



HAL
open science

Contribution aux Protocoles MAC et à la Localisation des noeuds dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil et l'Internet des Objets

Adrien van den Bossche

► **To cite this version:**

Adrien van den Bossche. Contribution aux Protocoles MAC et à la Localisation des noeuds dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil et l'Internet des Objets. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2018. tel-03124758

HAL Id: tel-03124758

<https://hal.science/tel-03124758>

Submitted on 9 Feb 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.

Habilitation à Diriger les Recherches

Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT)

Contribution aux protocoles MAC et à la localisation des nœuds dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil et l'Internet des Objets

Adrien van den Bossche
Université de Toulouse 2 Jean Jaurès

Membres du jury :

- Pr. Thierry DIVOUX, CRAN, IUT de Nancy-Brabois, Université de Lorraine (Rapporteur)
Pr. François SPIES, FEMTO-ST, IUT Belfort Montbéliard, Université de Franche-Comté (Rapporteur)
Pr. Sylvain GIROUX, DOMUS, Université de Sherbrooke (Rapporteur)
Pr. Véronique VEQUE, L2S, Université Paris-Sud (Examinatrice)
Pr. Michel MISSON, LIMOS, IUT d'Aubière, Université Clermont Auvergne (Examinateur)
Pr. André-Luc BEYLOT, IRIT, ENSEEIHT, INPT (Correspondant)
Pr. Eric CAMPO, LAAS, IUT de Blagnac, UT2J (Examinateur)
Pr. Thierry VAL, IRIT, IUT de Blagnac, UT2J (Examinateur)

Soutenue le mercredi 6 Juin 2018, à 10h30
dans le Grand Amphithéâtre de l'IUT de Blagnac



Table des matières

Introduction	5
1 Problématiques MAC dans le contexte multi-saut des réseaux sans fil	9
1.1 Cadre général des travaux menés	10
1.2 Synthèse des directions, projets et encadrements	12
1.2.1 Projets	12
1.2.2 Encadrements	13
1.2.3 Publications	14
1.3 Détail des travaux	15
1.3.1 Conception, développement et évaluation des performances de MaCARI	15
1.3.2 Couche MAC sans hiérarchie	21
1.3.3 Synchronisation répartie et consensuelle	29
1.3.4 Collaboration MAC-NWK	38
1.3.5 Testbeds pour les <i>Wireless Sensor Network</i> (WSN) et le réseau de collecte de l'IoT	47
1.4 Conclusion et perspectives	63
2 Protocoles pour le <i>ranging</i> et la localisation	67
2.1 Cadre général des travaux menés	68
2.1.1 Contexte général et objectifs	68
2.1.2 Modèle et structure dans l'empilement protocolaire	69
2.2 Synthèse des directions, projets et encadrements	70
2.2.1 Projets	70
2.2.2 Encadrements	71
2.2.3 Publications	71
2.3 Détail des travaux	72
2.3.1 Localisation <i>range-based</i> par temps de vol sur nœud capteur à ressources limitées	72
2.3.2 IAL-RCSF et DecaDuino	83

2.3.3	Service de localisation indolore intégré dans la MAC	93
2.3.4	Synchronisation fine sur UWB	100
2.4	Conclusion et perspectives	111
3	Application des Réseaux de Capteurs à l’Habitat Intelligent	115
3.1	Cadre général des travaux menés	116
3.2	Synthèse des directions, projets et encadrements	118
3.2.1	Projets	118
3.2.2	Encadrements	119
3.2.3	Publications	119
3.3	Détail des travaux	120
3.3.1	Déploiement d’ADCF à la MIB	120
3.3.2	SUIPAD	121
3.3.3	ECAMI	122
3.3.4	SENUM/OVIPAD	125
3.3.5	De la Maison Intelligente vers le <i>True Life Lab</i>	128
3.4	Conclusion et perspectives	131
	Conclusion générale et perspectives de recherche	133
	Bibliographie	137
	Glossaire	145
A	Liens entre recherche et activités d’enseignement	147
A.1	Projets d’étudiants	147
A.1.1	Développement de protocoles sous OpenWiNo	147
A.1.2	Développement d’une IHM pour le testbed	148
A.2	WiNo/OpenWiNo dans l’enseignement	149
A.2.1	Développement d’applications informatiques pour les R&T	149
A.2.2	Initiation à l’Informatique Embarquée	149
A.2.3	MOOC/SPOC Objets Connectés	150
A.2.4	Protocoles de synchronisation (M2IOT UT/INSA/N7)	151
	Résumé	153

Introduction

Introduction générale

Pratiquant une recherche appliquée dans le domaine des Télécommunications et Réseaux Informatiques, plus particulièrement les réseaux sans fil, nous évoluons dans un champ disciplinaire où la technologie est en constante mutation, tant sur le plan technique que sur le plan des usages. Élaborer et diriger une recherche dans ce domaine est tout simplement passionnant, bien sûr de par la complexité des challenges scientifiques et techniques inhérents à ce domaine, mais également car les mutations sociétales de ces dernières années n'auraient pas été possibles sans l'apport des dernières avancées de ce domaine. Aujourd'hui, l'Homme vit au quotidien avec les réseaux de télécommunications, que ce soit directement par l'usage d'Internet et des objets connectés, mais aussi indirectement - sans même en avoir conscience parfois - avec le stockage de ses données sur le réseau par exemple. Ayant cette place importante et désormais incontournable, les réseaux doivent être efficaces et performants pour être bien utilisés. Pour ce faire, les systèmes matériels et logiciels gérant ces réseaux doivent être fiables et robustes, afin de proposer un service de qualité pour l'utilisateur.

