



HAL
open science

LocURa4IoT - Localisation and Ultra-Wide Band Ranging for the IoT - Rapport d'activité scientifique 2016-2021

Adrien van den Bossche, Quentin Vey, Réjane Dalcé, Thierry Val

► **To cite this version:**

Adrien van den Bossche, Quentin Vey, Réjane Dalcé, Thierry Val. LocURa4IoT - Localisation and Ultra-Wide Band Ranging for the IoT - Rapport d'activité scientifique 2016-2021. IRIT - Institut de Recherche en Informatique de Toulouse. 2022. hal-03844132

HAL Id: hal-03844132

<https://hal.science/hal-03844132>

Submitted on 8 Nov 2022

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 - Localisation and Ultra-Wide Band Ranging for the IoT

Rapport d'activité scientifique 2016-2021

GEOLOCATING CONNECTED DEVICES

Adrien Van Den Bossche, Quentin Vey, Réjane Dalcé, Thierry Val

13 juillet 2022



UNIVERSITÉ TOULOUSE
Jean Jaurès



BLAGNAC

Table des matières

1	Introduction	4
2	Objectifs	5
2.1	Mais c'est quoi, un « testbed » ?	5
2.2	État de l'art	5
2.3	Besoins	7
2.4	Enjeux scientifiques adressés par la plateforme	8
3	Description de LocURa4IoT	10
3.1	Description de l'infrastructure testbed	10
3.1.1	Couche nœuds	10
3.1.2	Couche contrôleurs	11
3.1.3	Couche données et algorithmes	11
3.2	Déploiements sur plusieurs plateaux	12
3.2.1	Plateau 1	12
3.2.2	Plateau 2	12
3.2.3	Plateau 3	13
3.3	Briques matérielles et logicielles développées	13
3.3.1	Contributions matérielles	13
3.3.2	Contributions logicielles	15
4	Utilisation du testbed	17
4.1	Surveillance du réseau de supervision	17
4.2	Exemples de résultats	17
4.2.1	Calibration des délais d'antenne	18
4.2.2	Recherche d'une configuration radio optimale	19
4.2.3	Impact du NLOS et compensation de la puissance de réception	21
4.3	Projets de recherche ayant utilisé la plateforme	23
4.3.1	POUCET	23
4.3.2	PRAPEN	25
4.3.3	IDEALI1-DSP	25
5	Structuration de la plateforme	27
5.1	Éléments de chronologie	27
5.2	Pilotage de la plateforme	28
5.3	Aspects financiers	28
5.3.1	Équipements	28
5.3.2	Origine des fonds	29
5.4	Soutien par les tutelles	30
5.5	Ressources humaines	30
5.5.1	Ingénieurs	30
5.5.2	Thèses, HDR et post-doctorants ayant utilisé la plateforme	31
5.5.3	Stagiaires	31
6	Publications	32
6.1	Publications de présentation de la plateforme	32
6.2	Publications de résultats issus de la plateforme	32
6.2.1	Revue internationale	32
6.2.2	Conférences internationales	32
6.2.3	Conférences nationales	33
6.3	Diffusion et vulgarisation	33
7	Perspectives	34
7.1	Perspectives scientifiques	34
7.2	Perspectives de structuration	34

8 Références

36

1 | Introduction

Ce document détaille l'ensemble des activités menées sur la plateforme LocURa4IoT sur la période 2016-2021, soit les quatre premières années d'existence de la plateforme entre 2018 et 2021, précédées des deux années qui ont permis sa genèse.

2 | Objectifs

La plateforme LocURa4IoT est un testbed qui permet d'adresser la problématique de la localisation des objets connectés (noeuds sans-fil, capteurs, interfaces...) par les techniques de *ranging*, c'est-à-dire l'évaluation de la distance entre ces objets connectés. Si le temps de vol radio (ToF, *Time-of-Flight*) est principalement utilisé, d'autres techniques comme la différence de temps de vol, la différence de phase, l'angle d'arrivée, la puissance du signal reçu sont également utilisables sur la plateforme, qui peut notamment servir à comparer les approches.

La plateforme est également un outil d'expertise pour l'équipe de recherche porteuse, ainsi qu'un démonstrateur et un outil de transfert de technologies. Elle est également utilisable comme support pour l'enseignement et la vulgarisation scientifique.

2.1 | Mais c'est quoi, un « testbed » ?

Dans la communauté scientifique des Télécoms & Réseaux, un testbed [1] est un environnement composé « d'objets connectés » (capteurs, effecteurs, interfaces...) reprogrammables à l'infini et à distance, par le chercheur, afin d'automatiser les analyses de performances qu'il souhaite effectuer ; le chercheur crée un nouveau protocole réseau, le modélise, le simule puis, dans l'idéal et lorsque le protocole le permet, utilise un testbed pour compléter son étude par une analyse plus pragmatique que la simulation, car tenant compte du système réel et de son environnement. Les critères factuels de performances considérés sont généralement des métriques purement réseaux comme le débit, la latence, le taux de pertes de données acheminées, etc.

Concrètement, un testbed est un lieu où sont installés des dizaines d'objets connectés, généralement à l'état de prototypes (cartes électroniques nues) ; ces objets sont connectés à un réseau de supervision, nécessairement différent du réseau objet de l'étude, afin de ne pas corrompre les analyses de performances (exemple : si le réseau étudié est sans-fil, le réseau de supervision sera filaire). Un serveur pilote l'ensemble des objets connectés via le réseau de supervision en vue d'automatiser le déroulement de l'expérience. Il prend en charge des actions telles que :

1. la réservation de noeuds du testbed,
2. le déploiement d'un firmware sur les noeuds,
3. la génération de plusieurs minutes de données,
4. la collecte des données et analyse,
5. l'arrêt de l'exécution du firmware sur les noeuds,
6. la libération du testbed.

Cette séquence, exécutée automatiquement et à distance, peut être itérée plusieurs centaines de fois pour avoir suffisamment de données, rendant les résultats acceptables d'un point de vue statistique ; les critères de reproductibilité et de répétabilité sont des paramètres clés dans l'interprétation des résultats obtenus par les méthodologies testbed [2].

2.2 | État de l'art

Nous constatons, depuis quelques années, l'augmentation constante des besoins d'études et d'évaluations des performances de systèmes communicants complexes, utilisés pour des applications variées telles que la sécurité, la supervision, mais aussi les applications militaires, médicales et environnementales. Ceci a donné de l'importance à plusieurs outils pour la mise en œuvre des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) dédiés à l'IoT. Depuis quelques années, on commence à utiliser de plus en plus de RCSF qui surveillent nos villes et nos milieux de vie [3]. Avec l'avènement des nouvelles technologies, les RCSF sont associés à d'autres technologies émergentes, donnant naissance à de nouvelles architectures de communication telles que les réseaux pour véhicules, les réseaux dédiés à la surveillance de l'environnement, les réseaux de capteurs dédiés au suivi des personnes âgées ou en situation de handicap, en période de contamination, les réseaux de contrôle médical, l'Internet des Objets pour des applications industrielles (I-IoT) etc... Des versions d'évaluation de ces réseaux de capteurs et d'actionneurs, principalement basés sur des moyens de communication sans fil pour ce qui correspond au premier maillon de collecte de l'IoT (Device Layer-IoT), sont difficiles à déployer pour de nombreuses raisons. La complexité de l'environnement dans lequel le système fonctionne induit de nombreux problèmes pour les concepteurs [4]. La nécessité d'une étude d'adéquation entre les solutions théoriques et la réalité a motivé le développement de divers outils de test et de mise en œuvre pour ces nouveaux protocoles et ces nouveaux réseaux.

Pour cela, plusieurs outils sont utilisés par les communautés scientifiques, techniques et industrielles : les méthodes analytiques, les outils de simulation, l'émulation de réseau/nœuds capteurs, et plus récemment des plateformes de prototypage réelles ou testbeds. Ces dernières offrent des mesures réelles au prix d'une mise en œuvre plus lourde qu'un simple simulateur de réseau. Pour pallier à ces contraintes, des outils adaptés émergent, non seulement pour rendre l'utilisation du testbed plus accessible, mais aussi pour maîtriser le déploiement de ces réseaux et de leurs nœuds connectés, dans une recherche de reproductibilité des résultats, même en présence de conditions de propagation radio non maîtrisées mais subies, à l'inverse des simulateurs de réseau. Dans plusieurs laboratoires de recherche, des testbeds sont proposés pour diverses conditions et technologies. Ils se composent typiquement de nœuds capteurs déployés dans un environnement contrôlé et fournissent une plateforme complète pour expérimenter des petites mais aussi des grandes envergures de réseaux.

Table 2.1 – Etat de l'art

Testbed	OS	Technologies	Avantages et Limites
W-ilab.t		Wi-Fi Bluetooth ZigBee USRP	+ interface graphique + accessible via le portail EmuLab - Compétition de réservation - Demande d'autorisation à IMinds
TutorNet	TinyOS	IEEE 802.15.4	- site WEB non maintenu
MoteLab 190 nœuds	TinyOS	IEEE 802.15.4	+ interface graphique + base de données - pas d'accès distant - site WEB non maintenu
LoRa FABIAN	(n/a) (Arduino)	LoRa 868MHz (PHY) IEEE 802.15.4 (MAC)	+ code sur Git + intégration Internet - peu d'informations
NITOS +100 nœuds	Contiki	IEEE 802.15.4/ZigBee Wi-Fi, Bluetooth LTE, SDR, SDN Capteurs environnementaux GPS (réseau de vélos)	+ testbed hétérogène + Accessible via le portail OneLab - Compétition de réservation
FIT IoT-LAB 2728 nœuds	Contiki FreeRtOS TinyOS RIOT OpenWSN	IEEE 802.15.4 Bluetooth Low Energy LoRa, radio en sub-GHz (868MHz et 433MHz) capteurs environnementaux accéléromètres	+ plusieurs plateformes + grand nombre de nœuds - demande d'accès pour les étudiants avec autorisation du laboratoire
Orbit 400 nœuds	TinyOS	Wi-Fi Bluetooth Low Energy IEEE 802.15.4/ZigBee SDR, SDN LTE, WiMAX	+ interface ergonomique - Compétition de réservation
Twist	TinyOS	Wi-Fi, IEEE 802.15.4/ZigBee Bluetooth	+ tesbed hétérogène - pas de suppression automatique des nœuds

L'ingénierie des protocoles implique de nombreuses phases de tests pour valider les nouveaux protocoles proposés et les architectures adéquates. Dans le domaine spécifique des RCSF, les tests sont souvent complexes à faire, difficiles à répéter et lents à configurer et exécuter. Pour toutes ces raisons, la simulation a longtemps été la méthode privilégiée par les chercheurs. Cependant, les utilisateurs de ces outils informatiques deviennent de plus en plus conscients du fait que les simulateurs actuels sont incapables de modéliser certaines caractéristiques essentielles des systèmes réels. La simulation offre des résultats qui sont souvent discutables [5]. Nous sommes depuis très longtemps, comme maintenant quelques autres acteurs du domaine, conscients d'une importance fondamentale de faire avancer la conception théorique. L'analyse théorique des protocoles et de leurs algorithmes doit être vue comme une première étape à

la validation expérimentale, aidée également en cela par l'utilisation d'outils de simulation de réseaux. A cette fin, les expériences sur testbeds sont proposées par quelques équipes de recherche maintenant. Quelques études existent dans la littérature sur cette problématique. Certaines d'entre elles fournissent une étude comparative entre testbeds. Dans [6], les normes de support, de stockage et de couche physique pour l'architecture pour trois testbeds sont données. Une analyse de quelques simulateurs, avec un tableau comparatif sur cinq outils évalués est proposée dans [7]. Afin d'explorer la synergie entre les outils existants, les auteurs de [8] passent en revue quelques projets de recherche majeurs en détaillant les différentes normes et technologies utilisées par quelques testbeds. Nous pouvons d'ailleurs trouver dans [1], des informations générales sur la façon de préparer et exploiter des expérimentations dans plusieurs domaines. Cette enquête présente les caractéristiques de protocoles pour l'IoT. Elle évoque des caractéristiques telles que l'hétérogénéité et le passage à l'échelle de l'aspect matériel. Les auteurs de [9] étudient les propriétés de base pour sélectionner un environnement de simulation approprié. Dans [10], une étude comparative montre que les simulateurs de réseaux sans fil de type VANET (réseaux de véhicules), doivent s'améliorer sur la définition plus réaliste des caractéristiques des couches radio. Nous pouvons identifier dans la littérature des travaux qui proposent de nouveaux testbeds ou simulateurs, et de nouvelles architectures de plateformes. Par exemple, les auteurs de [11] proposent une description d'un système de gestion plus flexible et plus générique, contrairement aux approches de gestion actuelles des systèmes qui sont fortement couplées à une configuration de testbeds spécifiques. Après avoir fourni un résumé des testbeds les plus connus dans [12], l'article propose un nouveau mécanisme de récupération de données qui aide à stocker les résultats des données structurées dans ce testbed. Cet article contribue principalement sur les aspects logiciels. D'autres propositions sont données dans également dans [13], [14] et [15]. Ce dernier article traite de la comparaison entre les simulateurs les plus populaires pour les RCSF et une comparaison entre les testbeds historiquement connus.

2.3 | Besoins

Comme cela a été évoqué plus haut, les testbeds constituent un outil intéressant pour l'évaluation de performance des protocoles ; complémentaires des techniques de modélisation et des outils de simulation, ils permettent d'obtenir des résultats réalistes, par leur nature. Ces testbeds respectent tous une architecture classique formée des éléments suivants :

- Le réseau d'expérimentation : il repose sur des MCU entièrement reprogrammables dotés d'un émetteur-récepteur radio sur bus SPI. Généralement, ces noeuds sont déployés de manière fixe sur un quadrillage mais certains testbeds mettent à disposition un sous-ensemble de noeuds mobiles,
- Le réseau de supervision : il est constitué de contrôleurs responsables de la programmation individuelle des noeuds radio, du suivi de la consommation énergétique et de la remontée des consoles MCU sur un serveur central. Afin de limiter son impact sur le réseau benchmarké, le réseau de supervision exploite souvent du PoE,
- Le serveur de supervision et de déploiement des firmwares sur les MCU.

