



## 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 : 15334

The contribution was presented at JNTC 2015 :  
<http://www.jnct2015.lcis.fr/>

**To cite this version** : Fofana, Nezo Ibrahim and Van den Bossche, Adrien and Val, Thierry *Un banc de mesure de ranging pour la localisation par ToF de noeuds UWB pour les Réseaux de Capteurs Sans Fil et l'Internet des Objets*. (2015) In: 5emes Journées Nationales des Communications Terrestres (JNCT 2015), 4 June 2015 - 5 June 2015 (Valence, France). (Unpublished)

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

# 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

Ibrahim Nezo Fofana, Adrien van den Bossche, Thierry Val

Université fédérale de Toulouse, UT2J, CNRS-IRIT-IRT

Toulouse-Blagnac, France

{nezo-ibrahim.fofana, vandenbo, thierry.val}@irit.fr

*Abstract*— Nous présentons dans cet article un banc de mesure utilisé pour l'évaluation de l'implémentation d'un protocole de ranging basé sur le temps de vol. Ce banc est dédié à la mesure de la distance entre des nœuds d'un réseau de capteurs en intérieur. Nous disposons de 10 nœuds qui effectuent des sessions de ranging par couple de deux dans des conditions en ligne de vue (LOS) et non-LOS (NLOS). Afin d'obtenir un ranging performant basé sur le temps de vol, nous avons exploité les propriétés de la couche physique UWB qui fournissent des précisions de l'ordre de la picoseconde sur les estampilles temporelles des émissions et réceptions de trames.

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

## I. INTRODUCTION

Le mécanisme d'évaluation de la distance entre des nœuds (*ranging*) est indispensable pour déterminer la position de ces derniers de façon précise. Pour réaliser cette opération de *ranging*, il est nécessaire de disposer d'un *testbed* permettant d'implémenter aisément les protocoles étudiés afin d'obtenir une évaluation de la distance entre les nœuds, performante par mesure de temps de vol, ce qui permettra par la suite de mettre en place des algorithmes et des protocoles de localisation des nœuds. Ce *testbed* devra donc supporter des solutions *range-based* utilisant la technique de localisation basée sur le ToF (*Time of Flight*). La technologie radio à très large étalement de spectre (*Ultra Wide Band* ou UWB) est la meilleure solution permettant d'offrir les outils physiques pour mesurer ce temps de vol, en permettant des estampilles temporelles des émissions et réceptions des trames, avec une très grande précision grâce à des *timers* rapides et précis, disponibles dans les

composants radio UWB. Ces derniers nous ont permis de développer notre plateforme de prototypage et de mesures réelles. Cet article présente le banc de mesure de *ranging* que nous avons conçu afin d'évaluer finement les caractéristiques et les performances d'évaluation de distances entre des couples de nœuds WiNo. Ces nœuds sont présents dans la plateforme OpenWiNo [1], une architecture matérielle et logicielle libre, disposant d'une couche physique IEEE 802.15.4a UWB, utilisée pour le prototypage rapide des protocoles dans les réseaux de capteurs sans fil et l'Internet des Objets.

Après avoir introduit les bancs de mesure rencontrés dans la littérature, nous présenterons notre contexte de mesures en détaillant le matériel utilisé, l'environnement de travail, de même que le protocole de communication utilisé pour les échanges et les mesures de temps de vol. Nous exposerons le protocole utilisé et détaillerons le traitement logiciel des mesures. Nous terminerons par une analyse des premiers résultats obtenus avant de conclure et présenter les perspectives de notre travail.

## II. ETAT DE L'ART DES BANC DE MESURE

Le souci d'obtenir des données fiables et reproductibles issues des réseaux de capteur a suscité le besoin de d'expérimentations dans des environnements de tests réels. Un intérêt particulier de la communauté scientifique a donc été porté sur la conception et la réalisation des bancs de mesure dédiées aux applications de réseaux de capteurs.

