Figure 104 : Représentation de l'erreur en fonction du délai inter-beacon pour un D_{SLOT} compris en 3 et 300 ms	122
Figure 105 : Représentation de l'erreur en fonction du taux de perte pour un D_{SLOT} compris entre 3 et 300 ms	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des protocoles de ranging.....	36
Tableau 2 : Récapitulatifs des différentes bandes de fréquence [2].....	38
Tableau 3 : Comparaison entre le Bluetooth classique et le BLE [36]	43
Tableau 4 : Bandes de fréquence de la couche PHY-UWB du standard IEEE 802.15.4a [1][2]...56	
Tableau 5 : Bénéfices et avantages et des systèmes UWB par rapport aux systèmes à bande étroite [55]	58
Tableau 6 : Comparaison des techniques bande étroite et ultra large bande	58
Tableau 7 : Table 0, Table d'estampille du nœud d'adresse 0.....	75
Tableau 8 : Table 1Sup, Table d'estampille supplémentaire du nœud 1	76
Tableau 9 : Table A, Table d'estampille du nœud A	78
Tableau 10 : Table ASup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A	78
Tableau 11 : Table B, Table d'estampille du nœud B	78
Tableau 12 : Table BSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud B	79
Tableau 13 : Table C, Table d'estampille du nœud C	79
Tableau 14 : Table CSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud C	79
Tableau 15 : Table B, Table d'estampille du nœud B	79
Tableau 16 : Table BSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud C	80
Tableau 17 : Table A, Table d'estampille du nœud A	80
Tableau 18 : Table ASup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A	80
Tableau 19 : Table C, Table d'estampille du nœud C	80
Tableau 20 : Table CSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A	80
Tableau 21 : Table C, Table d'estampille du nœud C	81
Tableau 22 : Table A, Table d'estampille du nœud A	81
Tableau 23 : Table ASup, Table d'estampille supplémentaire du nœud A	81
Tableau 24 : Table B, Table d'estampille du nœud B	81

A	$T_{TB,*}^{Nseq(B)}$	$T_{RB,A}^{Nseq(B)}$	$T_{TA,*}^{Nseq(A)+1}$	$T_{RA,B}^{Nseq(A)+1}$
C	$T_{TB,*}^{Nseq(B)}$	$T_{RB,C}^{Nseq(B)}$	$T_{TC,*}^{Nseq(C)}$	$T_{RC,B}^{Nseq(C)}$

Tableau 25 : Table BSup, Table d'estampille du nœud B

Tableau 26 : Table A, Table d'estampille du nœud A	82
Tableau 27 : Table BSup, Table d'estampille supplémentaire du nœud B	82
Tableau 28 : Table B, Table d'estampille du nœud B	82
Tableau 29 : Table C, Table d'estampille du nœud C	82
Tableau 30 : Table C, Table d'estampille du nœud C	83
Tableau 31 : Table A, Table d'estampille du nœud A	83
Tableau 32 : Table B, Table d'estampille du nœud B	83
Tableau 33 : Table A, Table d'estampille du nœud A	84
Tableau 34 : Table B, Table d'estampille du nœud B	84
Tableau 35 : Caractéristiques des WiNos développés [69] [70]	88
Tableau 36 : Consommation d'énergie des nœuds WiNo [70]	89
Tableau 37 : Les canaux UWB pris en charge par le DW1000.....	92
Tableau 38 : Tableau récapitulatif des erreurs du protocole TWR (en mètre).....	97

Tableau 39 : Tableau récapitulatif des erreurs du protocole SDS-TWR (en mètre)	98
Tableau 40 : Représentation du taux de perte	117

PUBLICATIONS PERSONNELLES

Revue internationale

“BB-TWR: An original TWR-based ranging protocol for indoor localization on asynchronous networks” en cours de soumission

Conférences et ateliers internationaux

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val. “An Original Correction Method for Indoor Ultra-Wide Band Ranging-based Localisation System” Springer, Lille 2016.

Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Nezo Ibrahim Fofana et Thierry Val “DecaDuino: An Open Framework for Wireless Time-of-Flight Ranging Systems” Wireless Days, Toulouse 2016.