Cette architecture type, évoquant les modèles en couches classiques, est adaptée à l'étude d'une grande variété de problématiques. Cependant, des facteurs limitants non-négligeables existent. Le premier est lié à l'évolution des technologies radio disponibles et des besoins applicatifs en découlant. En particulier, depuis une dizaine d'années, la problématique de la localisation précise en environnement d'intérieur requiert des changements de technologies radio et des déploiements dans des environnements permettant de mesurer la performance dans des conditions variées. Les testbeds existants ont été équipés de technologies variées (2.1) relevant des WLAN, WPAN, LPWAN et WWAN mais leurs caractéristiques (bande passante et puissance au niveau de la surface terrestre) les rendent inadaptées à la mesure de distance fine en intérieur. Le second facteur limitant est lié aux usages de manière générale. Les solutions proposées pour les RCSF ont vocation à être utiles à des utilisateurs finaux. Le déploiement en grille dans un espace de type hangar est adapté à une étude de performance classique mais ne convient pas par exemple lors de l'analyse des interactions entre les utilisateurs et le système.

Le testbed LocURa4IoT, de par sa vocation, tient compte du premier facteur en déployant des noeuds équipés d'une couche physique compatible IEEE 802.15.4 UWB. Cette technologie permet de la mesure de temps de propagation, dit Temps de Vol ou *Time of Flight* (ToF), avec une résolution d'une quinzaine de picosecondes et est donc adaptée pour les environnements d'intérieur. L'évaluation de performance est rendue possible par la connaissance à 2cm près de la position des noeuds, qu'ils soient fixes ou mobiles (mobilité assurée par un rail piloté logiquement). LocURa4IoT supporte également les approches de localisation historiques basées sur la puissance du signal de par la présence de multiples couches physiques :

- UWB PHY IEEE 802.15.4-UWB
- BLE
- LoRa/LoRaWAN
- IEEE 802.15.4 DSSS (Zigbee, 6LoWPAN, 6TSCH...)
- NFC (pas d'antenne connectée mais *transceiver*, présent sur les cartes)

Le second facteur est adressé par l'existence de plusieurs zones de déploiement ou plateaux dans LocURa4IoT. Comme décrit au chapitre 3, le testbed compte 3 plateaux dont un est situé dans la Maison Intelligente de Blagnac. Le positionnement des capteurs a été étudié afin de s'intégrer à l'environnement de vie : cela facilite les études liées à l'usage des technologies par des publics âgés ou à mobilité réduite.

2.4 | Enjeux scientifiques adressés par la plateforme

Comme cela a été évoqué plus haut, la plateforme permet d'adresser la problématique de la localisation précise des objets connectés en environnement intérieur. Plusieurs enjeux scientifiques « durs », disciplinaires, sont particulièrement adressés

1. **La précision de la localisation de l'objet** : si la précision théorique, d'un point de vue système et signal, permet d'envisager une localisation centimétrique (la résolution théorique de la mesure de distance est de 15,65 picosecondes, soit une distance de 4,8mm), de nombreux facteurs perturbateurs viennent dégrader la précision de l'outil de mesure temporel utilisé dans les estimations de distance. L'imprécision des références temporelles pour chronométrer des picosecondes sans embarquer d'horloge atomique sur l'objet (!) par exemple, est un facteur considérable. Ce défaut peut néanmoins être compensé par différentes approches : protocolaires, collaboratives entre technologies, etc. Le problème peut être adressé au niveau du *ranging*, voire plus haut au niveau de l'algorithme de localisation.
2. **La détection et la mitigation de la Non-Ligne de Vue (NLOS)** : bien que robustes au multi-trajets, les transmissions UWB sont tout de même impactées par les obstacles [16], [17]. Ce phénomène est tout à fait observable sur le testbed LocURa4IoT :
 - Nous observons des erreurs de *ranging* de quelques dizaines de centimètres dès lors que le signal traverse un obstacle conséquent comme un mur de briques en terre cuite,
 - en plaçant opportunément une mousse isolante de la chambre anéchoïque sur un supposé trajet indirect du signal, nous arrivons à modifier la réponse impulsionnelle du canal visible sur nos interfaces : nous pouvons artificiellement jouer sur les multi-trajets venant perturber la transmission et impacter l'algorithme de détection du premier chemin, brique essentielle à la mesure du temps de vol radio. A l'inverse, en chambre anéchoïque où un seul trajet est possible, nous pouvons observer les perturbations créées par les antennes et les modules eux-mêmes (auto-perturbation).

Plusieurs approches visant à détecter voire à corriger le biais introduit par la Non-Ligne de Vue radio des transmissions sont envisageables [18].

3. **L'angle d'arrivée du signal** : si la combinaison de mesures de temps de vol effectuées entre plusieurs nœuds permet d'arriver à une localisation en 2D ou 3D, il est nécessaire d'avoir plusieurs ancres à portée – ou non [19] – ce qui augmente le nombre de nœuds nécessaire. Les dernières avancées technologiques sur les composants UWB, permettent de disposer de *transceivers*, radio qui implémentent des doubles antennes et permettent la mesure de la différence de phase entre deux parties du PHR (*Physical Header*), ce qui permet, sur un seul message reçu, de mesurer l'angle d'arrivée et, avec un second message, le *ranging* en ToF. Des optimisations protocolaires sont donc envisageables pour réduire le nombre de nœuds et le nombre de messages par nœud, en vue de réduire l'empreinte protocolaire du processus de localisation.
4. **L'empreinte énergétique des systèmes de localisation** : il est reconnu qu'un objet connecté portable qui présente une faible durée de vie sur batterie, est peu utilisable en conditions réelles et rapidement délaissé par son utilisateur. Les technologies de localisation telles que le GNSS (GPS) sont connues pour être très énergivores : par exemple, dès lors que la navigation est activée sur un smartphone, celui-ci voit son niveau de batterie et donc, son autonomie, décroître rapidement. L'équipe porteuse de la plateforme dispose à ce titre d'une solide expérience dans la modélisation et la caractérisation énergétique des protocoles pour les réseaux de capteurs sans fil et l'internet des objets [20].

5. **Le passage à l'échelle** : le passage à l'échelle est toujours un challenge dans les réseaux sans-fil. La question de l'échelle, sur les RTLS, va au-delà de simple question du nombre important de nœuds. En effet, il est intéressant de considérer la question du *nombre optimal* de nœuds pour que le RTLS fonctionne correctement (réactivité du système), mais aussi du placement optimal de ces derniers. En d'autres termes, la question de la scalabilité peut également être traitée considérant une recherche d'un nombre minimal de nœuds. D'un point de vue protocolaire, les techniques de *passive ranging* [REF] peuvent permettre des ruptures intéressantes sur cet aspect.
6. **La diversité des technologies de communication** : si les travaux de l'équipe concernent principalement la localisation par les techniques de mesure du temps de vol radio en Ultra-Wide Band, d'autres technologies de réseaux sans-fil peuvent être utilisées pour parvenir à un service de localisation (BLE...). Au delà, fournir un service de localisation universel et précis devra probablement compter sur une complémentarité de ces technologies.

De façon plus générale, comme tous les autres plateformes de type « testbed », LocURa4IoT permet d'expérimenter le développement embarqué, la mise en oeuvre de technologies de réseaux sans-fil (qu'elles soient standardisées ou propriétaires), l'évaluation des performances des protocoles sans-fil, etc.

3 | Description de LocURa4IoT

3.1 | Description de l'infrastructure testbed

Comme la plupart des testbeds, LocURa4IoT se décompose en trois couches : les *nœuds* et les *contrôleurs*, qui constituent les deux premières couches matérielles du testbed ; une couche *données et algorithmes*, logicielle, qui permet le traitement des données pendant ou après l'expérience.

3.1.1 | Couche nœuds

La couche *nœuds* est un réseau de capteurs sans fil (WSN) utilisé pour les expériences. Plusieurs types de nœuds sont déployés sur plusieurs plateaux.

3.1.1.1 | Description des nœuds utilisés

Il existe deux types de nœuds déployés sur LocURa4IoT (figure 3.1) :

- Un nœud reposant sur une carte DecaWiNo¹ comportant un microcontrôleur Freescale MK20DX256 VLH7 (ARM Cortex-M4) et un *transceiver*, DecaWave DWM1000,
- Un nœud reposant sur une carte DecaWave DWM1001-DEV² comportant un microcontrôleur Nordic nRF52832 (ARM Cortex-M4) incluant une radio BLE, un *transceiver*, IEEE 802.15.4-UWB et un accéléromètre.

Certains nœuds disposent en plus d'un *transceiver*, LoRa/LoRaWAN HopeRF RFM95 et de capteurs I2C (comme des capteurs de luminosité ou de pression atmosphérique) et un récepteur GNSS (D-GPS). Le récepteur GNSS 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.



(a) DecaWiNo



(b) DWM1001-DEV

Figure 3.1 – Types de nœuds

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.

1. <https://wino.cc/hardware/decawino/>

2. <https://www.decawave.com/product/dwm1001-development-board/>

3.1.1.2 | OS embarqué

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. Il est également possible de programmer les nœuds en utilisant l'environnement de développement *Arduino* ou *platformio* et profiter des nombreuses bibliothèques présentes dans ces écosystèmes.

3.1.2 | 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 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

3.1.3 | 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.

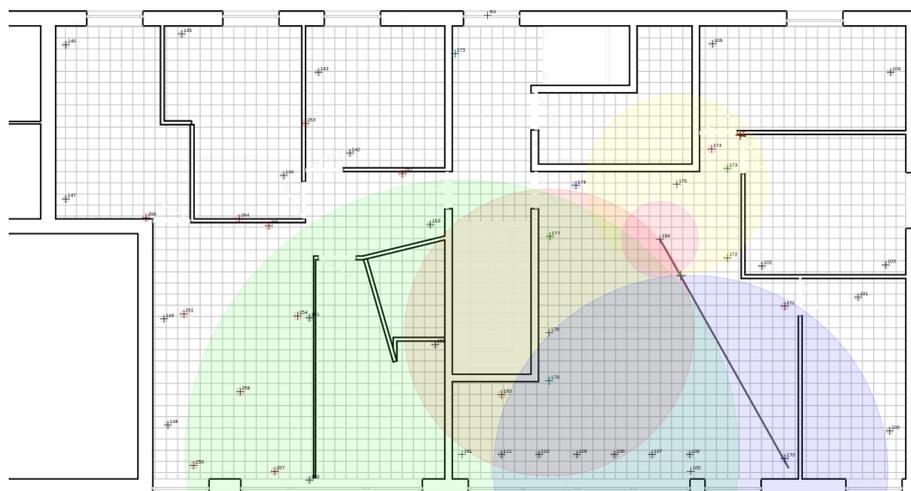


Figure 3.2 – Exemple d'interface d'exploitation des données instantanées : *rangings* sous forme de cercles, 1 mobile et 5 ancres

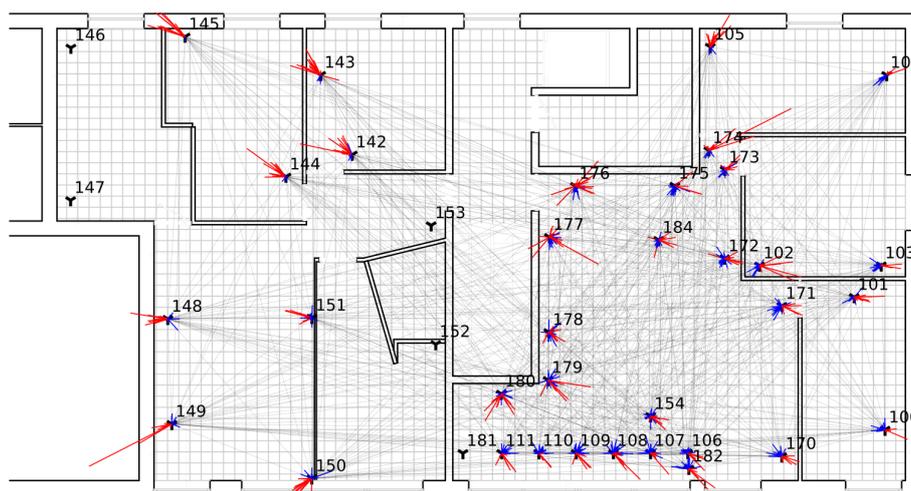


Figure 3.3 – Exemple d’interface d’exploitation des données instantanées : liens et erreurs de *ranging* entre 34 nœuds

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 (figures 3.2 et 3.3).

3.2 | Déploiements sur plusieurs plateaux

Au terme de la période visée par ce rapport, 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 sous-sections suivantes décrivent ces trois plateaux.

3.2.1 | Plateau 1

Le Plateau 1 (figure 3.4) est composé de 50 nœuds DecaWave DWM1001-DEV déployés dans les bureaux, salles de manipulations et salles de réunion du laboratoire, sur une surface de 300 m² 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 l’expérimentateur 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.

3.2.2 | Plateau 2

Le Plateau 2 (figure 3.5) est composé de 10 nœuds DecaWiNo déployés dans l’appartement meublé de la *Maison Intelligente de Blagnac*³, sur une surface de 70 m² 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 [21]. Ce plateau, très orienté « Usages »,

3. <http://mi.iut-blagnac.fr>



Figure 3.4 – Visuel du plateau P1

permet des collaborations avec des équipes de recherche et des industriels en dehors de la communauté des réseaux et protocoles.

