



**HAL**  
open science

## LocURa4IoT : un testbed pour la localisation précise des noeuds dans l'IoT

Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val

### ► To cite this version:

Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val. LocURa4IoT : un testbed pour la localisation précise des noeuds dans l'IoT. CORES 2021 – 6ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, Université de La Rochelle, Sep 2021, La Rochelle, France. hal-03221021

**HAL Id: hal-03221021**

**<https://hal.science/hal-03221021>**

Submitted on 7 May 2021

**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.

# LocURa4IoT : un testbed pour la localisation précise des nœuds dans l'IoT

Adrien van den Bossche<sup>1</sup> et Réjane Dalcé<sup>2</sup> et Thierry Val<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, France

<sup>2</sup>Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, Institut National Universitaire Champollion, France

---

LocURa4IoT (*Localisation and UWB-Based Ranging Testbed for the Internet of Things*) est une plateforme *testbed* dédiée à l'étude et à l'analyse des performances des réseaux et protocoles de synchronisation fine et de *ranging*. Elle permet d'adresser la problématique de la localisation des objets connectés dans un environnement intérieur ou extérieur, dans des conditions réelles d'utilisation, grâce à plusieurs dizaines d'objets connectés reprogrammables à volonté. Reposant en premier lieu sur une couche physique *Ultra-Wide Band* et sur la mesure du temps de vol radio comme méthode de mesure de distance, elle permet d'atteindre des précisions centimétriques en environnement intérieur. Cet article présente la plateforme ainsi qu'un jeu de données ouvert et réutilisable librement par la communauté scientifique.

**Mots-clefs :** Ranging; Ultra-wide band; Indoor localisation; Testbed

---

## 1 Introduction

L'ingénierie des protocoles a récemment connu une évolution significative au sein de la communauté scientifique. Alors qu'il y a quelques années, les outils courants offerts aux ingénieurs et chercheurs désirant évaluer et valider leur nouveaux protocoles étaient principalement des méthodes formelles et des simulateurs de réseaux, il est maintenant de plus en plus courant d'utiliser les *testbeds*, ces plateformes d'évaluation des performances des protocoles. Parallèlement à cette tendance, de nouveaux usages ont vu le jour comme la localisation d'objets connectés en intérieur, tirant avantage de mesures de distances par temps de vol radio pour des performances optimales. Cet article vise à présenter LocURa4IoT, un testbed dédié à la localisation d'objets connectés exploitant des transmissions *Ultra-Wide Band* (UWB). Après une présentation des principales plateformes existantes, puis de nos objectifs visés, LocURa4IoT sera détaillé, aussi bien sur les aspects matériels que logiciels. Un jeu de données, publié et libre d'utilisation, sera également présenté.

## 2 Objectifs

En réponse à la nécessité d'évaluer sur du matériel réel les innombrables propositions de la littérature scientifique dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil et de la *Device Layer* de l'IoT, des testbeds de tailles variées ont fait leur apparition. Certains, comme FIT IoT-LAB [FIT], proposent un nombre élevé de nœuds sur lesquels faire tourner des expériences, grâce à une interface web de gestion de l'accès multi-utilisateur et de réservation de nœuds. D'autres initiatives placent l'utilisateur au cœur de la mise en œuvre de son testbed : dans le cas de WiSH-WalT [WAL], un ensemble d'outils logiciels sont proposés pour construire un banc d'essai à base de RaspberryPi. D'autres plateformes sortent carrément des bâtiments et s'apparentent à une solution de type *smartcity* : c'est le cas de CityLab [CIT] qui déploie des boîtiers sur les façades et les toits de la ville d'Antwerp en Belgique.

Ces différents testbeds répondent, à différentes échelles, aux besoins en réseaux, mais ont du mal à adresser la problématique de la localisation précise d'intérieur. C'est dans ce contexte qu'a été conçu et déployé le testbed LocURA4IoT dont l'objectif principal est d'évaluer les performances des protocoles de mesures de distance (*ranging*) entre des nœuds UWB par évaluation du temps de vol (*Time of Flight*, ToF) radio. Ce *ranging* est spécifié dans la norme IEEE-802.15.4 et se retrouve dans les solutions de *Real Time*

*Localisation Systems* (RTLS) proposées par les fabricants de composants UWB comme Decawave, dont les puces arrivent dans les smartphones de nouvelle génération. Les nœuds UWB doivent disposer de *timers* à 64 GHz pour estampiller avec suffisamment de précision les émissions et réceptions de trames. Plusieurs protocoles peuvent être utilisés, comme le très connu TWR (*Two-Way Ranging*) [JS02] impliquant deux nœuds, un nœud client TWR et un nœud serveur TWR, s'échangeant 3 messages. Opérationnel depuis 2016, LocURa4IoT a permis l'évaluation de plusieurs protocoles de *ranging* et de synchronisation fine tels que [Fa16], [Da18] et [VDBa18].