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Thierry Val “Un banc de mesure de ranging pour la localisation par ToF de nœuds UWB pour les Réseaux de Capteurs Sans Fil et l’Internet des Objets” JNCT (Journées Nationales des Communications Terrestres), Valence 2015

Adrien van den BOSSCHE, Réjane DALCE, François DESPAUX, Nezo Ibrahim FOFANA, Thierry VAL “Utilisation de transceivers DecaWave DW1000 sur la nouvelle plateforme OpenWiNo de prototypage rapide pour une localisation indoor précise d’objets communicants en UWB” www.decawave.com

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val. “Prototypage et analyse de performances d’un système de ranging pour une localisation par UWB” CFIP (Colloque francophone sur l’ingénierie des protocoles) et NOTERE (Nouvelles Technologies de la Répartition) - CFIPNOTERE 2015 TÉLÉCOM PARISTECH – Paris.

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Thierry Val. “Etude des couches MAC dédiées à l’UWB”. JNCT (Journées Nationales des Communications Terrestres), Toulouse-Blagnac 2014

BIBLIOGRAPHIE

1. IEEE Std 802.15.4a-2007, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Amendment 1: Add Alternate PHYs
2. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks, Sept 2011.
3. Roshini T. Nair, "Smart Dust", Final Year B. Tech, ECE Department, SCT College Of Engineering, Trivandrum. International Journal of Engineering Research-Online. A Peer Reviewed International Journal Vol.3., Issue.4., 2015 (July-Aug)
4. www.decawave.com
5. IEEE 802.15.3a, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html>
6. IEEE 802.15.4a, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>
7. Yunhao Liu et al. « Location, localization, and localizability ». In: Journal of Computer Science and Technology 25.2 (2010), p. 274–297.
8. L. Doherty and L. Ghaoui, "Convex position estimation in wireless sensor networks", Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, (2001) April 22-26, Anchorage, AK, USA.
9. P. K. Patro, "Localization in wireless sensor network with mobile beacons", Proceedings of the 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers, (2004) September 6-7, Tel-Aviv, Israel.
10. D. Niculescu and B. Nath, "Ad-hoc positioning system (APS)", Proceedings of the IEEE GLOCOM, San Antonio, (2001) November 22-29, San Antonio, TX, USA.
11. D. Niculescu and B. Nath, "DV based positioning in ad hoc networks", Journal of Telecommunication Systems, vol. 22, no. 1, (2003), pp. 267-280.
12. JStefan Tomic et Ivan Mezei, "Improvements of DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks" January 2016, Volume 61, Issue 1, pp 93-106
13. Jianmin Zhang, Ning Guo et Jian Li "An Improved DV-Hop Localization Algorithm Based on the Node Deployment in Wireless Sensor Networks" International Journal of Smart Home Vol. 9, No. 10, (2015), pp. 197-204
14. Roudy Dagher, « Sur la radionavigation dans les villes intelligentes du futur. Le cas des réseaux de capteurs sans fils » Université Lille 1 – Sciences et Technologies, thèse soutenue le 06 octobre 2015
15. Theodore S Rappaport, Jeffrey H Reed et Brian D Woerner. « Position location using wireless communications on highways of the future ». In : Communications Magazine, IEEE 34.10 (1996), p. 33–41
16. Adel Thaljaoui, Thierry Val, Damien Brulin, Nejah Nasri. Real Time Acoustic Localization of Elderly Persons in a Smart Home (regular paper). In: Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN 2014), Sousse, Tunisie, 03/11/2014-07/11/2014, IJERT, novembre 2014
17. Sinan Gezici et H Vincent Poor. « Position estimation via ultra-wideband signals ». In: Proceedings of the IEEE 97.2 (2009), p. 386–403. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4796279&isnumber=4802183>.
18. Guoqiang Mao, Baris Fidan et Brian Anderson. «Wireless sensor network localization techniques ». In : Computer Networks 51.10 (2007), p. 2529–2553.
19. T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, Second Edition 2002, Prentice Hall PTR
20. Wooju Kim Sharly Joana Halder, Joon-Goo Park. Adaptive Filtering for Indoor Localization using ZIGBEE RSSI and LQI Measurement. InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/adaptive-filtering-applications/adaptive-filtering-forindoor-localization-using-zigbee-rssi-and-lqi-measurement>, 2011.
21. Benoît Denis, « Exploitation des Capacités de Radiolocalisation des Transmissions Ultra-Large Bande dans les Réseaux Sans-Fil », INSA Rennes, Thèse soutenue le 2 décembre 2005.