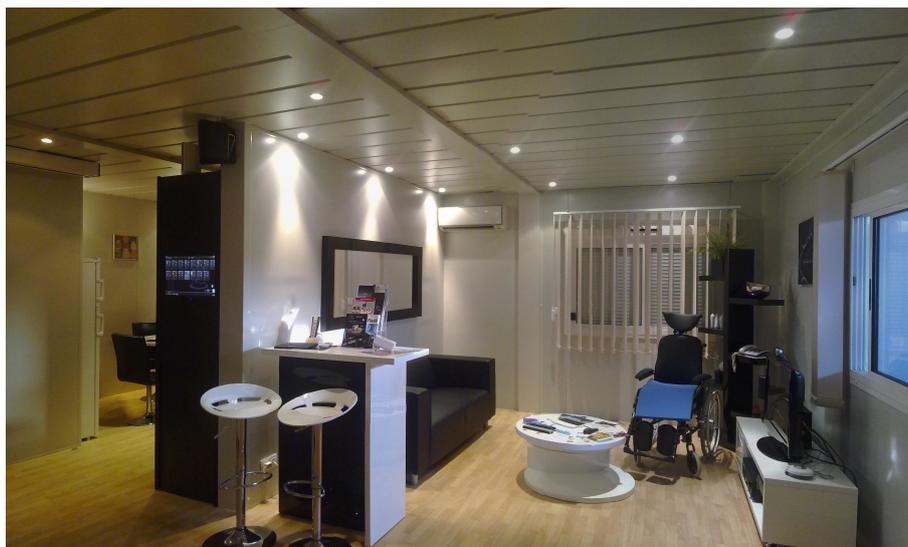


Figure 3.5 – Visuel du plateau P2

3.2.3 | Plateau 3

Le Plateau 3 (figure 3.6) est composé de 4 nœuds DecaWave DWM1001-DEV déployés dans une chambre anéchoïque de 20 m² dans les locaux de l'IUT de Blagnac, dans une salle attenante du laboratoire. De par la nature de cette salle, les communications ne sont pas affectées par d'autres communications sans-fil ou par des perturbations électromagnétiques. L'utilisation de mousses absorbantes permet une certaine maîtrise des réflexions et multi-trajets qui ont une grande importance dans le processus de mesure de temps de vol radio.

3.3 | Briques matérielles et logicielles développées

3.3.1 | Contributions matérielles

Plusieurs matériels ont été conçus dans le cadre de la plateforme, soit parce qu'aucun matériel n'était disponible - notamment au début de l'existence de la plateforme - soit pour permettre des études précises



Figure 3.6 – Visuel du plateau P3

comme sur l'énergie par exemple. La figure 3.7 donne un visuel de ces différents matériels. Ils ont été développés sous licence libre ; leur documentation est accessible en ligne⁴. Ces différentes briques matérielles sont introduites dans les sections suivantes.

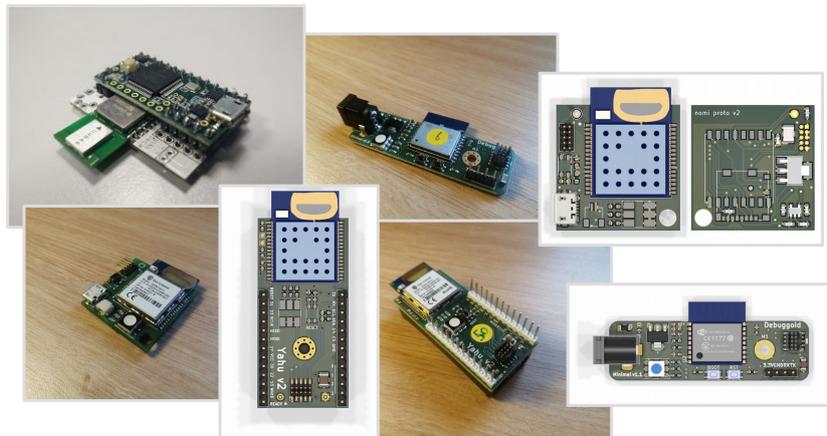


Figure 3.7 – Nœuds matériels développés : DecaWiNo, Debuggoid, Yahu, Nomi

3.3.1.1 | DecaWiNo

DecaWiNo⁵ est le premier nœud développé pour la plateforme en 2015. A cette époque, aucun modèle de nœud UWB n'était disponible sur étagère et avec l'ouverture totale nécessaire pour déployer efficacement un testbed piloté par un serveur central. Le DecaWiNo a alors été conçu à l'IRIT puis fabriqué par l'entreprise Snootlab. Il a permis le déploiement d'une première version du testbed d'une vingtaine de nœuds entre 2015 et 2018. DecaWiNo et cette première version du testbed ont fait l'objet d'une première publication à IPIN [4].

4. <https://wino.cc/hardware/>

5. <https://wino.cc/hardware/decawino/>

3.3.1.2 | Yahu

Yahu⁶ a été développé en 2018 pour permettre au laboratoire et à la plateforme de disposer d'un modèle de nœud UWB/BLE totalement reprogrammable et portable, sur piles AAA, sans aucune électronique de régulation électrique, ce qui permet de mesurer très précisément la consommation énergétique des nœuds et mesurer l'empreinte énergétique des protocoles. Yahu a été utilisé dans le cadre du projet PRAPEN (cf. §4.3.2).

3.3.1.3 | Nomi

Nomi⁷ a été développé en 2019 pour pouvoir disposer d'un nœud aussi ouvert que Yahu, mais d'une part fortement réduit en terme d'encombrement physique, et d'autre part avec une gestion d'énergie permettant l'alimentation et la recharge d'une batterie Li-Po soudée au nœud. Ce « tout petit nœud » permet de loger un équipement à la fois UWB et BLE sur un porte clé, dans un sac ou dans la poche de chemise ou de pantalon d'une personne. Ce nœud a été décliné en deux versions :

- Avec un lecteur de carte micro-SD, permettant d'enregistrer toutes les données de l'expérience localement, sans besoin d'une infrastructure testbed de supervision, en vue de collecter les résultats a posteriori,
- Avec un *transceiver*, LoRa/LoRaWAN, permettant d'adresser la complémentarité des technologies UWB/BLE/short-range/WPAN d'un côté vs. LoRa/long-range/LP-WAN de l'autre.

Nomi a été utilisé dans le cadre des projets POU CET (cf. §4.3.1) et IDEALI (cf. §4.3.3).

3.3.1.4 | Debuggoid

Debuggoid⁸ a été développé en 2018 en même temps que Yahu. Il ne s'agit pas d'un nœud UWB/BLE comme les autres nœuds développés pour la plateforme, mais d'un équipement équivalent à un contrôleur testbed permettant de contrôler un nœud comme Yahu ou Nomi (rebooter et flasher le nœud, en remonter la console). Comparativement à un contrôleur testbed classique basé sur un Raspberry Pi, Debuggoid permet de déployer des testbeds éphémères, totalement sans-fil, par exemple pour réaliser une étude terrain en environnement naturel/écologique.

3.3.2 | Contributions logicielles

3.3.2.1 | DecaDuino

DecaDuino⁹ est la librairie C++ qui implémente le driver UWB de référence utilisé sur la plateforme LocURa4IoT. Elle a été développée à 100% à l'IRIT pour permettre un accès bas niveau à l'ensemble des fonctionnalités fournies par le *transceiver* DecaWave DW1000, principalement utilisé sur la plateforme sur la période visée par ce rapport. Elle permet le développement de protocoles de *ranging* et de synchronisation fine avec une approche *bare metal* permettant de maîtriser totalement les temps d'exécution et les interruptions, ce qui est généralement nécessaire dans les évaluations de performances des protocoles. L'ensemble des autres bibliothèques reposent sur DecaDuino. DecaDuino a fait l'objet d'une publication aux Wireless Days en 2016 [22].

3.3.2.2 | Ranger

Ranger¹⁰ est une librairie C++ implémentant les protocoles de *ranging* couramment utilisés dans l'équipe comme 3M-TWR et SDS-TWR. Elle propose aussi la mise à disposition des mécanismes standard de niveau L2 (adressage, ACK, etc.) au dessus du driver DecaDuino, toujours dans une approche minimaliste et *bare metal*. Ranger est également en charge de formater les données de sortie console au format JSON, que ce soit les données relatives au processus de *ranging* (*timestamps*, *skew*, ...) que des données physiques (indicateur de Non Ligne de Vue, températures des nœuds, etc.). Ces informations constituent la base des jeux de données publiés par l'équipe dans l'ensemble des articles.

6. <https://wino.cc/hardware/yahu/>

7. <https://wino.cc/hardware/nomi/>

8. <https://wino.cc/hardware/debuggoid/>

9. <https://gitlab.irit.fr/rmess/wino/libs/decaduino>

10. <https://gitlab.irit.fr/rmess/wino/libs/ranger>

3.3.2.3 | Localizer

Localizer¹¹ est une librairie C++ implémentant les protocoles et algorithmes de localisation contributions ou simplement utilisés dans l'équipe comme PPE ou UWL. Localizer se présente comme une classe abstraite permettant d'instancier de nouveaux algorithmes de localisation dans le contexte embarqué (directement sur le nœud, et non sur un serveur). Comme Ranger, la librairie est également en charge de formater les données JSON de localisation.

3.3.2.4 | Pytestbed

Pytestbed¹² est une librairie Python permettant le pilotage d'expériences sur le testbed, que ce soit au niveau de l'interaction avec les nœuds (flashage, reboot, start, stop, debug), les rails mobiles (position, vitesse, accélération), les remontées de données (send, receive, waitfor, etc.). De part sa structure simple en python, elle permet une interface à la fois très simple pour les étudiants et les chercheurs, comme très puissante car les expériences peuvent aussi inclure le stockage des données, leur analyse en temps réel ou sur les grandes masses, etc. Le script d'expérience peut même générer lui-même les résultats d'analyse sous forme de figures.

3.3.2.5 | Locapack

Locapack¹³ est une librairie C++/NodeJS permettant une même implémentation côté embarqué comme côté infra/serveur pour traiter des données de localisation, que ce soit sur un référentiel global (GNSS), un référentiel local 2D ou 3D ou même sans référentiel, uniquement avec les données de *ranging* (distances ou angles). Elle permet le prototypage rapide de protocoles réseaux transportant ces données.

3.3.2.6 | VR

En 2019, l'équipe porteuse a investi dans un casque de réalité virtuelle. L'objectif était de permettre la représentation, dans un outil immersif, des données de *ranging* et de localisation, le caractère LOS/NLOS des liens, etc. pour permettre une meilleure compréhension des phénomènes pendant une expérience.

Un premier développement a été réalisé dans le cadre d'un stage. Il sera ensuite largement amélioré en 2022. La figure 3.8 représente ce qui est vu dans le casque lorsque les données de *ranging* 3D (sphères) sont activées.

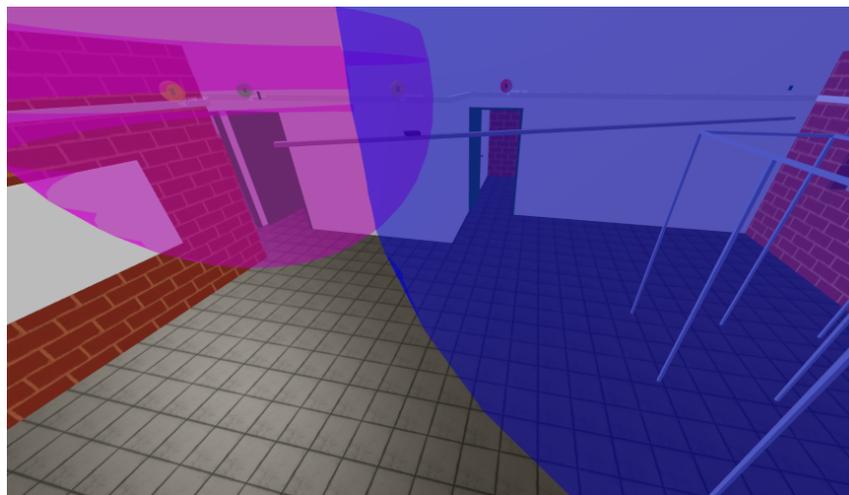


Figure 3.8 – Sphères de *ranging* dans la réalité virtuelle

11. <https://gitlab.irit.fr/rmess/qvey/localizer>

12. <https://gitlab.irit.fr/rmess/locura/infra/testbed>

13. <https://gitlab.irit.fr/rmess/bossche-public/locapack>

4 | Utilisation du testbed

Ce chapitre détaille plusieurs exemples d'utilisation de la plateforme LocURa4IoT, depuis le monitoring de la plateforme et la génération de résultats typiques, jusqu'à quelques exemples d'utilisation dans les projets de recherche.

4.1 | Surveillance du réseau de supervision

Une hypothèse fondamentale dans l'utilisation d'un testbed sans fil est celle de la fiabilité du réseau de supervision. Afin de de s'assurer de la validité de cette hypothèse, nous avons mis en place une série de tests automatiques qui sont exécutés toutes les nuits et qui vérifient différents paramètres. Par exemple, nous avons représenté dans la figure 4.1 le débit qu'il est possible de recevoir de la part de chaque nœud dans le cas où tous les nœuds génèrent des données à la vitesse maximale permise par le port série qui les relie aux contrôleurs.

Nous voyons assez nettement sur cette figure des améliorations majeures apportées sur les contrôleurs :

- Le 16 février : amélioration des scripts qui font le lien entre les ports série et le bus MQTT.
- Du 15 au 23 avril : changement des alimentations des contrôleurs.

Nous voyons aussi les interruptions de l'ensemble de la plateforme ou de certains nœuds individuels.

Depuis la mise à jour du 23 avril, nous pouvons annoncer aux utilisateurs du testbed qu'ils peuvent émettre des données au débit maximum autorisé par le port série et que la chaîne de collecte des données peut gérer ce débit. Cela n'invalide pas nécessairement les expériences précédentes, tant que ces dernières n'émettaient des données sur quelques nœuds et avec un débit modéré (comme la plupart des expériences qui ont été réalisées) il est raisonnable de penser que peu de messages ont été perdus.