Dans le chapitre suivant, nous présenterons l'architecture et les particularités de ce testbed.

## 3 Présentation de la plateforme

### 3.1 Couche nœuds

La couche *nœuds* est un réseau de capteurs sans fil (WSN) utilisé pour les expériences. Chaque nœud de la plateforme repose sur une carte DecaWave DWM1001-DEV comportant un microcontrôleur Nordic nRF52832 (ARM Cortex-M4) incluant une radio BLE, un transceiver IEEE 802.15.4-UWB et un accéléromètre. Un transceiver LoRa/LoRaWAN HopeRF RFM95 et des capteurs I2C, notamment un capteur de pression atmosphérique, sont également ajoutés. Le nœud dispose ainsi d'une diversité de technologies sans fil permettant d'adresser la problématique de la localisation via différentes couches physiques et comparer les performances d'une technologie à l'autre. Enfin, un récepteur GNSS (D-GPS) local à chaque nœud vient compléter l'ensemble, là-aussi à des fins de comparaison de performances. Le GPS fournit également une synchronisation de référence via les tops 1PPS. Cette synchronisation, de l'ordre de la microseconde, peut être utilisée comme référence pour des protocoles MAC. Elle n'est en revanche pas assez précise pour être utilisée dans des protocoles de mesure de temps de vol sur de courtes distances. Le firmware exécuté par les nœuds n'est pas contraint par un OS particulier; l'utilisateur peut aussi bien mettre en œuvre un code basique en C/C++ dans une approche *bare-metal*, soit déployer un système ou un empilement protocolaire riche via un OS comme *FreeRTOS* ou *MyNewt*, qui sont les deux OS qui ont été testés jusqu'ici.

A ce jour, le testbed est formé de 64 nœuds répartis sur 3 plateaux. Sur l'ensemble des plateaux, la position des nœuds fixes est connue avec une précision meilleure que 2 cm, grâce à une mesure par télémètres laser lors de l'installation; la position réelle de chaque nœud, fixe ou mobile, est exploitable pour calculer une erreur de ranging/localisation. A la vue de la disposition des murs sur les différents plateaux, certaines liaisons radio sont NLOS (*Non Line-of-Sight*). Les plateaux (figure 1) sont les suivants :

- Plateau 1 : 50 nœuds déployés dans les bureaux, salles de manipulations et salles de réunion du laboratoire, sur une surface de 300 m<sup>2</sup> et sur un niveau. Les murs sont en briques de terre cuite ou cloisons sèches. Les nœuds y sont majoritairement déployés sur un plan horizontal situé à 2,65 m du sol et positionnés à l'aide d'une structure en PVC ou en aluminium, ou bien fixés très près du sol à une hauteur d'antenne de 3 cm. Deux rails horizontaux d'une longueur respective de 2 et 7 mètres permettent de déplacer deux nœuds mobiles : la position linéaire (à la précision millimétrique), la vitesse et l'accélération des mobiles peuvent être contrôlées à partir des scénarios d'expérimentation. Lorsque le chercheur est sur place, il bénéficie de plusieurs dispositifs de visualisation des résultats en temps-réel (vidéo-projecteur et casque de réalité virtuelle). De nuit, en l'absence d'activité humaine, ce premier plateau présente en outre de très bonnes propriétés de répétabilité, au niveau radio.
- Plateau 2 : 10 nœuds déployés dans l'appartement meublé de la *Maison Intelligente de Blagnac*, sur une surface de 70 m<sup>2</sup> et sur un niveau. Les nœuds sont disposés de façon très variée, généralement près de meubles ou d'objets (cafetière, télévision, etc.), permettant d'associer à tout nœud une *Description Sémantique de la Position*, en plus des coordonnées  $(x, y, z)$ , et sortir ainsi du cadre strict de la localisation par *n*-latération [IDE]. Ce plateau, très orienté « Usages », permet des collaborations avec des équipes de recherche et des industriels en dehors de la communauté des réseaux et protocoles.
- Plateau 3 : 4 nœuds déployés dans une chambre anéchoïque de 20 m<sup>2</sup> dans les locaux du laboratoire.