22. Hach, R., "Symmetric double sided two-way ranging," IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPAN), Doc. IEEE P.802.15-05-0334-00-004a, June 2005. Jonsson, J., "On the security of CTR + CBC-MAC, in Proceedings of Selected Areas in Cryptography—SAC 2002," Nyberg, K., Heys, H., eds., lecture notes in Computer Science, vol. 2595, pp. 76–93, Berlin: Springer, 2002.
23. Y. Jiang and V.C.M. Leung, "An Asymmetric Double Sided Two-Way Ranging for Crystal Offset," Proc. Int. Symp. Signals, Syst. Electron. (ISSSE), Montreal, Québec, Canada, July 2007, pp. 525-528.
24. Asif Iqbal Baba "Calibrating Time of Flight in Two Way Ranging" Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, MSN 2011, Beijing, China, December 16-18, 2011
25. Hakyong Kim "A Ranging Scheme for Asynchronous Location Positioning Systems" The 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC) 2009
26. Hakyong. Kim, "Double-Sided Two-Way Ranging Algorithm to Reduce Ranging Time," IEEE Commun. Lett., vol. 13, no. 7, July 2009, pp. 486-488.
27. M. Kwak and J. Chong, "A New Double Two-Way Ranging Algorithm for Ranging System," 2nd IEEE Int. Conf. Netw. Infrastructure Dig. Content, Sept. 2010, pp. 470-473.
28. Réjane Dalcé, "Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur", Université de Toulouse, Thèse soutenue le 26 juin 2013
29. Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche et Thierry Val. « An experimental performance study of an original ranging protocol based on an IEEE 802.15.4a UWB testbed »
30. Mari Carmen Domingo. A context-aware service architecture for the integration of body sensor networks and social networks through the ip multimedia subsystem. IEEE Communications Magazine, 49 :102–108, January 2011.
31. Kwangcheol, S., Kyungjun, K., and Soontae, K. (2011). ADSR: Angle-based Multi-Hop Routing Strategy for Mobile Wireless Sensor Networks. IEEE Asia-Pacific Services Computing conference (APSCC).
32. C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das. Ad hoc on demand distance vector (aodv) routing. In IETF, Internet Draft, <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-aodv-05>. Dernier accès, Mai 2017
33. Abdellatif CHAFIK, « Architecture de réseau de capteurs pour la surveillance de grands systèmes physiques à mobilité cyclique », Université de Lorraine, thèse soutenue le 09 juillet 2014
34. X. Carcelle, B. Heile, C. Chatellier, P. Pailler, "Next WSN applications using ZigBee", In Home Networking, Springer US, pp. 239-254, 2008.
35. Specific requirements Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPAN), IEEE Computer Society, juin 2005
36. litepoint, « Bluetooth® Low Energy - Whitepaper », <http://www.litepoint.com>
37. Pavel Kriz, Filip Maly, and Tomas Kozel "Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons" Mobile Information Systems Volume 2016 (2016), Article ID 2083094, 11 pages, 27 March 2016
38. Carles Gomez, Joaquim Oller and Josep Paradells "Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology" Sensors 2012,
39. C. Gomez, J. Oller, J. Paradells, Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology, Sensors 12 (9) (2012) 11734–11753.
40. <https://www.bluetooth.com/news/pressreleases/2016/06/16/-bluetooth5-quadruples-rangedoubles-speedincreases-data-broadcasting-capacity-by-800>
41. R. A. Scholtz, "Multiple access with time-hopping impulse modulation," Proc. MILCOM '93, vol. 2, 1993, pp. 447-450.
42. R. J. Fontana,"A brief history of UWB communications", Trans. Microwave Theory and Tech, Vol. 14, No. 11, pp. 528-547, 1966.
43. 802.15.4e Task Group. 802.15.4e-2012: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer, 16 April 2012.
44. F. Nekoogar, "Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications", Prentice Hall, ISBN-13: 978-0132782234, September 2005.

