



HAL
open science

Prototypage et analyse de performances d'un système de ranging pour une localisation par UWB

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val

► To cite this version:

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. 16ème Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP 2015), Jul 2015, Paris, France. pp. 1-8. hal-01399872

HAL Id: hal-01399872

<https://hal.science/hal-01399872>

Submitted on 21 Nov 2016

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.



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 15345

The contribution was presented at CFIP 2015 :
<http://www.cfip-notere.org/V2015/>

To cite this version : Fofana, Nezo Ibrahim and Van den Bossche, Adrien and Dalce, Rejane and Val, Thierry *Prototypage et analyse de performances d'un système de ranging pour une localisation par UWB*. (2016) In: 16ème Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP 2015), 22 July 2015 - 24 July 2015 (Paris, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Prototypage et analyse de performances d'un système de *ranging* pour une localisation par UWB

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val

Université de Toulouse, UT2J, CNRS-IRIT-IRT

Toulouse-Blagnac, France

nezo-ibrahim.fofana@irit.fr - adrien.van-den-bossche@irit.fr - rejane.dalce@irit.fr - val@irit.fr

Résumé : Durant cette dernière décennie, les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et plus généralement les liens de collecte dans l'Internet des Objets et les réseaux pour les systèmes ambiants, ont suscité une forte attention dans le monde industriel et celui de la recherche. Une de leurs applications est la localisation *indoor* des nœuds communicants. Le mécanisme d'évaluation de la distance entre les nœuds (*ranging*) est nécessaire pour les nœuds afin de déterminer leur position de façon précise. Les travaux de recherche présentés dans cet article s'inscrivent dans cette thématique et visent à utiliser les liens radio de type *Ultra Wide Band* (UWB), proposés par l'amendement de l'année 2007 de la norme IEEE 802.15.4, également utilisée par Zigbee et 6LoWPAN. Les transmissions UWB permettent d'obtenir un *ranging* performant par mesure de temps de vol (*Time of Flight, ToF*) qui permet d'alimenter des algorithmes et des protocoles de localisation des nœuds, sans matériel dédié (GPS, accéléromètre...). Pour que cette capacité de localisation soit réellement intéressante sur le plan applicatif, les messages de *ranging* doivent être intégrés dans les messages usuels du réseau (données, *beacons*, acquittements, etc.). Or, parce que le *ranging* repose sur des messages contraints temporellement, cette intégration pose problème, notamment à cause de la dérive des horloges qui n'est plus négligeable si les échanges sont étalés dans le temps. On aboutit alors à une grande imprécision de mesure de *ToF* et donc, de distance. Pour corriger ces erreurs, nous avons introduit des techniques originales de corrections algorithmiques dynamiques afin d'éliminer ces imprécisions. Une solution protocolaire de mesure est proposée et évaluée par un prototypage réel. Les résultats montrent une précision d'une vingtaine de centimètres, ce qui est bien meilleur que les solutions précédentes étudiées et qui laisse envisager la proposition future d'une inclusion du trafic de *ranging* dans le trafic usuel du réseau.

Mots clés: localisation d'intérieur; Temps de vol ; *ToF* ; UWB ; mesure de distance ; *ranging* ; TWR ; SDS-TWR ; prototypage ; *testbed*.

I. INTRODUCTION

Le grand public mais aussi le monde industriel représentent des domaines applicatifs privilégiés pour les systèmes de localisation d'équipements mobiles communicants. Les ateliers de production, les zones de stockage, la chaîne du froid, les lieux de vente, les habitations... nécessitent de plus en plus d'informations contextuelles combinant données issues de capteurs, identification des objets, estampilles temporelles, mais aussi localisation d'équipements mobiles et des données

associées. Des cartographies spatio-temporelles sont utiles pour de nombreuses applications. Le GPS est généralement la solution retenue pour la localisation en extérieur, mais souffre d'une trop grande consommation énergétique et ne fonctionne pas ou très mal en intérieur et en environnement cloisonné. La localisation d'intérieur basée sur d'autres techniques est donc nécessaire, elle peut tirer avantage des réseaux de capteurs et autres systèmes de communication sans fil de plus en plus utilisés pour les échanges de données entre objets connectés. La localisation de type *Range-Free*, comme le très connu *DV-Hop*, dans sa version de base [1] ou dans des versions améliorées telles que [2], est simple à mettre en œuvre, car elle se base sur des hypothèses de connectivité cellulaire entre les nœuds du réseau. Elle n'est toutefois pas très précise, typiquement 30% de la portée radio d'un nœud. Les techniques *Range-Based*, c'est-à-dire reposant sur une mesure de distance, peuvent généralement faire mieux en terme de précision, par exemple, en se basant sur l'information de puissance du signal reçu (RSSI) que la plupart des nœuds radio peut offrir. Malheureusement cette information physique souffre de plusieurs lacunes [3], liées aux fortes variations de propagation radio, à cause des obstacles, de la mobilité des nœuds, et de la directivité des antennes. L'évaluation de la distance entre deux nœuds, ou *ranging*, s'en trouve altérée, et la localisation qui en découle, par exemple par *n*-latération, est alors peu précise. Plutôt que d'utiliser la force du signal radio, une meilleure solution [4] consiste à utiliser le temps de vol du signal, ou *Time of Flight, ToF*, entre nœud émetteur et nœud récepteur. Cette technique demande un estampillage temporel précis du signal à la couche Physique, ce qui est rendu possible, y compris dans le matériel destiné au grand public, par les technologies de transmission radio comme le *Chirp Spread Spectrum* (CSS) ou bien encore l'hyper étalement de spectre (*Ultra-Wide Band, UWB*). L'UWB constitue une solution très performante permettant d'offrir les outils physiques pour mesurer précisément ce temps de vol, en permettant des estampilles temporelles des émissions et réceptions des trames directement à la couche PHY, avec une grande précision, grâce à des *timers* de l'ordre de la quinzaine de picosecondes. L'UWB a été intégré dans l'amendement 802.15.4a-2007, qui a abouti à la norme IEEE 802.15.4-2011 sur laquelle repose d'ailleurs les dernières versions de Zigbee et 6LoWPAN. Ce mode de transmission est un candidat sérieux pour le futur

réseau de collecte de l'Internet des Objets, notamment grâce à ses caractéristiques intéressantes sur le temps de vol, et un débit plus élevé que les techniques classiques par DSSS, classiquement utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil.