### 3.2 Couche contrôleurs

Comme c'est généralement le cas sur les testbeds, les expériences sont gérées par un serveur central qui exécute un scénario, en fonction de l'objectif visé. Ici, le scénario d'expérimentation (flashage, démarrage

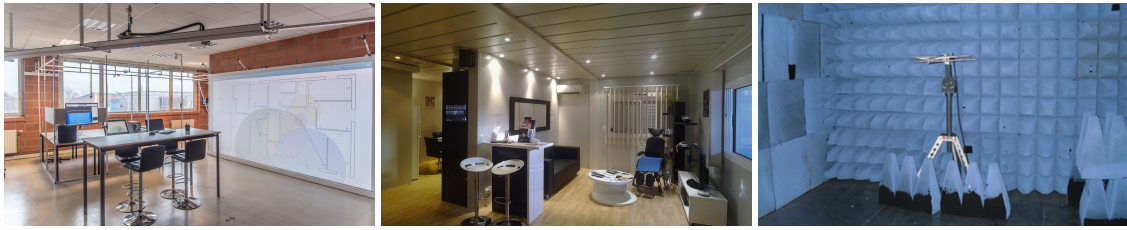


FIGURE 1: Visuels des différents plateaux P1 (gauche), P2 (milieu) et P3 (droite)

et contrôle des nœuds, mouvements des mobiles via les rails, etc.) est décrit par un script Python, permettant une mise en œuvre simple d'itérations. Les nœuds sont gérés par une quarantaine de contrôleurs basés sur des Raspberry-Pi reliés par un réseau filaire. Les contrôleurs fournissent à la fois des services de reprogrammation et de capture de la console série des nœuds. Les messages console en sortie des nœuds sont estampillés par le contrôleur, lui-même synchronisé via le protocole PTP/Ethernet. Bien entendu, à la dizaine de microsecondes, PTP n'est pas adapté aux opérations de ranging UWB : les opérations de *ranging* sont estampillées directement à la couche physique du nœud UWB, grâce au *timer* 64GHz intégré. Cependant, les horodatages PTP permettent de fusionner les logs issus des nœuds sans rompre l'intégrité temporelle de la séquence des messages. Les logs sont ensuite remontés via un bus MQTT, avec une organisation en *topic* permettant une exploitation simple des données, y compris en direct, pendant l'expérience.

Quelques exemples de *topics* sont donnés ci-après :

- `testbed/node/173/in` : entrée console du nœud 173
- `testbed/node/156/out` : sortie console du nœud 156
- `testbed/rail/1/course/request` : consigne pour déplacer le rail n°1 (en mètre)
- `testbed/rail/1/course/indication` : valeur actuelle de la course du rail n°1

### 3.3 Couche données et algorithmes

Une autre originalité du testbed porte sur l'exploitation des données issues des nœuds. Grâce au bus MQTT qui transporte l'ensemble des données issues ou à destination des consoles des nœuds, il est très simple de développer des agents logiciels permettant de traiter les données ou d'interagir avec les nœuds pendant l'expérience. Par exemple, de part la connaissance de la position de chaque nœud fixe par installation et de chaque mobile via la position instantanée des rails, un agent recherche en permanence des données de *rangings* sur les sorties de consoles pour calculer l'*erreur de ranging*, paramètre de performance clé dans ce type d'études. Si les messages, en sortie des consoles, sont conformes à un certain format, l'agent sera en mesure de procéder et publiera à son tour, dans le *topic* MQTT `ranging/#`, l'erreur de *ranging* quelle qu'en soit la source : la couche physique (UWB, BLE...), le protocole (TWR, SDS-TWR...), etc. De même, il est possible d'implémenter des algorithmes de *n*-latération pour calculer à la volée des positions de mobiles en fonction des positions connues (nœuds ancrés) et des *rangings*, ou bien encore des agents permettant la représentation des données sur des cartes (figure 2).

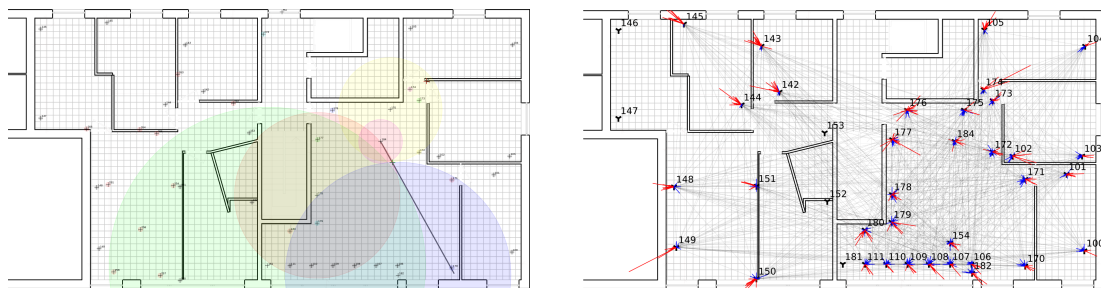


FIGURE 2: Exemple d'interfaces d'exploitation des données instantanées : rangings sous forme de cercles, 1 mobile et 5 ancrés (gauche) et liens et erreurs de *ranging* entre 34 nœuds (droite)