ORBIT [2] est un banc de test qui a été conçu en 2002 [3] par la *National Science Foundation* pour tester des réseaux sans fil à grande échelle. Il est composé de plusieurs centaines de nœuds doté d'une interface Ethernet facilitant sa programmation à distance dans un environnement isolé. Les dernières versions disposent de cartes électroniques USRP2 qui prennent en compte les dernières avancées des réseaux cognitifs et permettent des tests de développement aux couches MAC et physique. Dans la même gamme, on peut noter le banc de mesure *Senslab* [4], devenue *FIT/IoT-LAB* [5], dédiée à l'étude des réseaux 802.15.4. Face au concept d'environnement isolé de toute communication externe, les bancs de mesures ORBIT et *Senslab* ne sont pas soumis à d'importantes perturbations radio [6]. Pour corriger cela, les nœuds du banc de mesure ASSERT [7] sont connectés par des câbles coaxiaux et des atténuateurs intelligents utilisés pour simuler les effets du médium radio. ASSERT est utilisé pour gérer des réseaux de taille moyenne (une quarantaine de nœuds) mais a été conçu pour supporter plusieurs centaines de nœuds. Les bancs de mesure étudiés dans cet état de l'art reposent sur une couche physique IEEE 802.15.4-2006, très peu de *testbeds* exploitent les propriétés de la couche IEEE 802.15.4a UWB de plus en plus répandue dans les réseaux de capteurs sans fil. La plateforme OpenWiNo utilisée dans le cadre de cette étude permet d'exploiter ce mode de transmission.

### III. CONTEXTE

#### A. Rappel sur la couche physique IEEE 802.15.4a UWB

L'UWB a été intégré dans l'amendement 802.15.4a-2007 [8], qui a abouti à la norme IEEE 802.15.4-2011 [9] sur laquelle repose d'ailleurs les dernières versions de Zigbee et 6LoWPAN [10]. Les transmissions UWB permettent d'obtenir un *ranging* performant par mesure de temps de vol. Le bit RMARKER (*ranging marker*) situé dans l'entête de la couche physique UWB, permet de marquer de façon très précise un instant dans la trame UWB (*ranging frame* : RFRAME). Les nœuds sont capables de récupérer directement à la couche physique, avec une précision de l'ordre de la picoseconde, ces instants d'émission et de

réception des différentes trames nécessaire pour un calcul efficace du temps de vol.

#### B. Les protocoles de ranging

Dans cette section, nous allons faire un rapide rappel des principaux protocoles de *ranging* rencontrés dans la littérature.

##### 1) TWR (Two Way Ranging)

Ce protocole est le plus simple. Le nœud A (cf. Figure 2) initie l'échange l'émission d'un message START à destination du nœud B, ce dernier acquitte par le message ACK. Les différents *timestamps* sont connus après émission et réception des différentes trames et les quatre estampilles temporelles sont rassemblées par A après réception de la trame DATA\_REPLY contenant les estampilles  $t_2$  et  $t_3$  du nœud B permettant ainsi au nœud A de calculer le temps de vol grâce à l'Equation 1.

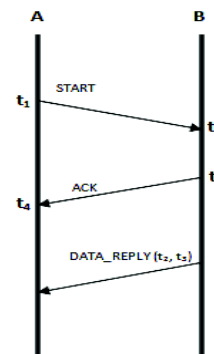


Figure 1. Session protocolaire de *ranging* en TWR

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

Si le protocole TWR est très simple de par son fonctionnement, il reste cependant très sensible aux problèmes de la dérive des horloges liée au fait que les horloges des nœuds A et B ne sont pas sur les mêmes quartz.

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

Le protocole SDS-TWR a été introduit dans [11] afin de réduire l'impact de cette imprécision. Un message supplémentaire est ajouté afin de symétriser le protocole TWR (Figure 2). Le temps de vol est calculé grâce à l'Equation 2:

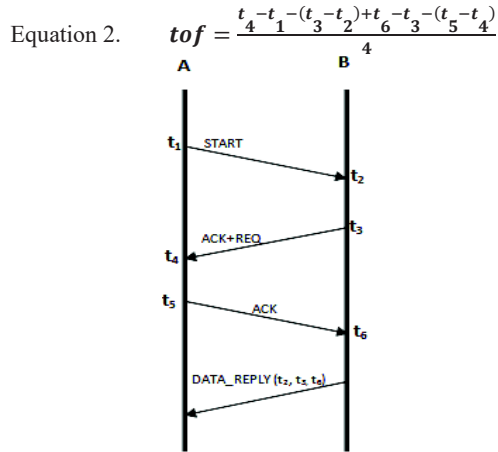


Figure 2. Session protocolaire de ranging en SDS-TWR

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

Le but de SDS-TWR-MA est de réduire le problème de dérive de l'horloge qui persiste encore un peu dans le protocole SDS-TWR. En effet, SDS-TWR reste sensible aux problèmes d'imprécision temporelle étant donné que la différence entre les deux horloges des deux nœuds varie dans le temps. Pour corriger cela, le protocole SDS-TWR-MA a été introduit dans [12] et étudié dans [13]. Plusieurs échantillon de ranging sont collectés et moyennés afin de réduire l'impact des perturbations aléatoires. Pour obtenir ces k estimations, cette solution a néanmoins l'inconvénient d'entraîner un grand nombre de messages dédiés.