Si le standard IEEE 802.15.4 propose une normalisation des échanges entre nœuds pour l'évaluation du temps de vol, il ne précise cependant pas comment le service de *ranging* peut être intégré dans une pile protocolaire standard. On voit pourtant clairement quels pourraient être les avantages d'un protocole de *ranging* entièrement fondu dans les échanges de données, c'est-à-dire offrant la possibilité de procéder à une mesure de distance entre deux nœuds dès lors que ces deux nœuds échangent des informations, sans trames dédiées au *ranging*. Il s'agit *in fine* de concevoir un « *ranging* opportuniste ». L'objectif de nos travaux à terme est de proposer un tel service, inclus dans l'empilement protocolaire, le plus transparent possible et le moins coûteux en terme de charge protocolaire supplémentaire (*overhead*), tout en restant précis sur la mesure de distance. Notre volonté est également d'évaluer nos propositions dans un contexte réel en utilisant une plateforme de prototypage rapide (*tesbed*) de notre conception.

Après avoir présenté les protocoles de *ranging* les plus classiques, ainsi que les plateformes de *tesbed*, nous introduisons la problématique de la dérive d'horloge induite par le transport des informations de *ranging* diluées dans les messages usuels, ces derniers étant plus étalés dans le temps que dans les protocoles de *ranging* classiques. Nous présenterons ensuite nos mesures effectuées sur *tesbed* venant confirmer la réalité de la problématique posée. Nous présenterons ensuite une méthode de correction venant combler les failles détectées puis nous présenterons les performances de cette correction, avant de conclure et présenter les perspectives de notre travail.

II. ETAT DE L'ART

De nombreux algorithmes et de systèmes de localisation ont été développés pour les réseaux de capteurs sans fil opérants dans des environnements intérieurs. Les solutions de localisation existantes intègrent de nombreuses technologies, comme Zigbee, Bluetooth et infrarouge, afin d'obtenir les informations de localisation d'objets. Les algorithmes proposés dans la littérature peuvent être classés en deux catégories: la localisation de type *Range-free* et la localisation de type *Range-based*. La première technique exploite les caractéristiques simples de connectivité réseau (tels que DV-hop [1][2][5], ou MDS-MAP [6]) afin d'estimer la position du nœud. La seconde famille de techniques est basée sur des mesures entre les nœuds pouvant être converties en distance ou éventuellement en angle. Cette localisation *Range-based* se divise en deux phases : la phase de *ranging* et la phase de calcul de position. Dans la phase de *ranging*, les informations utilisées sont issues du TOA (*Time of Arrival*) [7], TDOA (*Time Difference of Arrival*) [8], AOA (*Angle of Arrival*) [9] et le RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) [10] pour obtenir *in fine* la distance entre deux nœuds. Avec ces informations, chaque nœud peut calculer ses propres coordonnées en utilisant

des algorithmes de localisations. Le système de localisation basé sur TOA nécessite un dispositif matériel supplémentaire pour garantir la synchronisation entre l'émission et la réception de chaque nœud, ce qui s'avère coûteux. Une faible erreur de synchronisation peut entraîner une grande erreur sur l'estimation de distance. Les systèmes TDOA partagent les inconvénients des systèmes basés sur le TOA. Le système AOA ou DOA (*Direction Of Arrival*) peut être considéré comme une technique complémentaire pour TOA et TDOA. Il permet aux nœuds d'évaluer la distance à partir des angles relatifs entre les nœuds, qui peuvent être obtenus par l'utilisation d'équipements antennaires de mesure d'angle. La technique basée sur l'utilisation du RSSI utilise des modèles de propagation du signal afin de traduire l'intensité du signal reçu en distance. Il n'y a généralement pas besoin de matériel supplémentaire, les *tranceivers* radio actuels étant pour la plupart équipés nativement de circuits électroniques permettant d'associer à chaque trame reçue, un niveau de puissance. Cependant, cette technique souffre [3] habituellement de plusieurs lacunes, liées aux fortes variations de propagation radio, à cause des obstacles, de la mobilité des nœuds, ou bien encore de la directivité des antennes. L'évaluation de la distance entre deux nœuds s'en trouve altérée, et la localisation qui en découle est alors moins fine. La précision du *ranging* peut être améliorée afin de répondre aux exigences variées liées à la localisation. Nous y parvenons en proposant une correction dynamique exploitant les protocoles basés sur le temps de vol utilisant finement les propriétés de la couche physique IEEE 802.15.4-2011 : UWB [11], [12].

En effet, les informations temporelles fournies par les nœuds d'un réseau UWB offrent des évaluations de distances plus fiables [13] que celles issues par exemple du niveau de puissance reçue. A partir de ces informations de temps de vol et la vitesse de propagation du signal dans l'air, nous pouvons obtenir précisément la distance entre deux nœuds. Les méthodes de *ranging* basées sur le *ToF* utilisent un ensemble de messages pour calculer le temps de vol. Lors des émissions et des réceptions des trames, les nœuds estampillent ces instants, au niveau de la couche PHY. Ces *timestamps* sont utilisés pour calculer le *ToF* et donc la distance entre émetteur et récepteur. Plusieurs variantes protocolaires sont possibles et sont présentées dans les sections suivantes.

A. Protocoles de ranging

1) TWR (*Two Way Ranging*)

Cette méthode est la plus simple et l'une des plus anciennes. Elle consiste à envoyer un ensemble de trois messages. Les nœuds A et B sont chargés de récupérer les instants de départ et d'arrivée des messages. Les quatre estampilles temporelles sont rassemblées après réception de la trame DATA_REPLY (cf. Figure 1a) contenant les estampilles t_2 et t_3 du nœud B pour permettre au nœud A de calculer le temps de vol noté *tof* dans l'équation 1.

$$\text{Equation 1. } \mathbf{tof} = \frac{t_4 - t_1 - (t_3 - t_2)}{2}$$

De par sa simplicité, le protocole TWR reste sensible aux problèmes de précision temporelles [11] dus à la dérive des

horloges, les horloges des nœuds A et B n'étant pas exactement les mêmes car basées sur des quartz différents.

2) SDS-TWR (Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging)

Afin de compenser les lacunes du TWR, [14] propose de symétriser le protocole en ajoutant un message à cette session de *ranging* basique TWR, permettant de réduire l'effet des différences d'horloges des deux nœuds impliqués comme l'illustre la Figure 1b.