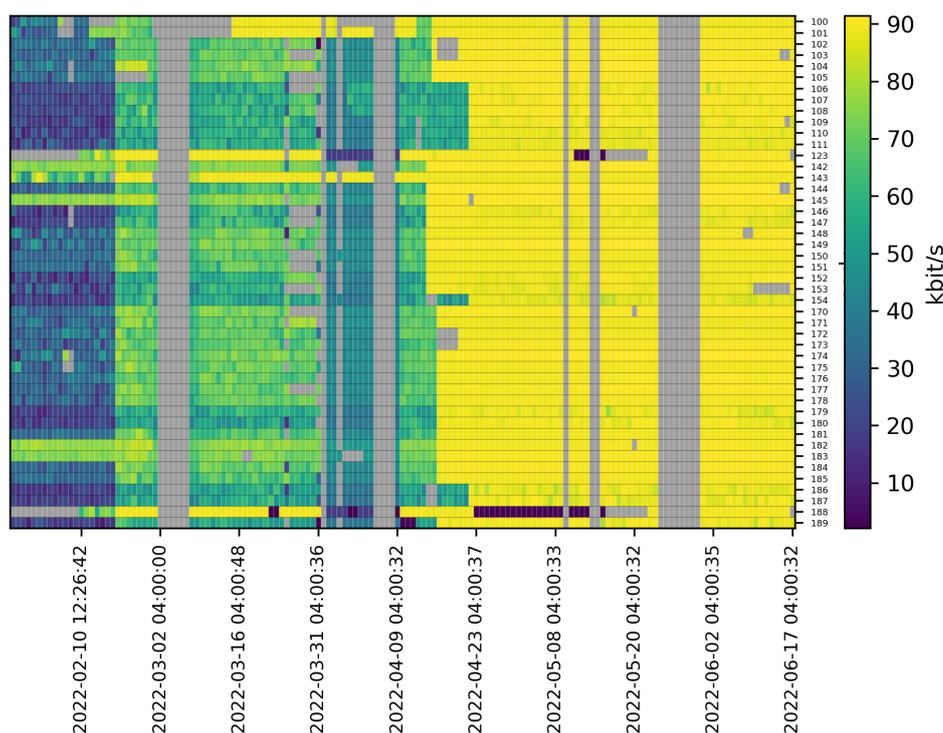


Figure 4.1 – Débit transmissible sur le réseau de supervision par nœud

4.2 | Exemples de résultats

LocURa4IoT a permis de réaliser des expériences et d'obtenir des résultats qu'il aurait été très difficile d'obtenir sans ce testbed. Nous présentons ci-après un échantillon de 3 résultats qui illustrent chacun l'utilisation d'une caractéristique du testbed.

4.2.1 | Calibration des délais d'antenne

Afin de permettre une mesure physiquement significative des instants d'arrivée des paquets radio, il est nécessaire d'ajouter à l'instant d'arrivée mesuré par les étages numériques du récepteur un certain délai correspondant à la propagation du signal dans l'antenne et dans les étages d'amplification et de démodulation analogiques, dans le *transceiver*. La valeur exacte du délai à utiliser dépend des paramètres radio (fréquence utilisée par exemple) et de la configuration matérielle (modèle d'antenne, longueur du câble d'antenne). Les imperfections de fabrication induisent aussi une légère variation de ce délai d'un composant à l'autre dans une même série.

Il est possible de mesurer cette valeur en effectuant des mesures de distances entre deux modules qui sont séparés d'une longueur connue. L'erreur entre la distance mesurée et la distance réelle nous permet d'obtenir le délai d'antenne nécessaire. Comme nous connaissons la position des nœuds dans LocURa4IoT, nous avons pu effectuer cette calibration. L'automatisation permise par l'infrastructure nous a permis non seulement de faire ces mesures, mais aussi de les répéter un très grand nombre de fois.

Nous avons ainsi pu comparer plusieurs méthodes pour calculer le délai d'antenne comme illustré par la figure 4.2. Cette figure représente la dispersion des résultats obtenus avec divers moyens. Plus la dispersion est faible, meilleure est la méthode.

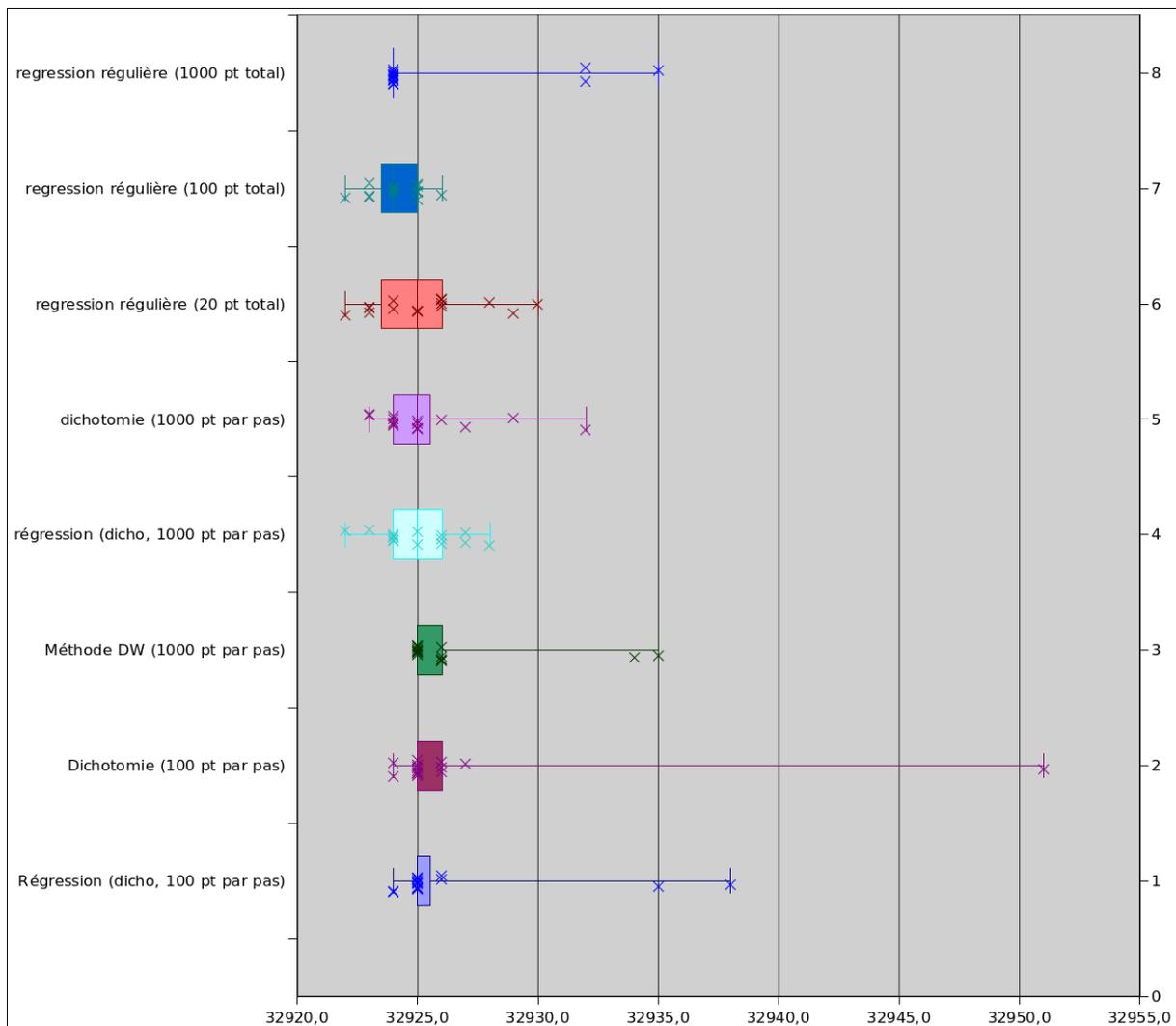


Figure 4.2 – Dispersion des résultats pour le calcul du délai d'antenne

Une fois la meilleure méthode sélectionnée, nous avons pu effectuer automatiquement la calibration pour les 12 configurations radio disponibles. Comme cela nécessitait 204000 mesures de distance par TWR réparties sur 120 jeux de paramètres, l'automatisation de cette procédure grâce à l'infrastructure du testbed était indispensable. Ces calibrations (table 4.1) ont été intégrées dans la bibliothèque DecaDuino.

canal	PRF	valeur finale
1	16	32959
1	64	32976
2	16	32962
2	64	32973
3	16	32934
3	64	32929
4	16	32843
4	64	32852
5	16	32905
5	64	32938
7	16	32823
7	64	32833

Table 4.1 – Résultats pour les DWM1001

4.2.2 | Recherche d'une configuration radio optimale

Dans le cadre du projet POU CET (cf. §4.3.1.) nous avons eu besoin de trouver la configuration radio qui permet d'avoir la meilleure capacité à traverser les murs. La capacité du signal à être détecté dans un environnement contenant beaucoup d'obstacles dépend d'un grand nombre de paramètres :

- Le canal utilisé (définit la fréquence centrale et la bande passante) ;
- Le débit binaire ;
- Le *Pulse Repetition Frequency* (PRF), un paramètre de la modulation ;
- La longueur du préambule (de 128 à 4096 symboles) ;
- L'utilisation d'un *Start of Frame Delimiter* (SFD) standardisé (IEEE 802.15.4) ou celui conseillé par le fabricant du *transceiver* ;
- L'utilisation d'optimisations dans l'algorithme de détection du premier chemin.

Nous avons étudié l'impact de ces paramètres sur 3 métriques :

- Le taux de transmission de paquets avec succès ;
- L'erreur sur la mesure de distance ;
- La durée d'un échange TWR.

Nous exploitons ici la diversité des environnements de propagation radio sur le plateau P1 de LocURa4IoT : certaines paires de nœuds sont en ligne de vue directe (*Line of Sight*, LOS) tandis qu'il y a une combinaison de murs en brique et en placo-plâtre entre les autres. La présence d'une cage d'ascenseur métallique fournit aussi un obstacle intéressant aux propagations radio.

Afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats, les campagnes de mesures ont été conduites la nuit durant les horaires de fermeture du laboratoire. Cela nous permet d'éviter des variations de l'environnement dues à la présence de personnes dans les locaux (déplacement des individus, ouverture/fermeture des portes).

Les résultats de la recherche des paramètres optimaux sur le taux de transmission de paquets avec succès est résumée par la figure 4.3. On constate que les configurations radio offrant les meilleures performances sont celles utilisant le canal 4. Cela correspond à nos attentes, car c'est le canal le plus large (environ 1GHz) et avec la fréquence la plus basse (environ 4GHz).

L'impact des divers paramètres sur l'erreur de mesure de distance a ensuite été évalué. À titre d'exemple, la figure 4.4 présente la distribution de cette erreur pour 3 débits différents (110 kb/s, 850 kb/s, 6,8 Mb/s), avec à chaque fois la longueur de préambule la plus grande recommandée par le constructeur. Le débit a peu d'influence sur la moyenne des erreurs, mais l'emploi du débit à 110 kb/s augmente la variance de l'erreur.

Dans ce cas particulier, on peut expliquer en partie cette variance plus élevée grâce à l'étude de notre troisième métrique : la durée d'un échange. En effet, la durée d'un échange plus longue avec un débit de 110kb/s (voir figure 4.5) implique un impact plus fort de l'erreur due aux décalages entre les horloges des modules.

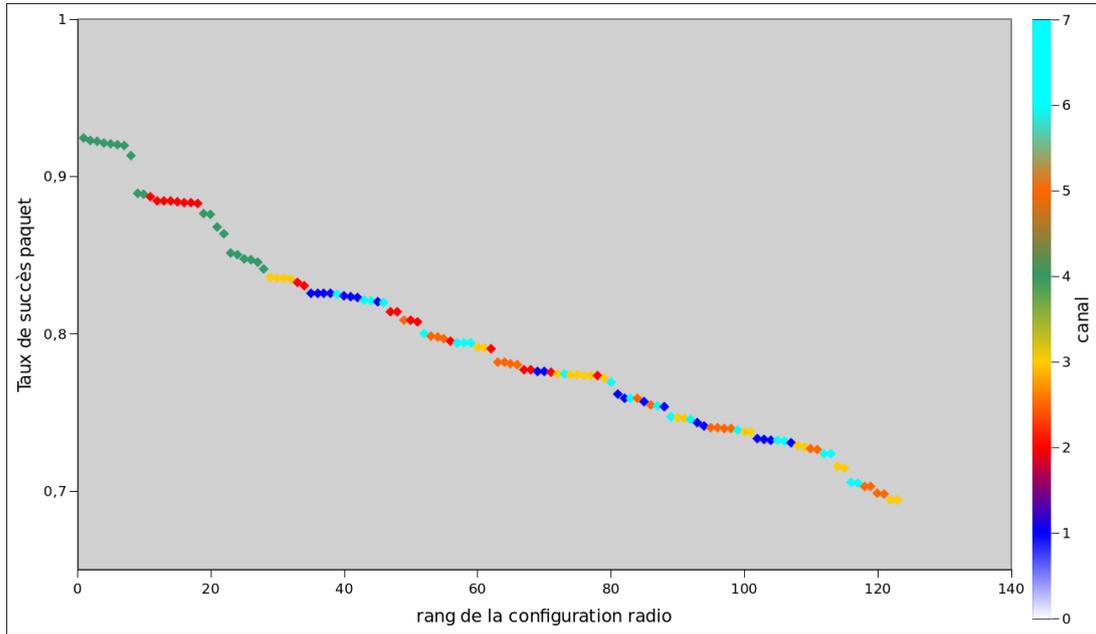


Figure 4.3 – Taux de transmission paquet avec succès pour différents configurations

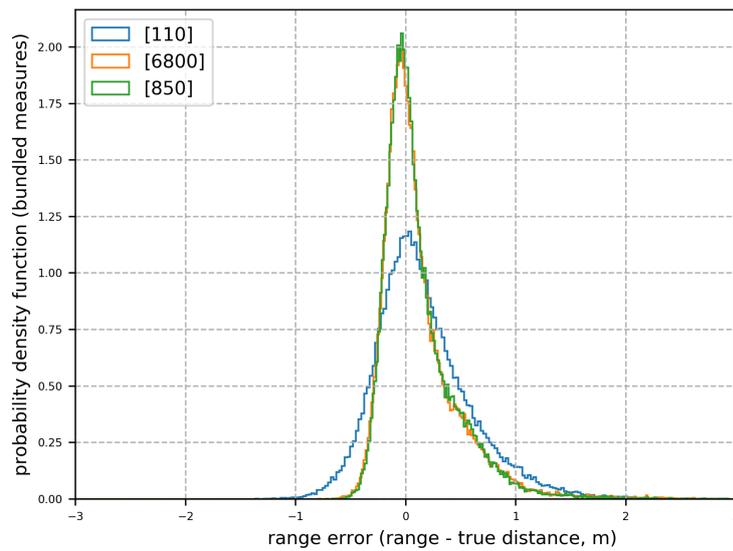


Figure 4.4 – Distribution des erreurs de *ranging* en fonction du débit utilisé.