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

Nous avons présenté les principaux différents protocoles rencontrés dans la littérature. A l'issue de cette étude, se précise le choix du protocole pour l'implémentation de notre travail. Le protocole TWR reste un protocole très simple de par son fonctionnement mais surtout du point de vue *Overhead*. Son implémentation est facile dans un *testbed*. La suite du travail présenté ici consistera à implémenter ce protocole dans notre plateforme matérielle et logicielle d'ingénierie des protocoles développée en interne au sein de notre équipe. La section suivante traitera de cette plateforme.

## IV. PRESENTATION DE LA PLATEFORME D'ÉVALUATION

### A. Architecture du nœud utilisé

Notre étude vise ici à travailler sur de vrais nœuds physiques, en exploitant avantageusement notre plateforme de prototypage rapide de protocoles *OpenWiNo* [14], contrairement à bons nombres de travaux qui se basent sur des hypothèses théoriques ou des simulations.

*OpenWiNo* est une plateforme de développement libre pour l'ingénierie des protocoles dédiés aux réseaux de capteurs sans fil (*Wireless Sensor Networks*, WSN) et les réseaux de collecte de l'Internet des Objets. Les nœuds de cette plateforme sont appelés des nœuds *WiNos* pour *Wireless Node*. Ils permettent le prototypage des nœuds, des protocoles étudiés et sont développés dans l'environnement *Arduino*. Pour notre étude, nous avons utilisé des nœuds *DecaWiNo*, qui sont des *WiNo* disposant du *transceiver* UWB DW1000 de *DecaWave* [15], compatibles IEEE 805.15.4a-2007.

### B. Description du banc de mesure

Le travail dans lequel évolue cette étude vise à étudier les performances de notre banc de test. Pour cela, nous avons implémenté le protocole TWR dans l'idée de comparer ses performances, en utilisant la couche physique radio UWB proposée par les *transceivers* *DecaWave*.

Ces mesures ont été effectuées dans un premier temps sur un rail métallique installé dans une salle (cf. Figure 3) avec deux nœuds (Nœud A et B) à 10 cm du rail. Nous avons effectué une campagne de mesure sur une portée de 5 mètres avec un pas de 0,5 mètres, dont 10 points de ranging. Après analyse et interprétation des données issues de cette session de ranging, nous avons obtenu des précisions de l'ordre de 15 cm. Afin de vérifier la reproductibilité de nos résultats et la performance de notre *testbed*, nous avons conçu un banc de mesure plus conséquent, et effectué de nouvelles campagnes de mesure avec dix nœuds fixes positionnés à environ 2 mètres du sol et écartés de 15 cm du mur (Figure 4). Les nœuds sont représentés sur le plan par leurs numéros (N1, N2...). Dans cette série de mesures, nous considérons des échanges à vue, sans obstacle (LOS) et avec obstacle (NLOS) comme l'illustre la Figure 5.