Dans le domaine bien connu et qualifié par le terme générique de *Réseaux de Capteurs Sans Fil*, dans lequel la plupart de nos recherches se tiennent, nous considérons, comme largement répandu dans la littérature [1] [2], que nous sommes en présence de nœuds communicants sans fil équipés de capteurs physiques, voire d'actionneurs. Ces dispositifs électroniques sont fortement minimisés en taille, ce qui impacte leur capacité de traitement (mémoire et ressource processeur limitées) voire leur autonomie s'ils sont alimentés par une source énergétique limitée. Ces nœuds sont organisés en réseau et collaborent de façon coordonnée pour compenser leur capacités limitées [3]. Les applications potentielles sont très nombreuses : environnementales (surveillance de la faune et de la flore, surveillance sismique...), agro-alimentaire (agriculture raisonnée, surveillance de la chaîne du froid...), sécurité des biens et des personnes et e-santé (alarmes anti-intrusion, aide et assistance de personnes à leur domicile...), gestion de l'énergie (suivi de la production énergétique locale, surveillance de la consommation énergétique...), nucléaire et défense (surveillance des centrales, navires...), etc.

Afin d'être efficaces, performants et bien utilisés, les éléments matériels électroniques et les logiciels constituant le réseau doivent être optimaux, qu'il s'agisse du terminal de l'utilisateur ou d'un serveur, ou de n'importe quel élément de l'infrastructure. Nos recherches concernent principalement la connectivité de l'élément terminal côté utilisateur (capteurs/actionneurs connectés, dispositif d'interaction, etc.) avec ce premier maillon du réseau, généralement sans fil, qui permet la connexion du terminal au reste du monde. Cette connexion peut être directe d'un terminal à un autre terminal, ou réalisée via un réseau d'opérateur, ou bien encore via une infrastructure auto-gérée constituée d'une ou plusieurs passerelles (comme généralement considéré dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil). Les terminaux doivent notamment être suffisamment économes en énergie pour être utilisés sans interruption de fonctionnement, notamment en usage mobile lorsqu'ils sont alimentés par une source énergétique autonome ; ceci constitue un

premier verrou que les technologies actuelles ont bien du mal à traiter efficacement : il suffit d'observer la durée de vie d'un *smartphone* ou de n'importe quel objet connecté de la vie courante pour s'en persuader. Cette difficulté est très problématique du point de vue de l'usage : en effet, pour être efficace, un objet connecté doit être le plus transparent possible. Prenons comme exemple un détecteur de chute connecté pour personne âgée : si cet objet connecté, porté par la personne, doit être rechargé toutes les deux à trois semaines, il est certain que celui-ci sera très vite délaissé par l'utilisateur et ne sera d'aucune efficacité en cas de nécessité.

Un second verrou très actuel est la localisation des objets ou, plus généralement, la localisation des données produites par un objet ou un réseaux d'objets connectés. L'objectif ici est de pouvoir ajouter une information de type *position* à la donnée pour être exploitée de façon optimale. Cette position peut être un couple latitude/longitude, un jeu de coordonnées 2D ou 3D dans un repère local à un bâtiment, ou bien encore plus basiquement une proximité à une référence. D'abord exprimée comme un besoin du domaine de la logistique et transports, la localisation des données est de plus en plus demandée par les applications et doit généralement être associée à une indication sur l'instant de production des données. On parle alors d'informations spatio-temporelles.

Nos recherches et contributions ont porté principalement sur trois grandes problématiques :