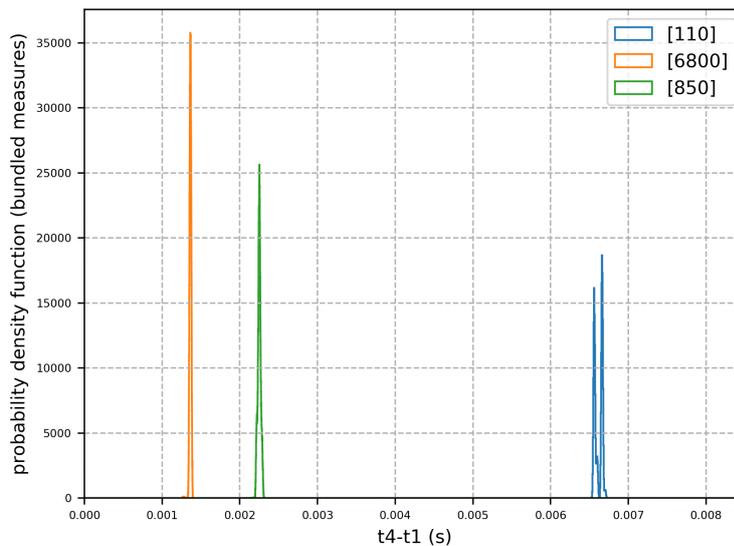


Figure 4.5 – Distribution des durées de *ranging* en fonction du débit utilisé.

4.2.3 | Impact du NLOS et compensation de la puissance de réception

Même si les mesures de distance par temps de vol sont relativement robustes à la non-ligne de vue en comparaison des mesures de distance par la puissance du signal, les obstacles présents entre deux objets ont un impact sur les mesures faites entre ces deux objets. Cette problématique est connue dans la littérature sous le nom de LOS/NLOS (*Line Of Sight/Non Line Of Sight*).

Le testbed LocURa4IoT présente différentes conditions de propagation entre les paires de nœuds. La figure 4.6 présente les conditions de propagation LOS dans le testbed sur une carte du plateau P1. Les distributions des longueurs des liens par catégories sont présentées dans la figure 4.7.

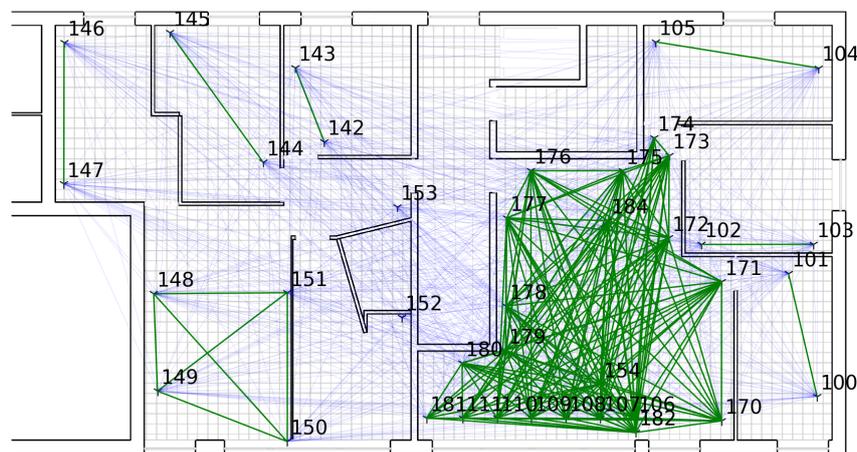


Figure 4.6 – Conditions LOS (en vert gras) et NLOS (en bleu fin).

Cette base de données nous permet de comparer le fonctionnement des protocoles dans les deux conditions. Ainsi, la figure 4.8 présente la distribution des erreurs de *ranging* en fonction du type de lien.

Un facteur simple permettant d'expliquer une partie de l'erreur de *ranging* dans les cas NLOS est la contribution de la puissance de réception (RSSI) à un décalage dans l'horodatage de l'instant d'arrivée. La figure 4.9 présente les erreurs de *ranging* après correction de ce facteur. Par comparaison avec la figure 4.8, on observe que l'erreur moyenne pour les liens LOS a diminué, mais celle pour les liens NLOS a augmenté. Cela nous indique que l'erreur due au NLOS n'est pas explicable par la puissance de réception seule. Par conséquent, l'existence du testbed LocURa4IoT est nécessaire pour permettre d'explorer cette problématique dans un environnement avec une forte diversité de conditions de propagation.

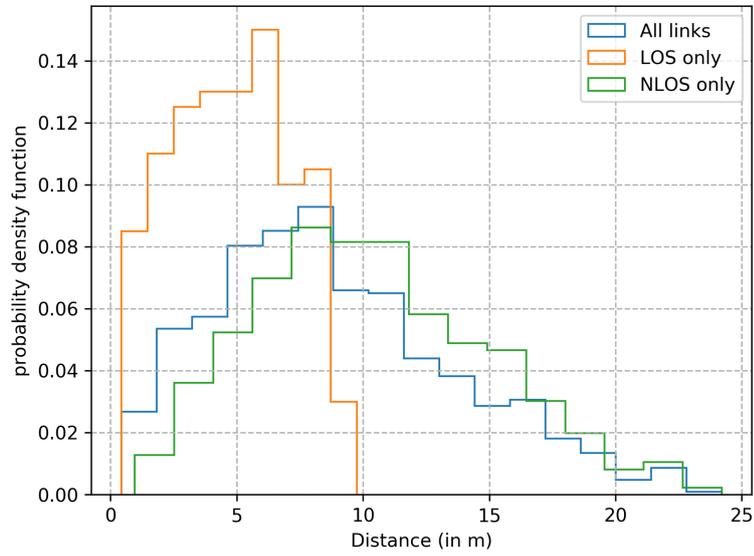


Figure 4.7 – Distribution des longueurs des liens LOS et NLOS.

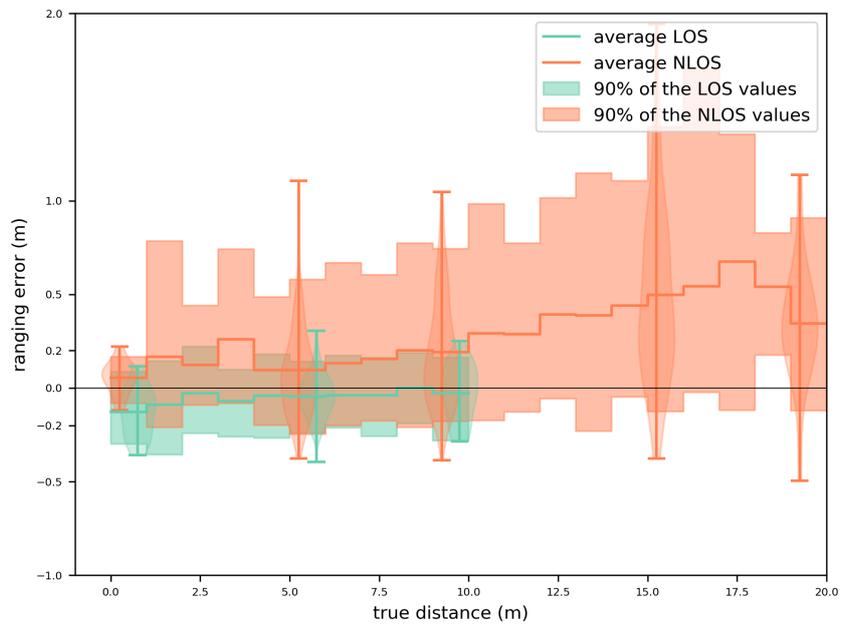


Figure 4.8 – Distribution des erreurs de *ranging* selon les conditions LOS et NLOS.

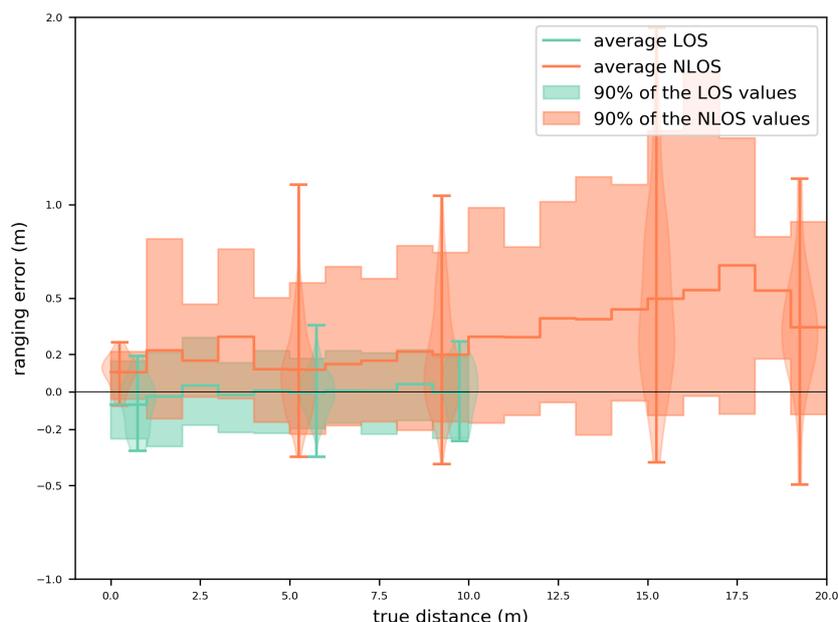


Figure 4.9 – Distribution des erreurs de *ranging* selon les conditions LOS et NLOS après correction de l'effet du RSSI.

4.3 | Projets de recherche ayant utilisé la plateforme

Depuis sa création, la plateforme a été utilisée dans plusieurs projets de recherche et de transfert de technologies. Ces projets sont brièvement présentés dans les sections suivantes. Pour l'ensemble des détails, se référer aux rapports finaux de ces projets.

4.3.1 | POU CET

Le projet POU CET (*Positionnement Urbain Connecté en Environnement Terrestre*) a été l'un des premiers projets d'envergure exploitant avantageusement les nœuds UWB en lien avec la plateforme LocURa4IoT. POU CET est un projet du challenge MALIN soutenu par l'ANR et la DGA. Il a fait l'objet d'un financement ASTRID entre 2018 et 2020.

L'objectif du projet était la localisation de militaires et de personnels de secours sur des champs d'interventions, en particulier dans des zones en intérieur comme des bâtiments, des tunnels, des souterrains, des parkings en sous-sol... Plusieurs technologies de communications sont exploitées pour mesurer des distances entre des nœuds connectés fixes et mobiles : LoRa, LoRa 2.4GHz et UWB. l'UWB permet, par des mesures de distances précises grâce à l'évaluation du temps de vol, d'envisager une localisation fine. L'idée de base est que la personne dépose, tout au long de son parcours lors d'une intervention, des nœuds UWB nommés *cailloux* ou même *poussières*, à la façon du « Petit Poucet ». Ces nœuds UWB, par des *rangings* précis, permettent de se localiser eux-mêmes, à partir de nœuds de références initiaux en extérieur.

Le projet POU CET a exploité des nœuds UWB Decawave de type *Nomi* (cf. §3.3.1.3), basés sur les mêmes trancivers radio DWM1000 que ceux disponibles sur le testbed. De la même façon, un bus MQTT a été utilisé pour les échanges de données issues des différents nœuds et des différentes technologies de communication. Un savoir faire mutuel entre la plateforme LocURa4IoT et le projet POU CET s'est donc construit petit à petit.

Le caractère militaire du projet a quelque peu limité la publication des résultats. Un article a pu être publié [23]. Le projet a également permis de lancer plusieurs travaux sur les algorithmes de localisation au sein de l'équipe porteuse de la plateforme.

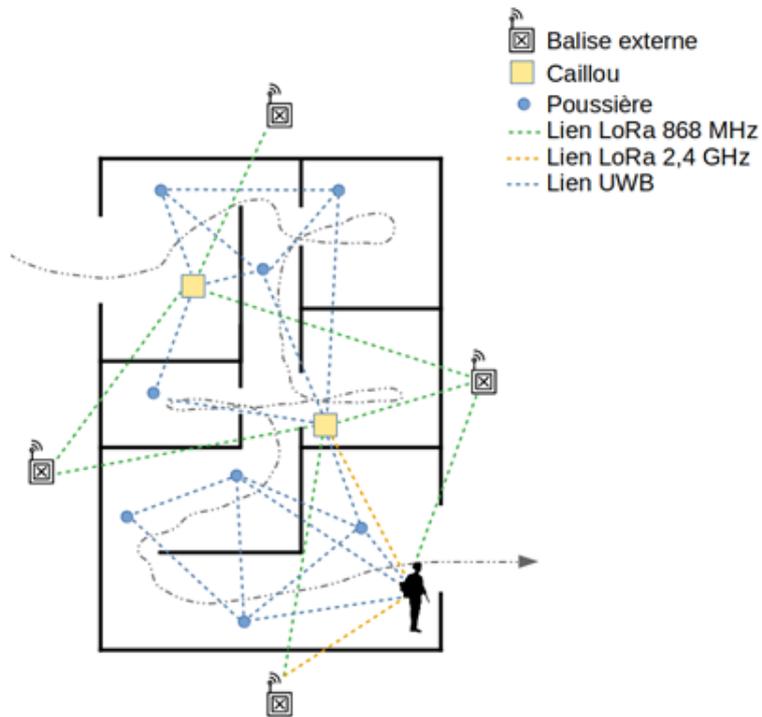


Figure 4.10 – projet POU CET

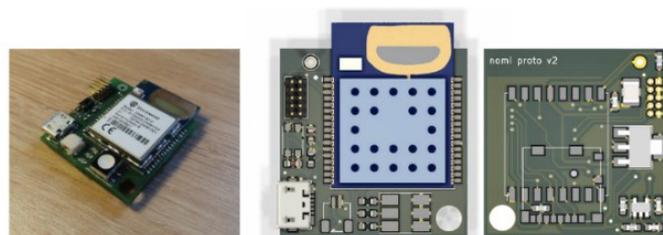


Figure 4.11 – Nomi

4.3.2 | PRAPEN

Le projet PRAPEN (*Protocoles de RAnging Précis et Économes en Énergie*) avait pour objectif d'inscrire l'équipe et la plateforme dans un processus de pré-maturation et, ainsi, valoriser certains résultats de l'équipe. Il a été financé sur l'appel PREMAT de la région Occitanie entre 2019 et 2020.