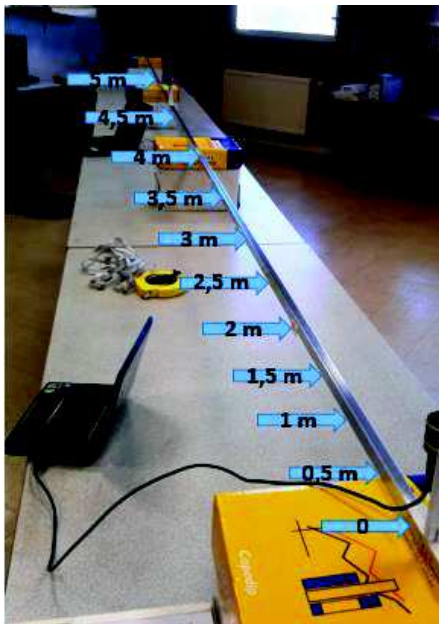


Figure 3. Ranging sur rail métallique



Figure 4. Nœuds DecaWave fixés au mur

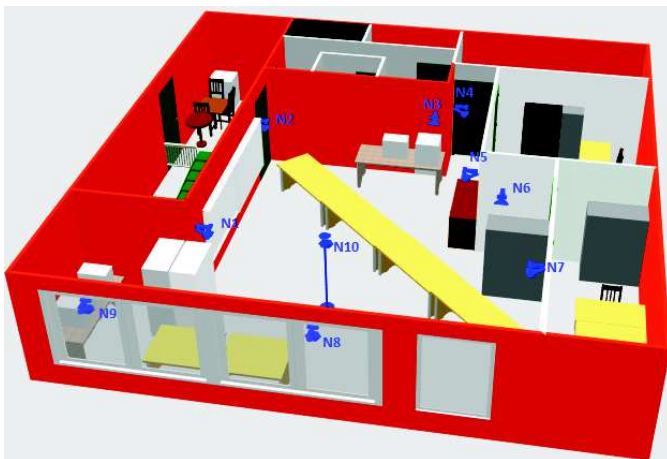


Figure 5. Plan de la salle

### C. Protocoles de mesure

Les échanges se font uniquement avec un couple de deux nœuds à un instant donné. Un nœud est

choisi à chaque session de *ranging* comme nœud B (récepteur de la trame START). Ce dernier effectue les échanges avec les 9 autres nœuds successifs (considérés comme nœud A initiateur de l'échange) puis B change de rôle, il devient par la suite initiateur de l'échange (nœud A). Nous disposons de suffisamment de nœuds pour avoir de nombreuses combinaisons (10 nœuds = 90 possibilités de *ranging* car tous les nœuds sont à portée radio les uns des autres). Le protocole de mesure est le suivant : une nouvelle session de *ranging* commence toutes les 200 ms et est exécutée sur 60 s environ. 250 mesures approximativement sont obtenues sur chaque distance entre deux nœuds.

### D. Traitement logiciel des mesures

Dans cette partie de notre travail, nous allons présenter le fonctionnement de notre protocole et le traitement des données obtenues.

#### 1) Fonctionnement des nœuds

Dans une session de *ranging*, chaque nœud est équipé d'un programme spécifique développé en langage C, implémentant les différents automates (Figure 6 et Figure 7). A l'état initial (INIT), le nœud A est en mode émission pour le début d'un nouveau cycle d'échange et le nœud B est en mode réception (RX\_ON). La session est initiée par le nœud A par l'émission de la trame START à destination du nœud B. Dès que ce message est envoyé, le nœud A se charge de relever et de mémoriser l'instant d'émission T1 (MEMORISE\_T1) de la trame START. A la réception de la trame START, le nœud B à son tour va relever et mémoriser l'instant de réception T2 (MEMORISE\_T2). Pendant ce temps, le nœud A se met en réception (RX\_ON\_FOR\_ACK) pour attendre l'acquittement (ACK) du nœud B. Une fois cet acquittement envoyé, le nœud B relève et mémorise l'instant d'émission de la trame (MEMORISE\_T3) puis attends un très court instant (1 ms environ) avant d'émettre le message DATA\_REPLY contenant les instants T2 et T3. A la réception du message ACK, le nœud A va relever et mémoriser (MEMORISE\_T4) son instant d'arrivée puis attendre le message DATA\_REPLY

(RX\_ON\_FOR\_DATA\_REPLY). A la réception de ce message, il va extraire les instants T2 et T3 et calculer le temps de vol (Equation 1).