Le SDS-TWR permet de réduire l'impact de la dérive des horloges et donc, l'écart entre la distance estimée et la distance réelle. Le temps de vol est calculé grâce à l'équation 2 :

$$\text{Equation 2. } \text{tof} = \frac{t_4 - t_1 - (t_3 - t_2) + t_6 - t_3 - (t_5 - t_4)}{4}$$

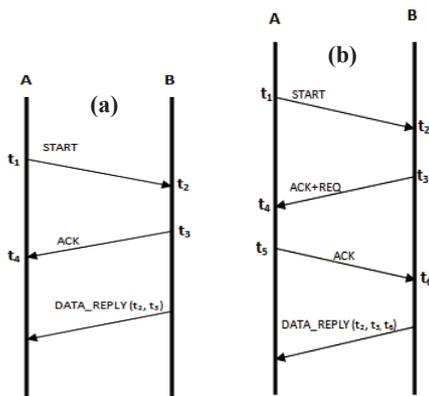


Figure 1. Session protocolaire de ranging en TWR(a) et SDS-TWR(b)

3) SDS-TWR-MA (Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging Multiple Acknowledgements)

Le SDS-TWR-MA a été introduit dans [15] et étudié dans [16]. Le but de ce protocole est de réduire l'imprécision dans le protocole de base SDS-TWR. Etant donné que la différence d'horloge varie dans le temps, plusieurs estimations de la distance sont collectées et moyennées afin de réduire l'impact des perturbations aléatoires. Pour obtenir ces k estimations, SDS-TWR doit être exécuté k fois. L'approche d'exécution multiple a été utilisée dans [17]. Afin de réduire la surcharge liée à l'exécution multiple, les auteurs de [15] ont conçu une version de SDS-TWR avec des acquittements multiples nommée SDS-TWR-MA, où le nombre de trames, donc de marqueurs temporels est augmenté. Pour chaque trame envoyée, les nœuds estampillent l'instant d'arrivée du message et l'instant d'acquiescement. A la fin des échanges, une dernière trame contenant l'ensemble des *timestamps* est envoyé au nœud initial. Cette solution a néanmoins l'inconvénient d'entraîner un grand nombre de messages, qui plus est, dédiés.

Notre objectif est de caractériser finement ces différents protocoles, et de proposer une amélioration à ces derniers dans l'idée d'incorporer le trafic de mesure de distance dans le trafic usuel du réseau. Ce travail a avantageusement utilisé une plateforme matérielle et logicielle d'ingénierie des protocoles que nous avons développée dans notre équipe.

B. Testbeds pour l'évaluation des performances des protocoles en conditions réelles

Certains projets de recherche ont permis de concevoir et déployer des environnements réels, ouverts et accessibles aux utilisateurs pour évaluer les performances des protocoles en environnement réel. Le terme *testbed* est couramment utilisé pour se référer à ces plates-formes, qui peuvent comprendre un grand nombre de nœuds, permettant aux utilisateurs de tester leurs protocoles sur des nœuds réels en tenant compte du facteur d'échelle.

L'un des premiers *testbed* publics en France a été déployé dans le cadre du projet *SensLab* (INRIA). Une étape importante dans la mutation des réseaux de capteurs sans fil vers l'Internet des Objets a été la naissance de la plate-forme *FIT/IoT-LAB* [21] en 2012. Il faut également noter l'existence d'équipes de recherche entièrement axées sur la proposition de plates-formes dédiées aux réseaux de capteurs sans fil et des objets communicants, comme *Planete* [22], *NITOS* et *Orbit*. La plate-forme pour les villes intelligentes *SmartSantander* rivalise avec *FIT/IoT-LAB* en ce qui concerne l'ampleur du déploiement : chacun de ces *testbeds* comporte plusieurs milliers de nœuds disponibles. *INDRIYA* [21] et *TWIST* [22] permettent chacun le déploiement de près de 200 nœuds sur plusieurs niveaux.

Si la plupart des *testbeds* évoqués reposent, au niveau de la couche Physique, sur les protocoles normalisés par IEEE 802.15.4-2006, à 868 MHz et 2,4 GHz, on rencontre assez peu de *testbeds* publics proposant des modes de transmission moins répandus comme UWB. Pourtant, plusieurs projets ambitieux reposent aujourd'hui sur des couches physiques en rupture, comme le projet LoRA FABian [25] par exemple. La plateforme OpenWiNo utilisée dans le cadre de cet article, qui sera présentée plus loin, permet notamment d'exploiter des modes de transmission en rupture.

III. PROBLEMATIQUE

Même si les protocoles de *ranging* présentés précédemment donnent des résultats intéressants, ils induisent l'inconvénient majeur de nécessiter des échanges de messages dédiés, et surtout, ces échanges doivent être effectués sur une durée la plus courte possible, ce qui contraint fortement le cadencement des messages. En effet, l'approche étant répartie, l'estimation du temps de vol repose sur l'utilisation de deux horloges –une sur chaque nœud– supposées identiques. Avec le protocole TWR, l'équation 1 considère que les temps t_2 et t_3 sont cadencés avec la même unité que t_1 et t_4 , alors que, sur un système réel, les deux nœuds étant distincts, aussi réduite soit-elle, il existe une différence sur les horloges; cette différence vient introduire un biais dans la détermination du temps de vol, dont nous présenterons un modèle d'erreur plus loin dans cet article. Si l'on dilate la période d'échange des messages, ce biais augmente, car la dérive des deux horloges a un impact plus important.

SDS-TWR, en imposant une symétrie dans le protocole de *ranging*, vient justement compenser l'erreur introduite par la différence d'horloge. Cependant, cette symétrie est rendue possible au prix d'un message supplémentaire, ce qui augmente

le coût protocolaire (*overhead*) de la solution. A ce titre, si l'un des deux protocoles devait servir de base à un travail d'intégration dans un trafic existant, TWR serait le moins contraint, car il ne nécessite que deux messages pour la matérialisation des instants t_1 , t_2 , t_3 et t_4 , suivis d'un message pour le report de t_2 et t_3 vers le nœud à l'initiative du *ranging*.