45. W. H. Gao, L. L. Guo, Z. G. Liang, "A novel wireless personal area network technology: Ultra wide band technology", Journal of Marine Science and Application, Vol. 5, No. 3, pp. 63-69, September 2006.
46. Jean Schwoere, « Etudes et implémentation d'une couche physique UWB impulsionnelle à bas débit et faible complexité », soutenue le 30 janvier 2006
47. FCC. First Report and Order Regarding UWB Transmission. Technical Report ET Docket 98-153, Federal Communication Commission, Washington, D.C. 20554, 14 February 2002.
48. R. Aiello and A. Dabak. Multiband OFDM Physical Layer Presentation. IEEE TG 802.15.4a, (15-03-0449-00-0003a), 2003.
49. L. Ismail, Y. Bahreini, "Ultra-wideband pulse modulation system and method", US Patent No 7190722, March 2007.
50. A. P. Adsul, S. K. Bodhe, "Performance Comparison of BPSK, PPM and PPV Modulation Based IR-UWB Receiver Using Wide Band LNA", International Journal of Computer Technology and Applications, Vol. 3, No. 4, pp. 1532-1537, July-August 2012.
51. IEEE Std 802.15.4-2003, "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - 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 (LR-WPANs)", October 2003.
52. C.E. Shannon, "Communication In The Presence Of Noise", Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 2, pp. 447-457, February 1998.
53. D. Cassioli, M.Z. Win, A. F. Molisch, "A statistical model for the UWB indoor channel", IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Vol. 2, pp. 1159-1163, May 2001.
54. Anouar DARIF, « Contributions à l'amélioration des performances des Réseaux de Capteurs sans fil à base d'IR-UWB. These soutenue le 22/01/2015 »
55. Robert. J. Fontana, Steve. J. Gunderson, "Ultra-Wideband Precision Asset Location System", in IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, pp. 147-150, May 2002.
56. Nicolas Fourty, Adrien van den Bossche, Thierry Val, An advanced study of energy consumption in an IEEE 802.15.4 based network: Everything but the truth on 802.15.4 node lifetime, Computer Communications, Volume 35, Issue 14, 1 August 2012, Pages 1759-1767, ISSN 0140-3664, <http://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.05.008>.
57. Réjane Dalcé, Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur. Thèse de doctorat, INSA Toulouse, Juin 2013.
58. L. Gui, Amélioration de la Localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil par Méthodes "Range-free". Thèse de doctorat, INSA Toulouse - EDSYS - Laboratoires LATTIS puis IRT, février 2013.
59. D. Lieckfeldt, J. You, D. Timmermann, "Characterizing the influence of human presence on bistatic passive rfid-system" Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, November 2009, pp. 338 – 343
60. Evanaska Maria BARBOSA NOGUEIRA "Conception d'un système d'antennes pour la localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fil" Décembre 2013
61. Xu Huang; Barralet, M.; Sharma, D. "Behaviors of Antenna Polarization for RSSI Location Identification", International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC '09. Volume: 1, Page(s): 151 - 154
62. K. Römer. Time synchronization in ad hoc networks. In Proc. of MobiHoc '01, 2001.
63. J.B. Pierrot. Time synchronization in uwb ad hoc networks using TOA estimation. In Proc. of IEEE ICU'05, Septembre 2005.
64. A. van den Bossche, R. Dalcé, Nezo Ibrahim Fofana, T. Val, "DecaDuino: An Open Framework for Wireless Time-of-Flight Ranging Systems", Wireless Days, February 2016
65. Dries Neiryck, Marcas O'Duinn and Ciaran McElroy "Characterisation of the NLOS Performance of an IEEE 802.15.4a Receiver" DecaWave Ltd Dublin, Ireland, March 2015
66. Khan R, Khan SU, Zaheer R, Khan S, , Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges, in Frontiers of Information Technology (FIT), 2012 10th International Conference on , vol., no., pp.257-260, 17-19 Dec. 2012 doi: 10.1109/FIT.2012.53
67. Vladimir Savic and Erik G. Larsson, "Experimental Study of Indoor Tracking Using UWB Measurements and Particle Filtering" 2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Edinburgh, UK, July 2016

68. van den Bossche, A., Dalce, R., Val T.: OpenWiNo: An Open Hardware and Software Framework for Fast-Prototyping. In: IoT. International Conference on Telecommunications. Thessaloniki, Greece (2016)
69. Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val. “An Original Correction Method for Indoor Ultra Wide Band Ranging-based Localisation System” ADHOC NOW 2016: 15th International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless (AdHoc Now) 2016, Lille, France.
70. Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val. “Plateforme de prototypage rapide d'objets connectés avec la famille WiNo* - Enabling Fast prototyping of Connected Things using the WiNo* family”. ISTE OpenScience - Internet des objets, ISTE editions, France, Mars 2017
71. PJRC Teensy 3.1: <http://www.pjrc.com/store/teensy31.html>
72. Chauvenet C, Tourancheau B, Genon Catalot D, (2013) Energy Evaluations for Wireless IPv6 Sensor Nodes. SENSORCOMM 2013, 7 th International Conference on Sensor Technologies and applications, 2013, pp.97-103
73. <http://www.decawave.com/products/dwm1000-module>
74. DW1000 datasheet, <http://www.decawave.com/products/dw1000>, dernier accès, Mai 2017
75. DecaWave Ltd 2014, DW1000 datasheet, dernier accès, Mai 2017
76. DecaWave Ltd 2014, DWM1000 datasheet, dernier accès, Mai 2017
77. <https://www.irit.fr/~Adrien.Van-Den-Bossche/decaduino/index.html>
78. www.decawave.com, dernier accès, Mai 2017
79. B. Denis, J.-B. Pierrot, C. Abou Rjeily, “Joint Distributed Time Synchronization and Positioning in UWB Ad Hoc Networks using TOA”, soumis à IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Special Issue on Ultra Wideband
80. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), September 2011
81. François Despaux, Katia Jaffres-Runser, Adrien van den Bossche, Thierry Val. “Accurate and Platform-agnostic Time-of-flight Estimation in Ultra-Wide Band”, IEEE PIMRC 2016, At Valance, Spain.
82. Xin Yan and Xiao Gang Su. Linear Regression Analysis: Theory and Computing. World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, NJ, USA, 2009.
83. Eric Jones, Travis Oliphant, Pearu Peterson, et al. SciPy: Open source scientific tools for Python.
84. Ophelia: Open Framework for Real-Life IoT Applications. Projet Région MP/FEDER Snootlab.com et IRIT/IRT. <https://www.irit.fr/~Adrien.Van-Den-Bossche/ophelia>