Plusieurs travaux ont été transférés dans le cadre de ce projet, notamment :

- Des protocoles de *ranging*,
- Une étude visant à minimiser l'impact énergétique des protocoles, en vue d'augmenter l'autonomie énergétique des nœuds communicants sans fil engagés dans le processus de *ranging*,
- Un travail sur la détection de la non-ligne de vue (figure 4.12) dans les protocoles de Ranging basés sur UWB.

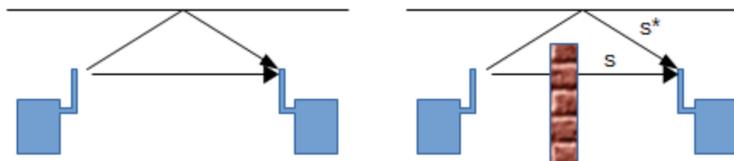


Figure 4.12 – LOS vs. NLOS

Dans le cadre de ce projet, l'équipe s'est positionnée sur le processus de *ranging* à proprement parler, étape précédente nécessaire à une tâche de localisation de ces objets qui elle, va se nourrir des données de Ranging. Dans le projet PRAPEN, l'équipe a principalement adressé deux problématiques :

- La précision du *ranging*, c'est-à-dire une précision meilleure que celle communément proposée par les systèmes disponibles, notamment, ceux proposés par la technologie BLE, qui fait référence dans le domaine,
- L'économie d'énergie, c'est-à-dire la capacité du système à pouvoir fonctionner une grande période de temps sur une source d'énergie limitée, là encore, en présentant un progrès significatif par rapport aux produits existants.

Plusieurs protocoles ont été proposés, permettant de répondre à des cas applicatifs variés, où la contrainte énergétique peut être du côté de l'ancre comme du côté du mobile. Les protocoles ont été analysés sur le plan de la consommation énergétique.

Le travail mené dans le cadre de ce projet a permis d'améliorer la fiabilité de la plateforme, notamment grâce à l'implication de M. Benjamin Freeman, IGE CDD financé pendant 18 mois sur le projet et également sur fonds propre de l'équipe, qui a contribué au développement des briques logicielles embarquées et d'infrastructure pour la gestion des expériences sur le testbed LocURa4IoT.

4.3.3 | IDEALI1-DSP

Le projet IDEALI1-DSP (*Identification Assistée par la Localisation dans l'habitat Intelligent - Phase 1 : par Description Sémantique de la Position*) avait pour objectif, pour la plateforme, de sortir du strict cadre disciplinaire de la recherche en Réseaux et Protocoles et d'ouvrir sur d'autres thèmes de façon pluridisciplinaire. C'est ainsi qu'une ouverture a été créée avec l'équipe ELIPSE (Interaction Personne-Système) de l'IRIT. IDEALI a été financé sur le volet *Émergence* de l'Appel Unique du CNRS 2019, puis par le DAS Smart City de l'IRIT en 2021.

L'identification et la localisation de la personne en interaction dans un habitat intelligent constitue un verrou majeur pour pouvoir déployer des systèmes d'interaction multimodaux. L'objectif du projet IDEALI1-DSP était d'étudier la faisabilité d'une localisation intérieure utilisant les techniques de *ranging* par une *Description Sémantique de la Position* (DSP) des objets connectés, en entrée (par l'interprétation d'une DSP d'un jeu minimisé d'objets « ancrés ») comme en sortie (par la génération d'une DSP pour tout objet de l'environnement). Il s'agissait de concevoir un modèle de description et d'échange entre la DSP et le *ranging* pour permettre la localisation de tout objet connecté de l'environnement ambiant.

Des algorithmes et protocoles ont été conçus et préalablement testés sur le plateau P1 de LocURa4IoT, puis une preuve de concept a été déployée sur le plateau P2 dans la Maison Intelligente de Blagnac (MIB) ; elle devait permettre, dans une perspective du projet, la comparaison entre cette méthode originale par DSP & Ranging et des méthodes de localisation indoor traditionnelles basées sur la *n*-latération.

L'utilisation de la plateforme LocURa4IoT permet traditionnellement de mettre en œuvre des algorithmes de n -latération reposant sur des données de *ranging* pour obtenir une coordonnée x_i, y_i, z_i pour chaque objet, soit dans un repère absolu latitude, longitude, altitude, soit dans un repère local à l'environnement. Cependant, si la précision absolue obtenue par n -latération est très intéressante, dans le contexte de l'AAL, une DSP peut être tout aussi pertinente pour l'exploitation des données par le système ambiant. Mieux : dans certaines situations, une information telle que « l'objet A est entre l'objet B et l'objet C » peut être plus pertinente à interpréter que trois jeux de coordonnées $[x_A, y_A, z_A, x_B, y_B, z_B, x_C, y_C, z_C]$. De plus, la première information est moins coûteuse à obtenir car elle ne requiert pas la position exacte d'un nombre minimal d'objets « ancrés ». Enfin, connaître la description d'un objet plutôt que ses coordonnées peut là aussi être plus intéressant pour le système ambiant. Il s'agissait là des hypothèses de départ du projet IDEALI.

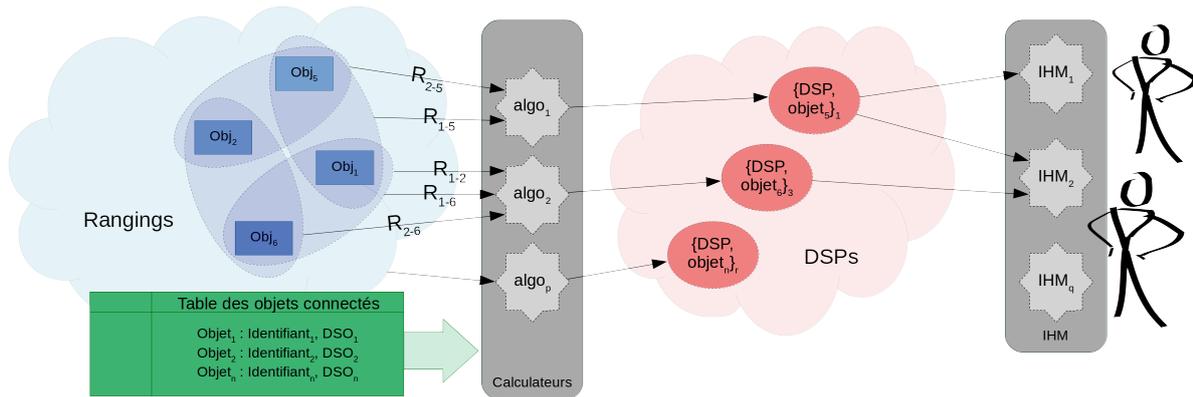


Figure 4.13 – Architecture IDEALI1

Dans le cadre de projet IDEALI1-DSP, la question de la DSP d'objets connectés a été étudiée et couplée à un système de localisation par temps de vol radio sur les objets connectés déployés dans l'environnement ambiant. Un modèle de DSP a été proposé, ainsi que plusieurs algorithmes permettant, à partir de plusieurs DSP et distances en entrée, de générer d'autres DSP en sortie, fonction des données d'entrée. Plusieurs réflexions connexes ont été menées, depuis les modèles conceptuels jusqu'à l'utilisation de la DSP dans un processus d'adaptation au contexte d'une IHM, en passant par les aspects linguistiques utilisés dans la DSP. La figure 4.13 illustre l'interaction entre les différents éléments du projet (ranging, algorithmes, construction de la DSP).

Le travail mené dans le cadre du projet IDEALI a permis la publication d'un article [21] ainsi que d'une vidéo de vulgarisation¹⁴. Un article soumis à la revue IRBM est actuellement en navette à l'heure où ces lignes sont écrites.

14. https://youtu.be/FS47_ov9KOc

5 | Structuration de la plateforme

5.1 | Éléments de chronologie

La plateforme LocURa4IoT a été créée en 2018 sur la base technique des testbeds OpenWiNo puis DecaWiNo qui avaient été mis en oeuvre les années précédentes. Depuis sa création, la plateforme s'est progressivement développée (figure 5.1).

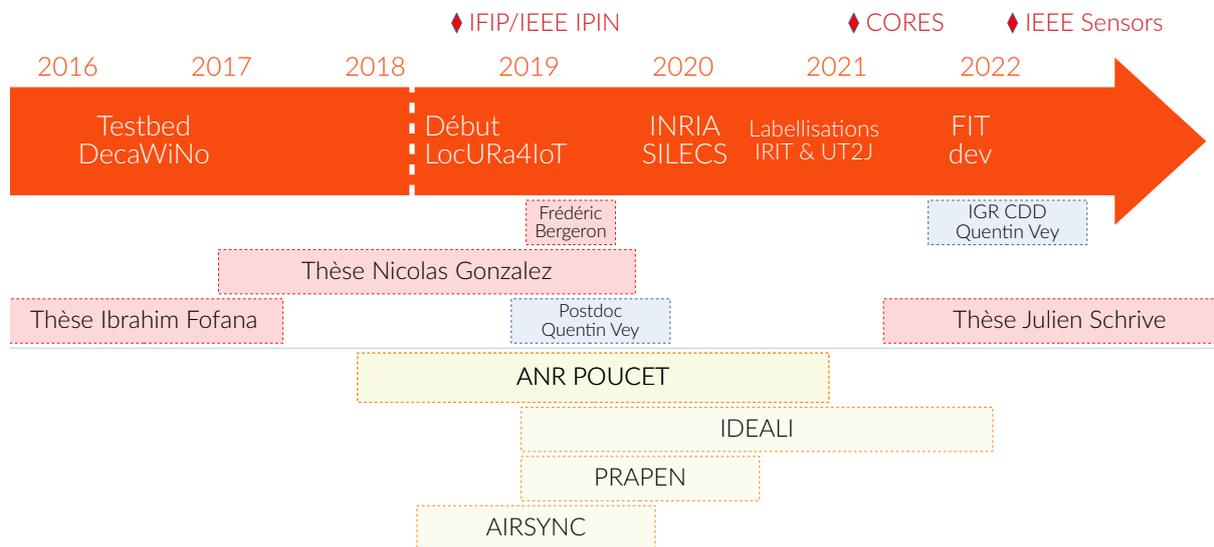


Figure 5.1 – Chronologie 2016-2021

Les faits les plus marquants sont détaillés ici :

- Mars 2016 : la librairie DecaDuino est publiée et présentée aux *Wireless Days* 2016.
- Automne 2016 : installation des 20 premiers nœuds DecaWiNo dans la salle « Nord » au premier étage du bâtiment C de l'IUT de Blagnac, niveau qui deviendra plus tard le plateau P1. Les nœuds implémentent tous une interface sans-fil UWB, sont tous fixes, ont tous une position connue au centimètre près et sont reprogrammables par un script python.
- Été 2017 : mise en place d'un broker MQTT et modification du testbed pré-existant pour remonter les informations de consoles des nœuds via MQTT.
- Automne 2017 : installation du rail de 7 mètres au plafond et fixation d'un DecaWiNo sur le plateau mobile. Le testbed peut désormais adresser la mobilité d'un nœud parmi les autres, fixes. Le rail peut être commandé par MQTT.
- Mars 2018 : création officielle de la plateforme LocURa4IoT.
- Avril 2018 : création de la salle de démonstration dans la salle « Nord », à la fois salle d'expérience pour les chercheurs, mais aussi un lieu de démo et de valorisation des travaux réalisés sur la plateforme. Dénomination du plateau P1.
- Mai 2018 : finalisation du plateau P2 à la Maison Intelligente de Blagnac. Tous les nœuds sont placés à près 1.2m du sol et sont positionnés près d'autres objets du quotidien (cafetière, télévision, etc.). Le plateau P2 permet de mener des études plus près de l'usage, avec des utilisateurs interagissant avec le système.
- Septembre 2018 : présentation de la première version de la plateforme à IFIP/IEEE IPIN 2018.
- Automne 2018 : remplacement des DecaWiNo par les nœuds DWM1001-DEV sur l'ensemble du P1 et extension de ce même plateau à 300m², sa taille actuelle fin 2021. Le passage au DWM1001-DEV permet d'ajouter une interface BLE et un débogueur local sur chaque nœud.
- Été 2019 : installation du plateau P3 dans la chambre anechoïque de près de 20m² présente dans le bâtiment recherche de l'IUT de Blagnac.
- Automne 2019 : déploiement d'un système de réalité virtuelle en vue d'améliorer l'exploitation des données issues du testbed par le chercheur.

- Printemps 2020 : début des échanges avec l'INRIA pour FIT/SILECS.
- Septembre 2020 : labellisation de la plateforme par l'UT2J.
- Octobre 2020 : labellisation de la plateforme par l'IRIT.
- Juillet 2021 : présentation au niveau national de la mise à jour de la plateforme à CORES 2021.
- Octobre 2021 : recrutement de Quentin Vey, IGR CDD dédié à la plateforme et financé sur fonds propres de l'équipe RMESS.
- Décembre 2021 : présentation de la plateforme à l'international dans IEEE Sensors Journal.
- Fin 2021 : installation pérenne du site de développement FIT sur le campus de l'IUT de Blagnac, accessible via <https://devwww.iot-lab.info/testbed/>. Il est alors possible de lancer une expérience à distance sur la plateforme de développement.