Afin de pouvoir intégrer le trafic nécessaire au *ranging* dans le trafic usuel du réseau (*data*, *beacons*, *ack*, etc.), il est nécessaire d'évaluer l'impact réel de la dérive d'horloge sur la mesure de *ranging*. En effet, le trafic du réseau sera écoulé dans des messages qui seront soumis à des délais inhérents aux protocoles, classiques en réseau ; par exemple, en étant transmis en respectant une méthode d'accès au médium telle que CSMA/CA, le *backoff* peut sensiblement retarder la transmission effective des messages. Si le trafic de *ranging* est inclus dans une cascade de *beacons* [20], le délai entre les *beacons* peut être de plusieurs dizaines de millisecondes. L'impact réel de ce retard sur les performances du *ranging* doit être évalué, de façon préliminaire à notre travail.

Enfin, si SDS-TWR introduit une symétrie dans les échanges pour compenser les erreurs introduites par la dérive, cette symétrie implique une maîtrise des instants d'émission des messages : il semble impossible, dans le cadre d'une encapsulation du trafic de *ranging* dans le trafic usuel du réseau, de maintenir cette symétrie, dès lors que les instants d'émission ne seront plus maîtrisés car dépendants de l'empilement protocolaire, et de la méthode d'accès au médium par exemple. Une approche non symétrique comme TWR est donc à privilégier.

IV. MESURES PRELIMINAIRES REALISEES SUR TESTBED

A l'inverse de nombreux travaux qui se basent sur des hypothèses théoriques, calculs formels, et simulations plus ou moins macroscopiques, notre objectif ici est de caractériser finement le monde réel en se basant sur de vrais nœuds physiques, en utilisant avantageusement notre plateforme de prototypage rapide de protocoles *OpenWiNo* [23]. En effet, peu de *testbeds* publics implémentent aujourd'hui des radios de type UWB. Nous avons tout d'abord implémenté les protocoles de *ranging* les plus connus TWR et SDS-TWR afin d'une part, de valider notre environnement et, d'autre part, de comparer leurs performances, en utilisant la couche physique radio UWB proposée par les *transceivers* Decawave [24]. Dans un second temps, nous avons évalué l'impact de la dérive des horloges, par utilisation de ce même *testbed*, afin de vérifier la pertinence de notre problématique.

A. Description du testbed

OpenWiNo [23] est un environnement de développement libre pour l'ingénierie des protocoles pour les réseaux de capteurs sans fil (*Wireless Sensor Networks*, WSN) et les réseaux de collecte de l'Internet des Objets. Il permet le prototypage rapide de protocoles originaux, en langage C, en vue d'une exécution sur *testbed*, via des nœuds réels appelés « *WiNos* », pour *Wireless Node*. Les *WiNos* s'appuient sur l'environnement *Arduino* et sont élaborés en *Open Hardware*. Cette approche permet une grande versatilité sur le matériel ; il est très simple, par exemple, sur un *WiNo*, de « changer de

couche Physique » : il suffit de changer le *transceiver* et le *driver* associé, ce qui, dans un environnement ouvert sur le plan matériel, est effectué sans grande difficulté résume les fonctions des différents *WiNos* élaborés jusqu'ici. Dans cette étude, nous avons utilisé le *DecaWiNo*, un *WiNo* incluant le *transceiver* UWB DW1000 de *DecaWave*, compatible IEEE 805.15.4a-2007. La librairie *Decaduino* a été développée en interne pour l'occasion et sera prochainement disponible pour la communauté scientifique.

Tableau. 1. Caractéristiques des *WiNos* développés

	WiNoRF22	TeensyWiNo	DecaWiNo	WiNoVW
CPU/RAM/Flash	ARM Cortex M4 (32bit) 72MHz, 64kB RAM, 256kB Flash (PJRC Teensy 3.1)			
Transceiver (librairie Arduino)	HopeRF RFM22b : 200-900MHz, 1-125kbps, GFSK/FSK/OOK, +20dBm <i>RadioHead</i>		DWM1000 UWB IEEE 802.15.4 <i>DecaDuino</i>	Variés <i>VirtualWire</i>
Capteurs	température, luminosité	idem + pression, accélération, compas, gyro	température, luminosité	
Usage	WSN, IoT		IoT avec <i>ranging</i> , localisation en intérieur	Communication très bas débit sur médiums non conventionnels
Disponibilité	DIY	snootlab.com	DIY (<i>Do It Yourself</i> , à assembler soi-même)	

La Figure 2 représente ces *WiNos* : *WiNoRF22* (a), *TeensyWiNo* (b) et *DecaWiNo* (c). Les *WiNos* sont intégrés dans l'écosystème *Arduino*, ce qui permet au chercheur et au développeur d'intégrer facilement des briques matérielles et/ou logicielles (capteurs et actionneurs, algorithmes avancés de traitement, dispositifs d'interaction...) et prototyper des solutions très complètes sur le plan applicatif, permettant d'aller jusqu'à des tests d'usage.

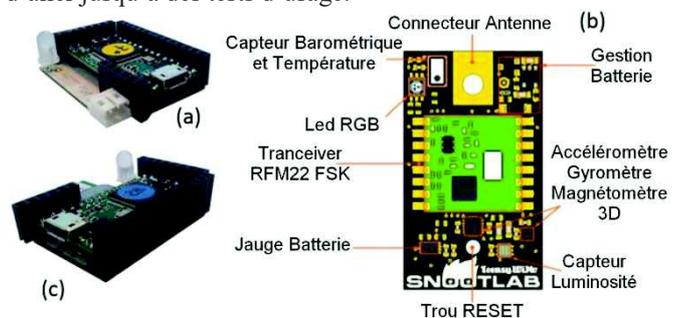


Figure 2. Les nœuds *WiNos*

B. Implémentation de TWR et SDS-TWR et comparaison

Dans un premier temps et afin de disposer de caractéristiques temporelles exactes, nous avons réalisé une métrologie comparative entre TWR et SDS-TWR sur notre réseau prototype. Cette opération préliminaire a pour but de valider les implémentations des briques matérielles et logicielles, mais aussi de diffuser et partager les résultats bruts issus de notre *testbed* avec la communauté scientifique, pour élaborer un modèle par exemple. Les conditions d'expérimentation sont les suivantes : nous considérons des portées maximales de 5 mètres, avec un pas de 0,5 mètre

(Figure 3). Le protocole de mesure est le suivant : une nouvelle session de *ranging* commence toutes les 200 ms et est exécutée sur 30 s environ. 150 mesures sont obtenues sur chaque distance. Les mesures ont été effectuées grâce à un positionnement des nœuds placés à 15 cm d'un rail en aluminium. Il a été vérifié que la présence du rail n'influence pas la qualité du *ranging*. Dans cette première série de mesures, nous ne considérons que des échanges à vue, sans obstacle (LOS).