Résumé : Les réseaux de capteurs sans fil ont connu depuis quelques années un intérêt majeur dans tous les domaines d'activités. Une des informations attendue est la localisation des nœuds capteurs ; pourtant, compte-tenu des contraintes imposées aux capteurs en termes d'encombrement et d'énergie, il est peu envisageable d'équiper le capteur d'équipements spécifiques dédié à la localisation comme un récepteur GPS. Dès lors, localiser le capteur en exploitant le signal de communication est une option intéressante. A l'inverse des techniques *Range-Free* exploitant des hypothèses de connectivité du réseau, les techniques généralement connues pour atteindre une bonne précision de localisation par la radio sont de type *Range-Based*, et se basent, dans notre cas, sur la mesure du temps de vol du signal radio UWB.

Nos contributions portent alors sur le choix d'une couche physique performante, sur la mise en place d'outils favorisant une bonne précision temporelle dans les échanges radio, et l'élaboration d'un protocole original d'évaluation de la distance. Les travaux présentés dans ce manuscrit visent donc à aborder la problématique générale de la localisation d'intérieur dans les réseaux de capteurs sans fil, et en particulier la fonctionnalité de *ranging* qui est le mécanisme d'évaluation de la distance entre les nœuds. Dans un premier temps, nous implémentons puis évaluons les protocoles de référence rencontrés dans la littérature. Nous identifions et corrigeons par la suite, les erreurs susceptibles de biaiser la métrique du temps de vol. Nous proposons alors le protocole 2M-TWR (*2 Messages – Two Way Ranging*) comme une amélioration du protocole de référence TWR. Enfin, nous proposons et implémentons le protocole BB-TWR (*Beacon Based –TWR*), qui permet d'effectuer le *ranging*, de manière séquentielle et non séquentielle, en incluant les informations temporelles nécessaires dans tout trafic natif diffusé existant. Les preuves de concept ont été prototypées et évaluées sur un banc de test réel.

Mots-clés : Réseaux de capteurs sans fil ; Localisation ; Mesure de distance ; Temps de vol ; Hyper étalement de spectre ; Evaluation de performances ; Protocoles ; Prototypage.

Abstract: In recent years, Wireless Sensor Networks has gained an important interest in all fields of activity. One of the expected information is the sensor nodes localization; However, due to the sensors constraints in terms of memory and energy, it is not possible to equip the sensor with specific equipment dedicated to the localization as the GPS receiver. Thus, locating the sensor by using the communication signal is an interesting option. In contrast to Range-Free techniques which use assumptions of network connectivity, the Range-Based techniques are known to reach good localization accuracy and, in our case, they are based on the measurement of the time of flight of the radio signal UWB.

Our contributions focus on the choice of an efficient physical layer, on the implementation of tools that promote a good temporal accuracy in radio exchanges, and the development of an original distance evaluation protocol. Research works presented in this manuscript aim to address the global general problem of indoor localization in wireless sensor networks, and particularly the ranging functionality which is the distance evaluation mechanism between nodes. At first, we implemented and evaluated the well-known protocols encountered in the literature. Then, we identify and correct errors that may bias the Time of flight metric. We propose the 2M-TWR protocol (2 Messages - Two Way Ranging) as an improvement to the TWR reference protocol. Finally, we propose and implement the BB-TWR (Beacon Based-TWR) protocol, which is able to perform ranging, sequentially and non-sequentially, by including the necessary time information in any existing broadcast native traffic. The proofs of concept were prototyped and evaluated on a real testbed.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Localization; Ranging; Time-of-Flight; Ultra-Wide Band; Performance Evaluation; Protocols; Prototyping.