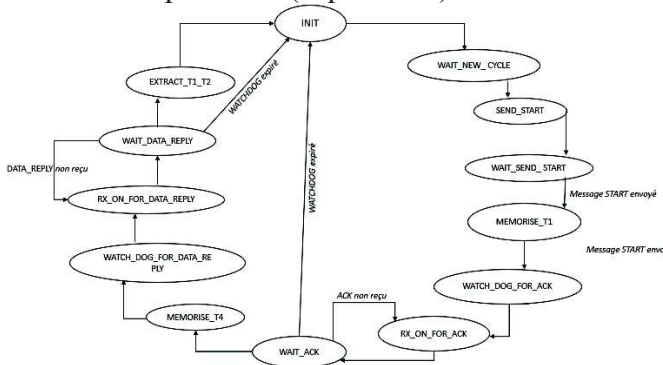


Figure 6. Automate de nœud A

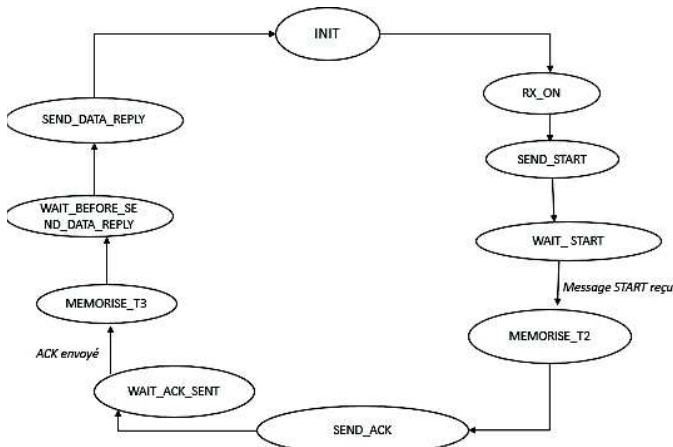


Figure 7. Automate du nœud B

## 2) Traitement des données obtenues

Pour réaliser cette série métrologique, nous avons utilisé les informations temporelles fournies par les nœuds pour le calcul du temps de vol. Nous avons par la suite appliqué la formule (Equation 3) pour obtenir la distance entre les nœuds.

$$\text{Equation 3. } D = c \times \text{tof}$$

D = Distance  
c = vitesse de propagation du signal dans l'air  
tof = temps de vol.

A chaque session de *ranging*, nous obtenons sur PC la distance mesurée par le protocole via l'interface série du nœud relié par USB. A partir de ces données de distance, nous estimons l'erreur de *ranging* en fonction de la distance réelle. Le chapitre suivant traitera des résultats obtenus.

## V. ANALYSE DES PREMIERS RESULTATS

Les données de *ranging* obtenues avec le protocole TWR implémenté dans notre *testbed* ont été récupérées et représentées sous forme de graphique. A titre d'exemple, nous présentons les résultats des nœuds 5 et 7 (0, Figure 8 et Tableau 2, Figure 9). Nous avons représenté l'erreur (en mètre) en fonction de la distance (en mètre).

Tableau 1. Récapitulatifs des erreurs du nœud 5

	Distance réelle	Distance mesurée	Erreur	Ecart type
N 1	5,74	5,88	0,14	0,02756743
N 2	5,39	5,16	-0,22	0,03210101
N 3	2,86	2,83	-0,02	0,02382971
N 4	3,24	3,17	-0,06	0,03773596
N 5	0,82	0,95	0,13	0,03577898
N 6	3,72	3,89	0,17	0,02896104
N 8	6,3	6,21	-0,08	0,02863243
N 9	7,92	7,93	0,01	0,04522626
N 10	3,56	3,77	0,21	0,06479784

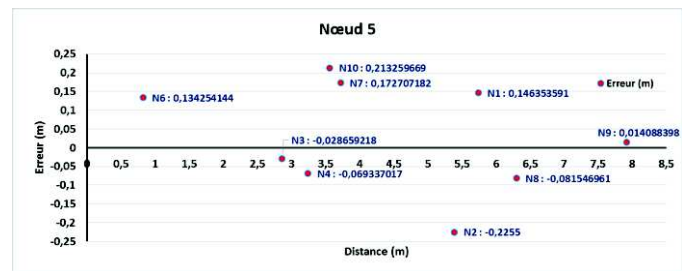


Figure 8. Représentation graphique des sessions de ranging effectuées par le nœud 5

Tableau 2. Récapitulatifs des erreurs du nœud 7

	Distance réelle	Distance mesurée	Erreur	Ecart type
N 1	6,62	6,56	-0,05	0,0323416
N 2	8,21	7,98	-0,22	0,03680545
N 3	6,58	6,72	0,14	0,03770635
N 4	6,95	6,83	-0,11	0,03902015
N 5	3,72	3,71	-0,00	0,04115483
N 6	3,29	3,50	0,21	0,1960087
N 8	5,09	4,91	-0,17	0,02906735
N 9	7,56	7,56	0,00	0,02725232
N 10	4,08	4,12	0,04	0,0362252