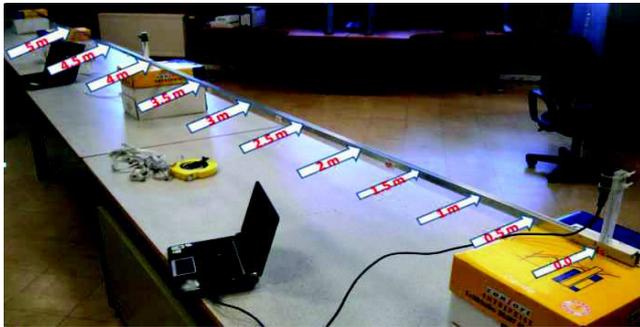


Figure 3. Contexte de test de la mesure de distance avec les protocoles TWR et SDS-TWR.

1) Ranging par TWR

Les données de *ranging* obtenus par l'usage du protocole TWR sont disponibles dans le Tableau. 2 et représentés par la Figure 4. Comme on peut le constater, la distance mesurée en TWR est très proche de la distance réelle : l'erreur absolue est limitée (15cm) et l'écart type est faible. La reproductibilité est satisfaisante. De plus, les résultats obtenus convergent avec les performances annoncées par le constructeur du *transceiver*, qui annonce une précision d'une dizaine de centimètres dans des conditions idéales.

Tableau. 2. Récapitulatif des erreurs TWR (en mètre)

Distance réelle	Dist. par TWR	Erreur moyenne TWR	Erreur max TWR	Erreur min TWR	Ecart type TWR
0,5	0,339	-0,1603	-0,11	-0,24	0,029745754
1	0,881	-0,1181	-0,05	-0,17	0,02427616
1,5	1,417	-0,0827	-0,03	-0,14	0,023683855
2	1,993	-0,0062	0,05	-0,06	0,024150096
2,5	2,480	-0,0191	0,03	-0,07	0,017567371
3	3,004	0,0007	0,05	-0,05	0,020534857
3,5	3,481	-0,0184	0,03	-0,07	0,022417601
4	4,018	0,0189	0,09	-0,03	0,018219147
4,5	4,549	0,049	0,11	-0,01	0,022705496
5	5,046	0,0469	0,08	0	0,016043844

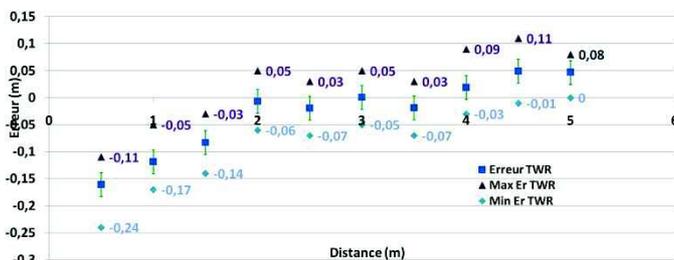


Figure 4. Représentation de l'erreur TWR en fonction de la distance

Cette étape nous permet de conclure positivement quant à la bonne implémentation du protocole TWR dans notre environnement.

2) Ranging par SDS-TWR

Les données de *ranging* obtenues par l'usage du protocole SDS-TWR sont disponibles dans le Tableau. 3 et représentés par la Figure 5. Les conditions d'expérimentation sont les mêmes que celles présentées précédemment avec le protocole TWR. Nous faisons le même constat, la distance mesurée par SDS-TWR est très proche de la distance réelle, ce qui confirme la ici aussi, la bonne implémentation du protocole dans notre environnement.

Tableau. 3. Récapitulatif des erreurs SDS-TWR (en mètre)

Distance réelle	Dist. par SDS_TWR	Erreur moyenne SDS_TWR	Erreur max SDS_TWR	Erreur min SDS_TWR	Ecart type SDS_TWR
0,5	0,4	-0,0991	-0,05	-0,15	0,02623868
1	0,942	-0,0573	-0,02	-0,09	0,01638611
1,5	1,482	-0,01721	0,03	-0,07	0,02390231
2	2,061	0,0611	0,11	0,01	0,02122458
2,5	2,546	0,046	0,08	0,01	0,01724975
3	3,067	0,0676	0,11	0,03	0,02023639
3,5	3,546	0,0467	0,1	0,01	0,04676275
4	4,084	0,0849	0,12	0,05	0,01406543
4,5	4,609	0,109	0,16	0,06	0,02155754
5	5,107	0,107	0,15	0,07	0,01559689

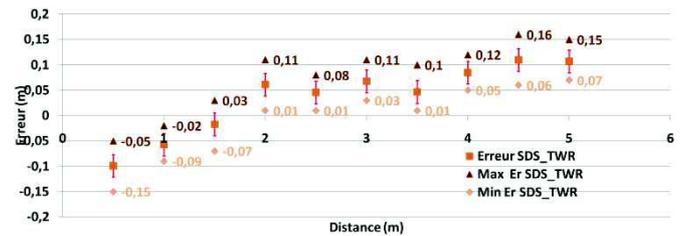


Figure 5. Représentation de l'erreur SDS-TWR en fonction de la distance

C. Discussion

Les erreurs observées, autant sur TWR que SDS-TWR, ne dépassent pas 15 cm, l'écart type est faible (~ 0.2) et les mesures sont reproductibles : il ne semble pas nécessaire d'effectuer une centaine de mesures par point pour atteindre une meilleure précision, ce qui constitue un premier résultat intéressant pour notre étude : si la variabilité des mesures avait été forte, il aurait fallu prévoir de nombreuses sessions de *ranging* pour parvenir à un résultat stable, ce qui aurait eu pour conséquence d'augmenter très fortement l'*overhead* du protocole de *ranging* encapsulé dans le trafic classique du réseau. Dans la suite de nos travaux, nous nous autoriserons donc à réduire le nombre de mesures.

De façon comparative, nous constatons qu'il n'y a pas de grandes différences en termes d'erreur, entre TWR et SDS-TWR. Alors que le but de SDS-TWR est de réduire l'erreur du TWR lié aux différences d'horloge, nous constatons ici que, dans le cas de notre expérimentation, les résultats obtenus sont très semblables, comme on peut le voir sur la Figure 6. Il semblerait plutôt que l'écart provienne d'un simple *offset* qu'il

conviendrait de corriger par calibration, ou mieux, par une méthode dynamique. On constate également que, dans un cas comme dans l'autre, les faibles distances soient impactées par une erreur négative, alors que les distances plus élevées le soient par une erreur positive. Là encore, une calibration serait possible.