5.2 | Pilotage de la plateforme

Cette première période d'existence de la plateforme a permis de structurer le pilotage et l'utilisation de la plateforme. La plateforme LocURa4IoT est dotée d'un *Comité de Pilotage* (COPIL) interne constitué de 4 personnes :

- Dr. HDR Adrien van den Bossche (responsable scientifique)
- Dr. Quentin Vey (responsable technique)
- Dr. Réjane Dalcé
- Pr. Thierry Val

Le comité de pilotage est joignable via l'adresse email publique <mailto:locura4iot@irit.fr>. Le site web de la plateforme est <http://locura4iot.irit.fr>. Il publie des informations de présentation de la plateforme et des jeux de données (*datasets*) ouverts sous licence ODBL.

En terme de fonctionnement et lancement d'expériences, sur la période considérée dans ce document, la plateforme peut être utilisée par l'équipe porteuse ou par un extérieur avec le support de l'équipe porteuse, soit physiquement en étant sur place, soit à distance via un accès VPN. Une coordination manuelle entre utilisateurs est assurée par un canal de communication interne (d'où la nécessité d'être accompagné par un membre de l'équipe porteuse). Une fois cette organisation établie, le script d'expérience est lancé, ce qui a pour effet de réserver les noeuds, les flasher et démarrer l'expérience. Sur la période considérée, la plateforme n'est pas utilisable à distance par des membres extérieurs de l'équipe porteuse. Le rapprochement de LocURa4IoT vers la fédération FIT permettra, sur la prochaine période, la mise à disposition de la plateforme à d'autres externes à l'équipe porteuse, que ce soit au niveau du site Toulousain comme au national. Un site de test FIT, composé d'une dizaine de noeuds DWM1001-DEV a été installé de façon pérenne au dessus de la chambre anéchoïque. Bien que non public car réservé aux développeurs FIT, ce site permet de lancer une expérience à distance et constitue le premier lien réel entre LocURa4IoT et FIT/IoT-lab.

Fin 2021, dans le cadre du groupe de travail sur la démarche qualité des plateformes UT2J, ainsi qu'en vue d'obtenir le label INS2I, le COPIL a initié plusieurs travaux sur l'amélioration de la structuration de la plateforme. Ce travail entraînera, dans la période suivante, un certain nombre de changements au niveau de la gouvernance de la plateforme :

- L'élargissement du COPIL en incluant des membres experts extérieurs, des utilisateurs et des représentants des tutelles de la plateforme,
- La mise en place d'une charte d'utilisation pour la plateforme,
- La mise en place d'une tarification auditable.

Ces éléments seront détaillés dans la prochaine édition de ce rapport d'activité.

5.3 | Aspects financiers

La plateforme n'ayant jamais bénéficié de financement propre, elle a essentiellement été construite, sur la période considérée pour ce rapport scientifique, par des achats sur projets ou sur fonds propres de l'équipe.

5.3.1 | Équipements

La plateforme est constituée de différents matériels qui sont listés ici, pour un coût total d'achat d'environ 48k€. Il est à noter que très peu d'équipements de la plateforme rentrent dans la catégorie dite des « équipements », puisque les prix unitaires hors taxes sont généralement inférieurs à 800€ HT.

- Équipements métiers : 20k€
 - 60 contrôleurs testbeds
 - 100 DWM1001-DEV
 - 12 Yahu
 - 60 nomis
 - 10 debugoids
- Équipements de support : 7k€
 - Rails
 - Métal/supports et menuiserie
 - Câblage
- Réseau/infra : 13k€
 - Serveurs
 - Switchs et inject/splitter/shields PoE
 - Onduleurs
- Valorisation : 5k€
 - Vidéo-projecteur et écran de démonstration
 - Système de Réalité Virtuelle
- Préparation de la suite, évolution et prospective : 3k€
 - Gateways LoRa ToF
 - SDR
 - Lidar

5.3.2 | Origine des fonds

Comme cela a été évoqué plus haut, la plateforme LocURa4IoT a été construite progressivement, sans budget support dédié à son déploiement. Elle a été équipée plutôt par des achats thésaurisés où, à chaque projet de l'équipe, il a été proposé d'investir sur des matériels compatibles dans une vision de long terme, pour concevoir une plateforme réutilisable. Certaines « queues de budgets » ont également été utilisées, ainsi que quelques achats en lien avec l'enseignement dans le cadre de projets d'étudiants. Le détail est donné ci-après :

- Université de Toulouse 2 Jean Jaurès
 - AAP soutien aux plateformes : 3k€
 - Conventions IRIT/RMESS : 20k€
- IUT de Blagnac
 - Central : 4k€
 - Département GIM : 3k€
- Région Occitanie
 - AAP PILE-CIFRE : 3k€
 - AAP PREMAT : 6k€
- ANR/ASTRID
 - AAP MALIN : 4k€
- CNRS/INS2I
 - AAP Appel Unique : 5k€

5.4 | Soutien par les tutelles

Les différentes tutelles sont impliquées sur la plateforme, à divers niveaux et sur diverses tâches. Ces éléments sont les suivants :

- IUT Blagnac
 - Hébergement physique des plateaux P1 et P3 de la plateforme au bâtiment C (bâtiment *recherche*) de l'IUT et le plateau P2 à la *Maison Intelligente*,
 - Aide par les personnels BIATSS de l'IUT : services communs et patrimoine, pôle informatique et atelier.
- IRIT
 - Hébergement serveur au datacenter de l'IRIT sur site UPS, et site web <http://locura4iot.irit.fr>,
 - Mise à disposition de l'IP publique devtoulouse.iot-lab.info, VPN vers l'IUT.
- UT2J
 - Gestion des comptes et des conventions, achats, gestion des ressources humaines,
 - Aide juridique du service *Valorisation, Transfert, Relations industrielles* de la DAR,
 - Communication : logo, plaquettes, photographie, kakémono,
 - Soutien matériel via l'AAP *équipements des plateformes UT2J*. Sur la période considérée, LocURa4IoT a été lauréate sur l'appel 2021.
- UFT
 - Via l'UT2J, soutien à la structuration plateforme par la collaboration avec l'ingénieure qualité.

5.5 | Ressources humaines

Côté ressources humaines, les enseignants-chercheurs et personnels techniques permanents ont donné de leur temps, ainsi que plusieurs personnels contractuels (doctorants, post-doctorants et ingénieurs sur projets, etc.). Ce temps homme n'est pas comptabilisé dans le volet financier de ce rapport d'activité, bien qu'il constitue le poste de dépense le plus important.

Le tableau 5.1 synthétise l'ensemble des ressources humaines impliquées sur la plateforme sur la période considérée.

Table 5.1 – Ressources humaines impliquées sur la plateforme

Corps	Nombre	Détails	Implication	Financements
Enseignants-chercheurs	3	1 PR, 2 MC	20/10/5%	UT2J, INUC
Ingénieur de recherche	1	CDD 1 an	100%	FP
Ingénieur d'étude	1	CDD 2 ans	30%	FP, projets
Doctorants	4	-	variée	2 CIFRE, 2 bourses gouv
Post-doctorants	2	2 x 12 mois	10%	projets
Stagiaires M2	5	-	variée	FP, DAS SC, dpt ASR, projets
Stagiaires autres	3	2 M1, 1 DUT	variée	FP

FP = fonds propres de l'équipe IRIT/RMESS hébergés à l'UT2J.

DAS SC = Domaine d'Application Stratégique Smart City de l'IRIT

5.5.1 | Ingénieurs

- Octobre 2021 → septembre 2022 : Dr. Quentin Vey, IGR contractuel dédié à 100% sur la plateforme financé sur fonds propres de l'équipe IRIT/RMESS/UT2J,
- 2019 → 2020 : M. Benjamin Freeman, IGE contractuel sur fonds propres de l'équipe IRIT/RMESS/UT2J puis sur PRAPEN ; fort contributeur pour la plateforme.

En décembre 2021, Olivier Negro a rejoint l'IUT de Blagnac comme Ingénieur d'Etudes permanent en soutien aux plateformes de recherche du campus. Sur la prochaine période, il rejoindra le COPIL LocURa4IoT au titre de responsable technique de la plateforme.

5.5.2 | Thèses, HDR et post-doctorants ayant utilisé la plateforme

5.5.2.1 | HDR

- Dr. Adrien van den Bossche *Contribution aux Protocoles MAC et à la Localisation des nœuds dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil et l'Internet des Objets*. HDR soutenue le 6 juin 2018, INPT, à l'IRIT-UT2J, site IUT de Blagnac

5.5.2.2 | Thèses

- M. Julien Schrive *Vers des processus de ranging (distance/angle) robustes à la non ligne de vue dans les réseaux sans fil Ultra-Wide Band*, Juillet 2021 → Maintenant, van den Bossche-Dalcé. Détection et mitigation de la Non Ligne de Vue dans un contexte mono et multi-antennaire.
- M. Frédéric Bergeron, *Conception et mise en application d'un protocole de communication géocasté*, Stage doctoral réalisé entre Février 2019 → Juillet 2019. Validation expérimentale d'une proposition protocolaire sur le *geocasting*.
- M. Nicolas Gonzalez *Architectures protocolaires interopérables et multi-technologie pour le réseau de collecte dans l'Internet des Objets*, Janvier 2017 → Octobre 2020, Val-van den Bossche. Validation de proposition d'architectures réseaux pour les plateformes testbeds, large contribution à l'architecture MQTT de la plateforme, ainsi qu'aux interfaces.
- M. Ibrahim Fofana *Contribution aux architectures protocolaires pour systèmes de localisation des nœuds dans un réseau de capteurs sans fil*, Octobre 2013 → Juillet 2017, Val-van den Bossche. Implémentation et mesure de performances de plusieurs protocoles de *ranging* et algorithmes associés.

5.5.2.3 | Travaux de post-doctorants

- Dr. Quentin Vey, post-doctorant sur le projet POUCKET (avril 2019 → avril 2020)
- Dr. François Despaux, post-doctorant sur le projet GUINNESS (2015 → 2016)

5.5.3 | Stagiaires

- M. Quentin Hostettler, *Interaction contextualisée par la localisation des objets connectés*, Avril 2021 → Septembre 2021, R. Dalcé et F. Vella
- M. Amir Arraki, *Modes d'économie d'énergie sur un nœud communicant sans fil UWB*, Mars 2020 → Septembre 2020, A. van den Bossche
- Mme Wissal Mechi, *Détection de la Non-Ligne de Vue entre les équipements communicants sans-fil en contexte embarqué et contraint en ressources de calcul*, Mars 2020 → Septembre 2020, R. Dalcé
- Mme Radia Boudhou, *Localisation autonome et collaborative en milieu indoor complexe*, Mars 2020 → Septembre 2020, R. Dalcé
- Mme Anaïs Pailhes, *Représentation des données du testbed dans un environnement VR*, Mars 2020 → Septembre 2020, T. Val
- M. Florian Labarrere, *Mise en place d'un IDE en ligne*, Avril 2019 → Juin 2019, B. Freeman
- Mme Camille Bason, *Développement d'une interface de représentation des données de ranging sur tablette*, Avril 2020 → Août 2020, B. Freeman
- M. Julien Schrive, *Synchronisation fine par UWB*, Mars 2019 → Septembre 2019, T. Val

6 | Publications

6.1 | Publications de présentation de la plateforme

La plateforme a été présentée dans plusieurs articles scientifiques. Pour augmenter la saveur de ces articles descriptifs, un dataset analysé est systématiquement joint à l'article, et mis à disposition de la communauté académique, au format ODBL.

- Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val, *LocURa4IoT—A Testbed Dedicated to Accurate Localization of Wireless Nodes in the IoT*, IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 6, pp. 5437-5446, 15 March 2022, doi : 10.1109/JSEN.2021.3133066. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9638509>
- Adrien van den Bossche, Réjane Dalcé, Thierry Val, *LocURa4IoT : un testbed pour la localisation précise des nœuds 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. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03221021>
- Adrien van den Bossche, Réjane Dalce, Nicolas Gonzalez, Thierry Val, *LocURa : A New Localisation and UWB-Based Ranging Testbed for the Internet of Things*, IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2018), Sep 2018, Nantes, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02290012>

Un quatrième article a été soumis dans la session démo de la conférence LCN2022, à l'heure où ces lignes sont écrites.

6.2 | Publications de résultats issus de la plateforme

6.2.1 | Revues internationales

- Francois Despau, Adrien van den Bossche, Katia Jaffrès-Runser, Thierry Val, *N-TWR : An Accurate Time-of-flight-based N-ary Ranging Protocol for Ultra-Wide Band*, Ad Hoc Networks, Elsevier, 2018, 79, pp.1-19. <10.1016/j.adhoc.2018.05.016> <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02316841>
- Sami Mnasri, Adrien Van Den Bossche, Nejah Nasri, Thierry Val, *The 3D Deployment Multi-objective Problem in Mobile WSN : Optimizing Coverage and Localization* International Research Journal of Innovative Engineering, Research Engineering Journals, India, Vol. 1 N. issue 5, mai 2015. <https://oatao.univ-toulouse.fr/15315/>

Un article soumis à la revue IRBM est actuellement en navette à l'heure où ces lignes sont écrites.