## 4 Un jeu de données

Afin d’illustrer les capacités du testbed présenté dans cet article et avant son ouverture prochaine pour une utilisation publique, un jeu de données ouvert et sa notice sont mis à la disposition de la communauté scientifique [DAT]. Ce jeu de données, sous licence ODBL, est librement utilisable par le lecteur.

Le scénario mis en œuvre implique 10 nœuds : 9 ancrés et 1 mobile. Le mobile, via le rail, se déplace sur une course de 6.5m à une vitesse de 9mm/s. La durée de l’expérience est de 12 minutes pendant lesquelles près de 5300 *rangings* ont été réalisés avec succès. Tous les liens sont en ligne de vue (LOS) : il n’y a pas d’obstacle durant toute l’expérience. Le mobile exécute le protocole TWR classique en interrogeant successivement chaque ancre toutes les 500ms (*ranging* à 2Hz). Pour plus de détails sur le scénario et les paramètres (couche physique, etc.), le lecteur peut se référer à la notice accompagnant le jeu de données.

Le jeu de données se présente sous la forme d’une suite de données JSON où chaque échantillon est la sortie d’un *ranging* enrichi par les agents du testbed. Pour chaque *ranging*, les informations sont :

- les adresses des nœuds impliqués dans le *ranging* et leur position réelle en 3D,
- les données du protocole TWR : numéro de séquence, estampilles  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  et  $t_4$ , dérive des horloges et temps de vol avec et sans correction,
- des données environnementales non exploitées à ce jour : température des nœuds client et serveur,
- la distance réelle et l’erreur de *ranging* calculée.

Les données présentées permettent notamment de constater l’impact de la dérive des horloges, principal défaut du protocole TWR, et le bénéfice apporté par une correction [Da18]. En outre, ce jeu de données peut permettre de nombreuses études comme le développement et la confrontation d’algorithmes de localisation basés sur la  $n$ -latération (avec  $n \leq 9$ ) et l’évaluation de leur précision (puisque toutes les positions réelles sont connues) ou bien encore d’autres corrections de *ranging* basés sur la température des nœuds, etc.

## 5 Conclusion et perspectives

Cet article a présenté LocURa4IoT, un testbed dédié à l’étude des performances de protocoles de *ranging* et de localisation précise des nœuds de l’IoT. Un jeu de données ouvert, associé à une notice, accompagne cet article pour permettre au lecteur d’apprécier la puissance de la plateforme, mais aussi d’en exploiter des résultats en attendant son ouverture prochaine à la communauté scientifique.

Outre cette dernière, les prochaines étapes concernent l’étude du passage à l’échelle des protocoles de *ranging* et de localisation des nœuds, la prise en compte de la non-ligne de vue des liens UWB, l’angle d’arrivée ainsi que la confrontation des performances obtenues en UWB à d’autres couches physiques populaires dans l’IoT, comme LoRa et BLE, dont chaque nœud du testbed est équipé.

## Références

- [CIT] <https://www.fed4fire.eu/testbeds/citylab/>.
- [Da18] F. Despaux and al. N-TWR : An Accurate Time-of-flight-based N-ary Ranging Protocol for Ultra-Wide Band. *Ad Hoc Networks Journal*, 79, 2018.
- [DAT] <http://locura4iot.irit.fr/experiments/20210131-twr/>.
- [Fa16] Nezo Ibrahim Fofana and al. An original correction method for indoor ultra wide band ranging-based localisation system. In *Ad-hoc Now 2016*, pages 79–92, 2016.
- [FIT] <https://fit-equipex.fr/testbeds>.
- [IDE] <https://www.irit.fr/~Adrien.Van-Den-Bossche/media/idealil-demo.mp4>.
- [JS02] Joon-Yong Lee and R. A. Scholtz. Ranging in a dense multipath environment using an uwb radio link. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(9) :1677–1683, 2002.
- [VDBa18] A. Van Den Bossche and al. LocURa : A New Localisation and UWB-Based Ranging Testbed for the Internet of Things. In *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2018)*, septembre 2018.
- [WAL] <https://walt-project.liglab.fr>.