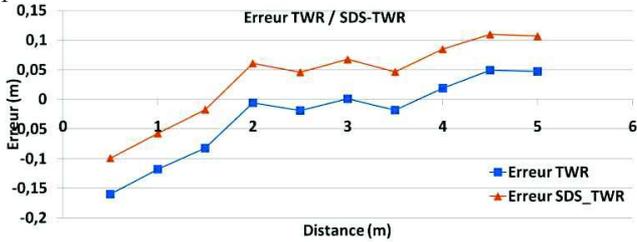


Figure 6. Représentation de l'erreur SDS-TWR / TWR en fonction de la distance

Cette phase préliminaire montre donc que l'approche asymétrique de TWR présente des résultats tout à fait satisfaisants et peut être retenue comme candidat dans la suite de nos travaux, pour étudier son incorporation dans le trafic usuel du réseau.

V. PRECISION DU TWR EN CONDITION DE RETARD INTRODUIT DANS LES ECHANGES

L'objectif de cette partie consiste à évaluer l'impact, sur la précision du *ranging*, d'un délai artificiellement introduit entre les messages *START* et *ACK* dans TWR (Figure 7). En effet, lorsque les messages de *ranging* seront encapsulés dans le trafic usuel du réseau, d'inévitables retards seront introduits, notamment par la méthode d'accès au médium. Nous cherchons donc ici à évaluer les conséquences, sur la précision, d'un délai introduit dans TWR.

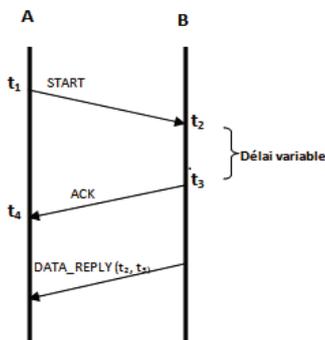


Figure 7. Session protocolaire de *ranging* TWR avec un délai entre la réception du *START* et l'émission de l'*ACK*

Afin de nous rapprocher des conditions d'une communication réelle, nous avons introduit un délai artificiel entre t_2 et t_3 du côté du nœud B et retardé le *timeout* du nœud A. Plus le temps entre t_2 et t_3 est long, plus la session de *ranging* s'étale sur une période longue, donc plus la différence d'horloge entre les deux nœuds A et B prend de l'ampleur, et impacte donc la précision de la mesure.

Une nouvelle expérimentation a été réalisée sur 11 positions espacées régulièrement de 0,5 mètre entre les nœuds A et B (de 0,5 m à 5,5 m). Pour chaque point, nous fixons un délai de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 16 et 21 ms. 30 mesures sont réalisées pour chaque valeur de délai, soit 240 mesures

par position. Une session de *ranging* débute toutes les 200 ms. Pour chaque position, le calcul de l'erreur par mesure est effectué. Les cas 2 m et 3 m ont été représentés à titre d'exemple en figures 8 et 9.

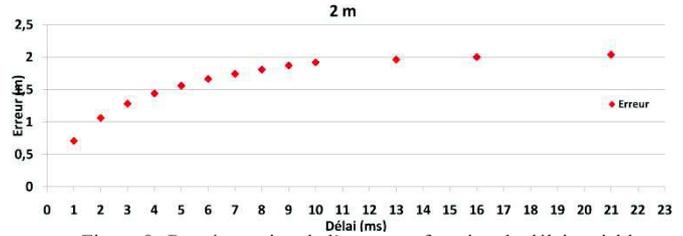


Figure 8. Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 2 m (TWR)

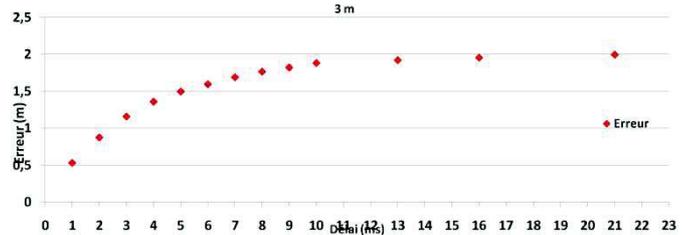


Figure 9. Représentation de l'erreur en fonction du délai variable sur une distance de 3 m (TWR)

Nous pouvons observer l'impact de ce délai variable sur la précision du *ranging* : les performances se détériorent avec l'augmentation du délai. En effet, les horloges des nœuds reposent sur des quartz qui sont, par définition, différents d'un nœud à l'autre. De plus, la fréquence de résonance d'un quartz étant particulièrement influencée par la température à laquelle le composant est soumis, nous avons porté une attention toute particulière à ce paramètre physique mesuré à l'aide d'un thermomètre laser (Figure 10) pendant l'expérimentation. La réception est l'état du *transceiver* qui demande le plus de courant [25], ce qui provoque une augmentation de la température du *transceiver*. Avec des valeurs importantes de délai, le nœud A reste plus longtemps en écoute, ce qui aggrave encore la différence des horloges. S'il est bien entendu possible de réduire le temps passé en réception, nous avons considéré ici un cas général où le nœud peut être amené à passer du temps en réception, en dépit des conséquences sur les performances du *ranging*. Cette contrainte doit être intégrée.

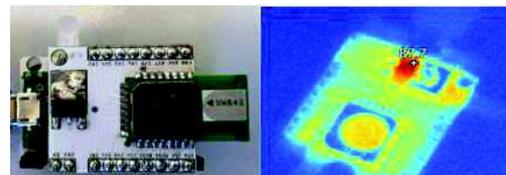


Figure 10. Nœud DW1000 : image dans le visible et l'infrarouge

L'expérimentation montre que la problématique est bien réelle. En augmentant le délai dans le protocole TWR, les performances du *ranging* se dégradent. Quelles qu'en soient les raisons (qualité des quartz, influence de la température, etc.), cette imprécision doit être corrigée.

VI. CORRECTION DE L'IMPRECISION INDUITE

Afin de compenser l'imprécision induite par l'augmentation des délais dans TWR, nous proposons ici une méthode de correction basée sur la mesure de la dérive des horloges des nœuds du réseau.