6.2.2 | Conférences internationales

- Quentin Vey, François Spies, Baptiste Pestourie, Denis Genon-Catalot, Adrien van den Bossche, Thierry Val, Réjane Dalce, Julien Schrive, *POUCET : A Multi-Technology Indoor Positioning Solution for Firefighters and Soldiers* Eleventh International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2021), Nov 2021, Lloret de mar, Spain. pp.1-8 <https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/hal-03353056>
- Adrien van den Bossche, Réjane Dalce, Thierry Val, *Built In-Stack Localisation Services with ALO*, IFIP IEEE PEMWN 2020, Dec 2020, Berlin, Germany, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02984110>
- Quentin Vey, Réjane Dalce, Adrien van den Bossche, Thierry Val, *A distributed algorithm for range-based localization in sparse wireless networks* IEEE ITNAC 2020, Nov 2020, Melbourne, Australia, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02969947>
- Oana Andreea Hotescu, Katia Jaffrès-Runser, Adrien van den Bossche, Thierry Val, *Synchronizing Tiny Sensors with SISP : A Convergence Study*, 20th ACM Int'l Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems – MSWiM 2017, Nov 2017, Miami, Florida, United States. pp.279-287, <10.1145/3127540.3127564>, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02970658>
- François Despau Rossi, Katia Jaffrès-Runser, Adrien Van Den Bossche, Thierry Val, *Accurate and Platform-agnostic Time-of-flight Estimation in Ultra-Wide Band*, IEEE International Conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2016), Valencia, Spain, 04/09/16-07/09/16, IEEEExplore digital library, septembre 2016, <http://ieeexplore.ieee.org/document/7794820/> – <https://oatao.univ-toulouse.fr/17019/>

- Adrien Van Den Bossche, Rejane Dalce, Nezo Ibrahim Fofana, Thierry Val, *DecaDuino : An Open Framework for Wireless Time-of-Flight Ranging Systems*, IFIP Wireless Days (WD 2016), Toulouse, 23/03/16-25/03/16, IEEEExplore digital library, mars 2016. <https://oatao.univ-toulouse.fr/16899/>

6.2.3 | Conférences nationales

- Réjane Dalce, Antonio Serpa, Thierry Val, Adrien van Den Bossche., Frédéric Vella, Nadine Vigouroux, *La localisation par les objets connectés pour une meilleure autonomie de la personne*, 8èmes Journées d'étude sur la TéléSanté et dispositifs biomédicaux (JETSAN 2021), Mai 2021, Toulouse, Blagnac, France, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03203713>
- Nezo Ibrahim Fofana, Adrien Van Den Bossche, Rejane Dalce, Thierry Val, *Prototypage et analyse de performances d'un système de ranging pour une localisation par UWB (poster)*, Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP 2015), Paris, 22/07/15-24/07/15, IEEEExplore digital library, juillet 2015. <https://oatao.univ-toulouse.fr/15348/>

6.3 | Diffusion et vulgarisation

- *LocURa4IoT - Un testbed pour la localisation précise des nœuds dans l'IoT*, présentation aux 6ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Evaluation de Performance et l'EXpérimentation des Réseaux de Communication (CORES 2021), <https://youtu.be/prvM3zruLlQ>
- *Localiser ses objets connectés à 10cm dans un environnement intérieur*. Présentation au Capitole du Libre 2019, 20 novembre 2019, ENSEEIHT, Toulouse, France <https://youtu.be/Hhb7Mh0aw9s>
- *IDEALI1-DSP (Identification Assistée par la Localisation dans l'habitat Intelligent - Phase 1 : par Description Sémantique de la Position)*, Vidéo de vulgarisation et de démonstration du projet, https://youtu.be/FS47_ov9KOc

7 | Perspectives

Bien des plateformes de test ont été créées au fil du temps, et celles dont la genèse est fortement couplée à un unique projet de recherche sont souvent tombées dans l'oubli une fois ledit projet terminé. Dans cette section, nous présentons notre stratégie pour assurer la pérennité de LocURa4IoT, ainsi que les perspectives d'utilisation et d'évolution de ce testbed.

7.1 | Perspectives scientifiques

D'un point de vue scientifique, la structure et les déploiements de LocURa4IoT qualifient la plateforme pour des travaux diversifiés autour de la localisation d'intérieur. L'un des challenges consiste à obtenir des estimations de distance et/ou de position fiable en dépit des obstacles gênant la mesure, dans les situations de NLOS. Le plateau P1 (cf. §3.2.1) notamment, propose un déploiement dans les bureaux et *l'open space* avec des liens radio traversant des murs de natures différentes. Cette thématique fait d'ailleurs l'objet d'une thèse CIFRE récemment entamée avec Qorvo, le fabricant des *transceivers* UWB utilisés sur la plateforme. De plus, au-delà de la seule mesure de distance, l'angle d'arrivée, ou la différence de phase, permet d'entrevoir de nouveaux leviers pour parvenir à une localisation plus fiable et plus précise.

La technologie UWB ne se cantonne pas à la mesure de distance. Elle propose différents débits permettant une connectivité opportuniste entre les objets. Plusieurs perspectives se dégagent :

- en fonction des conditions de propagation, une adaptation du débit peut être envisagée. Des travaux sur le volet protocolaire peuvent être menés sur la plateforme en incluant l'impact du mouvement,
- en vue d'optimiser la livraison des paquets, différentes stratégies MAC peuvent être envisagées.

La plateforme a vocation à rester à la pointe de l'innovation technologique. Elle est actuellement une des rares à proposer l'*Ultra-Wide Band*. Sur cette technologie, de plus en plus de *Smartphones* proposent également maintenant cette technologie de communication. Il serait intéressant d'assurer l'interopérabilité entre ces nouveaux *Smartphones* et la plateforme afin de mettre en oeuvre des cas d'usages. Un renouvellement des noeuds intégrant un nouveau *transceiver* radio est également prévu courant 2022. Ce *transceiver* permettra également la mise en oeuvre de réseaux basés sur la couche physique IEEE 802.15.4-DSSS tels que 6LoWPAN ou 6TiSCH. Dans le même ordre d'idée, l'intégration de futures technologies pourrait être très intéressante, comme par exemple MATTER, ou l'IoT par satellites. Ces extensions de la plateforme ont pour objectif de fournir aux autres membres de l'équipe RMESS un outil de recherche adressant leurs intérêts scientifiques : ces derniers ne se limitent pas à la technologie UWB mais couvrent les diverses échelles des réseaux de communication sans fil.

L'un des enjeux scientifique concerne la réduction de l'empreinte énergétique des protocoles de *ranging* et de localisation. A ce jour, la mesure de la consommation énergétique par noeud n'est pas disponible sur LocURa4IoT, alors que cette fonctionnalité existe sur d'autres plateformes non-équipées de noeuds UWB. Une perspective consiste donc à équiper certains noeuds d'un dispositif de mesure d'énergie en temps-réel, visant à qualifier puis optimiser l'empreinte énergétique des protocoles.

La problématique de la localisation en extérieur est également visée dans les perspectives de la plateforme. A ce titre, et cela a été indiqué plus haut dans le budget réservé aux aspects prospectifs, des *gateways* LoRa supportant la mesure du temps de vol radio ainsi que des SDR ont été achetées et feront l'objet d'un stage au printemps 2022.

Enfin, une dernière perspective consiste à étudier les technologies de localisation sous l'angle des usages, en collaboration avec l'équipe IHM de l'IRIT (plus précisément Nadine Vigouroux, Frédéric Vella et Antonio Serpa). A ce titre, plusieurs champs applicatifs sont actuellement en cours d'étude, notamment l'habitat intelligent (via le plateau P2 (cf. §3.2.2) et les chaînes de productions industrielles. Ces aspects seront vraisemblablement détaillés dans le prochain rapport d'activité.

7.2 | Perspectives de structuration

Afin de permettre un fonctionnement optimal, la plateforme doit se doter d'un budget propre ainsi que d'une ressource humaine dédiée. Ces deux aspects constituent un point important pour la suite de l'existence de la plateforme.

A cet effet, plusieurs pistes sont actuellement à l'étude :

- Dans la suite de la labellisation par le laboratoire et l'Université, une demande de **labellisation par l'INS2I** est formulée. Cette labellisation permettra d'une part d'améliorer la visibilité de la plateforme grâce à son référencement par le CNRS, mais également de formuler une demande de

crédit pour le financement d'une ressource humaine contractuelle dédiée à la plateforme. Comme cela a été mentionné plus haut dans ce rapport, cette labellisation nécessite la mise en place d'un comité de pilotage incluant des membres extérieurs et des experts. Des personnalités ont été identifiées et certaines ont déjà répondu favorablement à cette invitation.

- Comme cela a été indiqué plus haut, la plateforme a entamé une démarche Qualité, via l'UT2J, visant à identifier très clairement ses missions, ses processus internes et ses interactions. Suite aux travaux réalisés dans cette démarche et en vue de se doter d'un budget propre, le comité de pilotage prévoit la mise en place de **plusieurs prestations d'expertise et de formation** réalisées à l'aide de la plateforme. Une démarche de **tarification auditable** est également entamée et devrait voir le jour courant 2022 ; elle permettra une identification claire des coûts réels inhérents à la plateforme, ainsi qu'une budgétisation transparente demandée par certains appels à projets imposant une tarification auditable.
- Enfin, la pérennisation de la plateforme passe par son **rattachement à la fédération FIT/IoT-lab**. A la fin de la période visée par ce rapport, la plateforme dispose d'un rattachement à la fédération via quelques noeuds connectés sur l'infrastructure de test accessible via <https://devwww.iot-lab.info/testbed/>, comme cela a été indiqué plus haut. Le rattachement au site de production devrait être opérationnel courant 2022.

8 | Références

- [1] Anne-Sophie Tonneau, Nathalie Mitton, and Julien Vandaele. How to choose an experimentation platform for wireless sensor networks? a survey on static and mobile wireless sensor network experimentation facilities. *Ad Hoc Networks*, 30 :115–127, 2015.
- [2] Pierre Brunisholz, Etienne Duble, Franck Rousseau, and Andrzej Duda. WaT : A Reproducible Testbed for Reproducible Network Experiments. In *IEEE INFOCOM International Workshop on Computer and Networking Experimental Research Using Testbeds (CNERT)*, INFOCOM Workshops, San Francisco, United States, April 2016. CNERT 2016 Best Demo Award.
- [3] Duan Rong. Wireless sensor networks in smart cities : The monitoring of water distribution networks case. 2016.
- [4] Adrien van den Bossche, Réjane Dalce, Nicolas Gonzalez, and Thierry Val. 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)*, Nantes, France, September 2018.
- [5] Stuart H. Kurkowski, Tracy Camp, and Michael D. Colagrosso. Manet simulation studies : the incredibles. *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 9 :50–61, 2005.
- [6] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12) :2292–2330, 2008.
- [7] Bodunrin Bakare and Joseph Enoch. A review of simulation techniques for some wireless communication system. 10 :60 – 70, 04 2019.
- [8] Priyanka Rawat, Kamal Deep Singh, Hakima Chaouchi, and Jean-Marie Bonnin. Wireless sensor networks : a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of Supercomputing*, 68 :1–48, 2013.
- [9] Esteban Egea-López, Javier Vales-Alonso, Alejandro Santos Martínez-Sala, Pablo Pavón-Mariño, and Joan García-Haro. Simulation tools for wireless sensor networks. 2005.
- [10] Sofian Ali Ben Mussa, Mazani Manaf, Kayhan Zrar Ghafoor, and Zouina Doukha. Simulation tools for vehicular ad hoc networks : A comparison study and future perspectives. In *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, pages 1–8, 2015.
- [11] Philipp Hurni, Markus Anwander, Gerald Wagenknecht, Thomas Staub, and Torsten Braun. Tarwis — a testbed management architecture for wireless sensor network testbeds. In *2011 7th International Conference on Network and Service Management*, pages 1–4, 2011.
- [12] Mullur Pushpalatha, Revathi Venkataraman, K. Sornalakshmi, and Tekumalla Ramarao. Implementation of wireless sensor network testbed - srmsensenet. *International Journal of Computer Applications*, 63 :1–4, 2013.
- [13] Emre Ertin, Anish Arora, Rajiv Ramnath, Vinayak S. Naik, Sandip Bapat, Vinodkrishnan Kulathurmani, Mukundan Sridharan, Hongwei Zhang, Hui Cao, and Mikhail Nesterenko. Kansei : a testbed for sensing at scale. In *IPSN*, 2006.
- [14] D. Raychaudhuri, I. Seskar, M. Ott, S. Ganu, K. Ramachandran, H. Kremo, R. Siracusa, H. Liu, and M. Singh. Overview of the orbit radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005*, volume 3, pages 1664–1669 Vol. 3, 2005.
- [15] Horst Hellbrück, Max Pagel, Alexander Köller, Daniel Bimschas, Dennis Pfisterer, and Stefan Fischer. Using and operating wireless sensor network testbeds with wisebed. In *2011 The 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, pages 171–178, 2011.
- [16] Jens Schroeder, Stefan Galler, Kyandoghere Kyamakya, and Klaus Jobmann. Nlos detection algorithms for ultra-wideband localization. In *2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pages 159–166, 2007.
- [17] Nicolò Decarli, Davide Dardari, Sinan Gezici, and Antonio D’Amico. Los/nlos detection for uwb signals : A comparative study using experimental data. pages 169 – 173, 06 2010.
- [18] Ardiansyah Musa, Gde Dharma Nugraha, Hyojeong Han, Deokjai Choi, Seongho Seo, and Juseok Kim. A decision tree-based nlos detection method for the uwb indoor location tracking accuracy improvement. *International Journal of Communication Systems*, 32(13) :e3997. e3997 dac.3997.

- [19] Quentin Vey, Réjane Dalcé, Adrien van den Bossche, and Thierry Val. A distributed algorithm for range-based localization in sparse wireless networks. In *2020 30th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, pages 1–8, 2020.
- [20] Nicolas Fourty, Adrien van den Bossche, and Thierry Val. An advanced study of energy consumption in an iee 802.15.4 based network : Everything but the truth on 802.15.4 node lifetime. *Computer Communications*, 35(14) :1759–1767, 2012. Special issue : Wireless Green Communications and Networking.
- [21] Réjane Dalce, Antonio Serpa, Thierry Val, Adrien van Den Bossche., Frédéric Vella, and Nadine Vigouroux. La localisation par les objets connectés pour une meilleure autonomie de la personne. In *8èmes Journées d'étude sur la Télésanté et dispositifs biomédicaux (JETSAN 2021)*, Toulouse, Blagnac, France, May 2021. LAAS (CNRS) and IRT (CNRS,INP Toulouse, UT1 Capitole, UT2 Jean Jaurès, UT3 Paul Sabatier) and IUT Blagnac (UTJ).
- [22] Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, Nezo Ibrahim Fofana, and Thierry Val. Decaduino : An open framework for wireless time-of-flight ranging systems. In *IFIP Wireless Days (WD 2016)*, pages 1–7, Toulouse, FR, May 2016. IEEEExplore digital library.
- [23] Viken Kojakian, Denis Genon-Catalot, Nicolas Fourty, Baptiste Pestourie, Réjane Dalce, Adrien van den Bossche, Thierry Val, Quentin Vey, François Spies, Christelle Bloch, Vincent Chapuis, Albert Da Silva, and Michel Stenta. Firefighter indoor localization (poucet). In *2019 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO)*, pages 1–2, 2019.