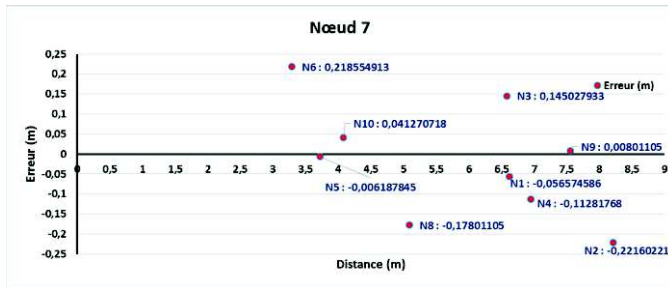


Figure 9. Représentation graphique des sessions de ranging effectuées par le nœud 7

Le constat que nous faisons est que la distance mesurée est relativement très proche de la distance réelle : nous avons des erreurs très proches de zéro. Le faible écart type observé est jugé satisfaisant pour la reproductibilité de nos mesures. Les performances obtenues avec notre *testbed* rejoignent celles annoncées par le constructeur du *DecaWave*, qui prédit une précision d'une dizaine de centimètres.

## VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de cet article était de présenter notre banc de mesure de *ranging* pour une localisation utilisant la technique du temps de vol sur des nœuds UWB. Pour cela, nous avons exposé le besoin de disposer d'un *ranging* performant nécessaire pour une localisation de façon très précise. Nous avons justifié le choix de la technologie de l'UWB et du protocole TWR après avoir introduit les différents protocoles de *ranging* rencontrés dans la littérature. Nous avons implémenté ce protocole TWR dans notre *testbed*. Le banc de mesure que nous avons construit a été détaillé. Les résultats issus de cet équipement sont prometteurs et montrent que le protocole TWR a été correctement implémenté dans notre plateforme et que les résultats sont reproductibles. De ce fait, notre protocole de *ranging* va pouvoir être intégré dans les messages usuels du réseau. Ceci est très encourageant pour la suite de notre travail. Notre objectif est de mettre en place un système de localisation d'intérieur performant. Cela revient dans d'un premier temps à améliorer notre protocole de localisation en situation LOS mais surtout NLOS. Nous travaillons également actuellement à la conception d'une couche MAC intégrant ce trafic de *ranging*.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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
- [2] D. Raychaudhuri, M. Ott, and I. Secker. Orbit radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols. In Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2005. Tridentcom 2005. First International Conference on, pages 308–309, 2005.
- [3] B. Braden, National Science Foundation (U.S.), National Science Foundation (U.S.). Directorate for Computer, Information Science, Engineering, National Science Foundation (U.S.). Advanced Networking Infrastructure, and Research Division. Report of NSF Workshop on Network Research Testbeds. Directorate for Computer and Information Science and Engineering (CISE), Advanced Networking Infrastructure & Research Division, 2002.
- [4] <http://www.labfab.fr/portfolio/lora-fabi>
- [5] A. Tonneau, N. Mitton, J. Vandaele, A Survey on (mobile) wireless sensor network experimentation testbeds, Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2014
- [6] Guillaume Kremer, Métrologie des réseaux sans-fil: A la frontière du signal et du numérique. Présentée et soutenue le 20 octobre 2014
- [7] Ehsan Nourbakhsh, Jeff Dix, Paul Johnson, Ryan Burchfield, S. Venkatesan, Neeraj Mittal, and Ravi Prakash. Assert: A wireless networking testbed. In Thomas Magedanz, Anastasius Gavras, NguyenHuu Thanh, and JeffryS. Chase, editors, Testbeds and Research Infrastructures. Development of Networks and Communities, volume 46 of Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, pages 209–218. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [8] 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.
- [9] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), September 2011
- [10] Nezo Ibrahim FOFANA. Etude des couches MAC dédiées à l'UWB, JNCT - Journées Nationales des Communications Terrestres 22-23 mai 2014, Toulouse-Blagnac
- [11] Gentile, C., "Distributed sensor location through linear programming with triangle inequality constraints," IEEE Conference on Communications, June 2006
- [12] H. Kim, Double-Sided Two-Way Ranging Algorithm to reduce ranging time, IEEE Communication Letters, vol. 13, No. 7, July 2009
- [13] H. Kim, A Ranging Scheme for Asynchronous Location Positioning Systems, Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2009
- [14] 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
- [15] <http://www.decawave.com>