A. Principe de la correction

Supposons un nœud A initiateur de l'échange TWR, et un nœud B destinataire de A. L'équation du temps de vol en TWR a été présentée en équation 1. En réalité, t_4-t_1 et t_3-t_2 sont des durées caractérisées par des horloges différentes, cadencées à des fréquences f_A et f_B . t_4-t_1 est la durée mesurée par le nœud A à une fréquence f_A alors que t_3-t_2 est la durée mesurée par le nœud B à une fréquence f_B . Dans l'hypothèse où $f_B = f_A$, l'estimation du *ToF* est correcte. Cependant, dans la réalité, les horloges ne seront pas cadencées à la même vitesse. Cherchons à exprimer la durée t_4-t_1 et la durée t_3-t_2 en faisant l'hypothèse que les fréquences f_A et f_B ne sont pas exactement les mêmes ; soit k le coefficient différenciant ces deux horloges, alors :

$$k = \frac{f_B}{f_A}, \text{ où } k \cong 1.$$

La formule générale du temps de vol devient donc :

$$\text{Equation 3. } \text{tof}' = \frac{t_4 - t_1 - k(t_3 - t_2)}{2}$$

Ceci permet de compenser l'erreur introduite par la dérive des deux horloges, notamment lorsque, protocolairement, le délai entre t_2 et t_3 est important.

Le DW1000 utilisé sur notre *testbed* offre une fonctionnalité intitulée *ClockOffset* permettant, par analyse de l'asservissement d'horloge (PLL) que le récepteur a dû réaliser pour décoder la trame, d'évaluer la différence de fréquence entre l'horloge du nœud qui vient d'émettre cette trame et sa propre horloge de réception. Dans la littérature, notamment dans le domaine de la synchronisation, on désigne plutôt cette différence d'horloge par le terme « *skew* ». Cette différence d'horloge est exprimée en partie par millions (ppm, 10^{-6}). La couche Physique met donc à disposition des couches supérieures cette information qui se révèle très intéressante dans notre cas. La récupération de cette information a été implémentée dans la librairie *Decaduino*, ainsi que la correction proposée, qui devient :

$$\text{Equation 4. } \text{tof}' = \frac{t_4 - t_1 - (1 + \text{ClockOffset} * 10^{-6})(t_3 - t_2)}{2}$$

La correction est appliquée par le nœud A, sur évaluation de la différence de la fréquence de l'autre nœud (f_B) par rapport à la sienne (f_A). Cette proposition permet aussi bien de corriger les erreurs des dérives liées aux variations de températures que celles induites par les délais entre les messages.

B. Evaluation

Dans cette dernière série de mesures, le *ClockOffset* est exploité pour corriger le *ranging*. L'expérimentation se déroule dans les mêmes conditions que précédemment. Les figures suivantes montrent l'erreur absolue avant correction (en rouge) et après correction (en vert), en fonction du délai introduit dans TWR, pour deux distances (2 mètres et 3 mètres). Le Tableau. 4 résume l'ensemble des résultats obtenus.

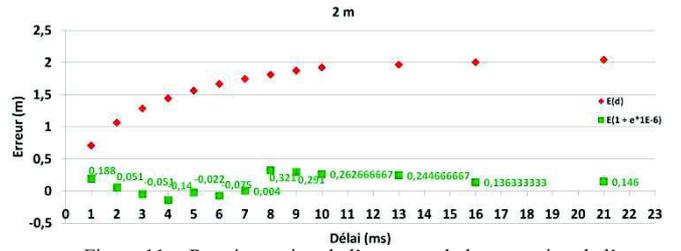


Figure 11. Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur 2m.

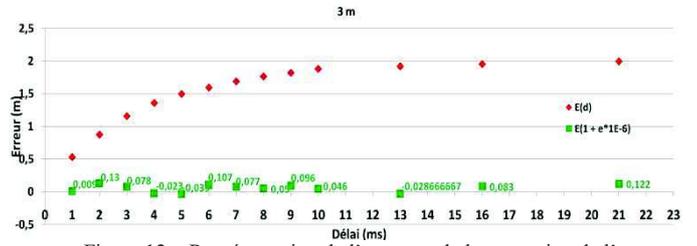


Figure 12. Représentation de l'erreur et de la correction de l'erreur en fonction du délai sur 3m

Tableau. 4. Tableau récapitulatifs des distances corrigées

Distance Délai	0,5 m	1,5 m	2,5 m	3,5 m	4,5 m	5,5 m
1 ms	-0,26	0,06	0,15	0,06	0,24	0,23
2 ms	-0,32	-0,04	-0,01	0,04	0,21	0,31
3 ms	-0,29	-0,07	0,05	0,00	0,24	0,27
4 ms	-0,37	-0,02	0,17	0,02	0,22	0,38
5 ms	-0,17	-0,09	0,05	-0,10	0,36	0,17
6 ms	-0,30	-0,12	0,11	0,11	0,34	0,23
7 ms	-0,27	-0,04	0,03	0,05	0,04	0,24
8 ms	-0,23	-0,12	0,19	0,05	0,16	-0,01
9 ms	-0,34	0,06	0,15	0,07	0,35	0,17
10 ms	-0,35	0,08	0,18	0,18	0,27	0,20
13 ms	-0,16	0,06	0,24	0,12	0,32	0,06
16 ms	-0,11	0,04	0,27	0,18	0,38	-0,02
21 ms	-0,17	0,20	0,19	0,22	0,35	0,28

On peut donc noter que l'erreur de *ranging* a donc considérablement diminué grâce à la correction, y compris pour des délais allant jusqu'à 70 ms (non affichés sur le tableau faute de place) : l'erreur est toujours inférieure à 20 cm, ce qui nous ramène aux valeurs initialement observées avec les protocoles TWR et SDS-TWR contraints temporellement. La correction proposée ici permet d'atteindre les mêmes précisions, mais sans aucune contrainte temporelle. Nous avons donc conservé la performance en relâchant une des contraintes fondamentales. Cette relaxation va nous permettre d'inclure le trafic de *ranging* dans les trames de données, en répondant seulement aux contraintes fixées par les protocoles usuels.

VII. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons abordé les problématiques de bas niveau dans la thématique générale de la localisation de nœuds mobiles dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil et dans le réseau de collecte de l'Internet des Objets. Nous avons exposé le contexte de notre travail, justifié le choix de la technique du temps de vol par rapport au RSSI et introduit les différents protocoles de *ranging* rencontrés dans la littérature. Afin de proposer un service de localisation intégré au mieux dans l'empilement protocolaire, les protocoles de *ranging* peuvent être intégrés dans les échanges usuels (*data*, *ack*, *beacons*)

du réseau. Pour cela, ils doivent être tolérants aux délais, ce qui n'est pas le cas sur le plan théorique, à cause des dérives des horloges, comme cela a été introduit dans la section 3 et confirmé par des mesures sur un *testbed* réel dans la section 5. Pour parvenir à l'objectif fixé, nous avons introduit une correction originale et efficace de l'erreur de *ranging*, en nous basant sur la dérive des horloges. Nous avons proposé une implémentation de cette correction sur notre *testbed*, puis évalué cette correction de façon réelle et pragmatique. Les résultats obtenus sont bons et montrent qu'après correction, les messages de *ranging* peuvent être échangés sans aucune contrainte temporelle, avec une erreur d'une vingtaine de centimètres dans le pire des cas. De ce fait, le protocole de *ranging* va pouvoir être intégré dans les messages usuels du réseau.

À l'issue des résultats obtenus se distingue déjà l'orientation que nous donnons à notre travail. Plusieurs pistes sont en cours d'exploration, car, en effet, un protocole de *ranging* reposant sur l'utilisation indolore des *beacons* et des trames de données s'annonce réaliste et prometteuse. Dans un premier temps, une amélioration de TWR va être proposée pour permettre la localisation continue, en background, des plusieurs voisins à un saut, dans une topologie multi-saut, afin de parvenir à l'objectif final et disposer d'un système de localisation complet inclus dans l'empilement protocolaire, précis et économe en énergie. Une autre perspective consiste à améliorer le *ranging* dans des situations avec obstacles (NLOS) ; les transmissions par UWB sont connues pour être peu sensibles au multi-trajet, nous aurons l'occasion de confronter la théorie à la réalité, et si nécessaire, de proposer une amélioration de la correction présentée dans ce papier. Enfin, une dernière perspective concerne le *testbed* utilisé et son ouverture grâce à un accès public, axe qu'il serait intéressant de développer : le *testbed* comporte actuellement une dizaine de nœuds dont certains mobiles, placés sur rail. Il serait intéressant de pouvoir en partager l'accès à la communauté scientifique, dans la lignée des *testbeds* les plus connus.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Kumar, L. Reddy, S. Varma, "Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in wireless sensor networks", Fifth IEEE Conference on Wireless Communication and Sensor Networks, December, Allahabad, India, pp.1-4, 2009.
- [2] L. Gui, T. Val, A. Wei, R. Dalcé, "Improvement of Range-free Localization Technology by a Novel DV-hop Protocol in Wireless Sensor Networks", Ad Hoc Networks Journal, Elsevier, august 2014.
- [3] P. Kumar and L. Reddy, Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in Wireless Sensor Networks, Fifth IEEE Conference on Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN), Dec 2009.
- [4] R. Dalcé, A. van den Bossche, T. Val, "An experimental performance study of an original ranging protocol based on an IEEE 802.15.4a UWB testbed", ICUWB 2014 : 2014 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Paris, sept. 2014
- [5] D. Niculescu, B. Nath, "DV based Positioning in ad hoc networks", Journal of Telecommunication Systems, Vol. 22, No. 1, pp.267-280, 2003.
- [6] Yi Shang and Wheeler Ruml, Localization from mere connectivity, Proc. 4th ACM International Symposium on Mobile ad hoc networking & computing, 2003
- [7] T.C. Karalar and J. Rabaey, An RF ToF Based Ranging Implementation for Sensor Networks, IEEE International Conference on Communications, Vol 7, June 2006.
- [8] Xiuzhen Cheng and Thaeler A, TPS: a time-based positioning scheme for outdoor wireless sensor networks, IEEE INFOCOM, 2004.
- [9] D Niculescu and B Nath, DV based positioning in ad hoc networks. Telecommunication Systems, Springer, 2003.
- [10] Paweł Kułakowski, Javier Vales-Alonso, Esteban Egea-López, Wiesław Ludwin, Joan García-Haro. Angle-of-arrival localization based on antenna arrays for wireless sensor networks. Computers & Electrical Engineering, 36(6):1181-1186, 2010.
- [11] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), September 2011
- [12] Specific requirements 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, IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systems, août 2007.
- [13] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, Vol 37, no 6, november 2007
- [14] Gentile, C., "Distributed sensor location through linear programming with triangle inequality constraints," IEEE Conference on Communications, June 2006.
- [15] H. Kim, Double-Sided Two-Way Ranging Algorithm to reduce ranging time, IEEE Communication Letters, vol. 13, No. 7, july 2009
- [16] H. Kim, A Ranging Scheme for Asynchronous Location Positioning Systems, Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2009
- [17] D. Wang, R. Kannan, L. Wei, B. Tray, Time of Flight based Two Way Ranging for Real Time Locating Systems, Robotics Automation and Mechatronics (RAM), 2010
- [18] Mi-Kyun Oh, Jea-Young Kim, Hyong Soo Lee, Tra c-Reduced Precise Ranging Protocol for Asynchronous UWB Positioning Networks, IEEE Communications Letters, Vol. 14, No. 5, may 2010
- [19] Asif Iqbal Baba, Calibrating Time of Flight in Two Way Ranging, Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, 2011
- [20] Dang, T., Devic, C., Livolant, E., Van Den Bossche, A. and Val, T. (2008) OCARI: Optimization of Communication for Ad Hoc Reliable Industrial Networks. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Daejeon, 13-16 July 2008.
- [21] A. Tonneau, N. Mitton, J. Vandaele, A Survey on (mobile) wireless sensor network experimentation testbeds, Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2014
- [22] S. Keranidis, D. Giatsios, T. Korakis, I. Koutsopoulos, L. Tassioulas, T. Rakotoarivelo, M. Ott, T. Parmentelat, "Experimentation on end-to-end performance aware algorithms in the federated environment of the heterogeneous PlanetLab and NITOS testbeds", Computer Networks, 04/2014.
- [23] A. van den Bossche, T. Val, "WiNo : une plateforme d'émulation et de prototypage rapide pour l'ingénierie des protocoles en réseaux de capteurs sans fil", Journées francophones Mobilité et Ubiquité (UBIMOB 2013), Nancy, France, june 2013
- [24] <http://www.decawave.com>
- [25] <http://www.labfab.fr/portfolio/lora-fabia>