1. **Problématiques du contrôle d'accès au médium (MAC) dans le contexte multi-saut des réseaux sans fil** : dans ce premier thème, nous traitons des travaux de recherche disciplinaires en réseaux et protocoles, dans la suite directe de notre thèse de doctorat. Nous y traitons de protocoles et d'algorithmes ad hoc et répartis pour la conception de méthodes d'accès au médium sans fil à rendez-vous et pseudo déterministes ; l'objectif est de minimiser les consommations énergétiques et favoriser la *Quality of Service* (QoS) de niveau 2. Démarrés dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil au milieu des années 2000, la migration est lente mais certaine vers le contexte du réseau de collecte (*Device Layer*) de l'Internet des Objets, dix années après.
2. **Protocoles pour le *ranging* et la localisation** : dans ce deuxième thème, nous regroupons les travaux centrés sur les capacités d'auto-localisation d'un nœud communicant sans fil par l'usage de propriétés du signal radio. Cette thématique de recherche vise à intégrer des fonctions de mesures de distances entre nœuds (*ranging*), puis des algorithmes de localisation 2D ou 3D, etc. directement dans l'empilement protocolaire, pour localiser¹ ou aider à localiser les nœuds de façon *indolore*, c'est-à-dire en minimisant les conséquences en termes d'*Surcharge protocolaire* (*Overhead*) et de consommation énergétique.
3. **Application des Réseaux de Capteurs à l'Habitat Intelligent** : dans ce troisième thème, nous présentons nos travaux réalisés parallèlement à nos activités de recherche disciplinaires, dans le cadre de l'équipe pluridisciplinaire de la Maison Intelligente de l'IUT de Blagnac (MIB)[4], rejointe en 2011. Ces travaux visent à mettre en application notre recherche disciplinaire dans le contexte des habitats intelligents, et, plus généralement, les systèmes socio-techniques pour l'aide, l'assistance et l'autonomie des personnes âgées et/ou personnes présentant un handicap, à leur domicile. Les problématiques 1 et 2 sont envisagées sous cet angle et les travaux disciplinaires instanciés dans ce contexte applicatif.

Notons enfin que jamais la diffusion des savoirs et de la connaissance humaine n'a été aussi simplifiée. De nos jours, même la diffusion des savoir-faire et des procédés se libèrent, la diffusion d'algorithmes, de plans, etc. sous *licence libre* en est un excellent exemple. Notre activité de recherche s'appuie fortement sur ce principe pour diffuser systématiquement les outils développés, non seulement au reste de la communauté scientifique, mais également aux usagers qui souhaiteraient s'emparer des travaux pour y contribuer, à condition de diffuser à leur tour les résultats obtenus pour la communauté.

1. on parle aussi de *positionner*

Synthèse des directions, projets et encadrements

Ce document détaille donc les orientations de recherche que nous avons développées et co-dirigées pendant nos premières années en tant qu'enseignant-chercheur. C'est ainsi que les encadrements, doctoraux et autres, ainsi que les projets, directions et participations, sont mentionnés.

Pendant ces années, nous avons eu l'opportunité :

- de co-encadrer **cinq thèses de doctorat** (encadrement à 50%). Quatre sont soutenues, une est en cours,
- de co-encadrer **deux thèses de doctorat en co-tutelle** (encadrement à 25%) soutenues,
- de co-encadrer **deux post-doctorants** (50% et 33%)
- d'encadrer le stage de **cinq étudiants** en deuxième année de **Master** ou en dernière année d'école d'ingénieur,
- d'encadrer ou co-encadrer **quatre ingénieurs d'études**.

La frise chronologique en figure 1 illustre ces différents encadrements. Le nombre en colonne de gauche indique le numéro du thème traité, sur la base de la numérotation présentée plus haut. Nous reviendrons sur la plupart de ces encadrements dans les chapitres de ce manuscrit.

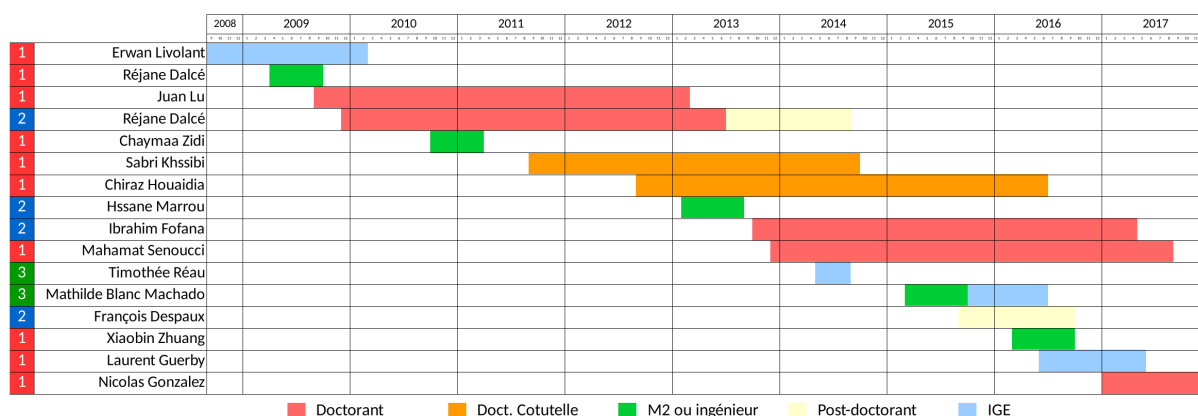


FIGURE 1 – Encadrements

En terme de projets et contrats, pendant ces années, nous avons participé à :

- **quatre projets financés en tant que porteur**, avec deux financements Région/FEDER, un financement par la Société d'Accélération du Transfert de Technologies (SATT) et un dernier par la Commission Valorisation de l'UT2J,
- **trois projets sans contrat en tant que porteur** ; ces projets ont été financés sur le budget récurant de l'équipe, sur des reliquats ou via l'IUT,
- **cinq projets en tant que participant actif**, sur des financements ANR, CNRS-DGRS, PEPS-CNRS, MSHS-T et partenariat public-privé.

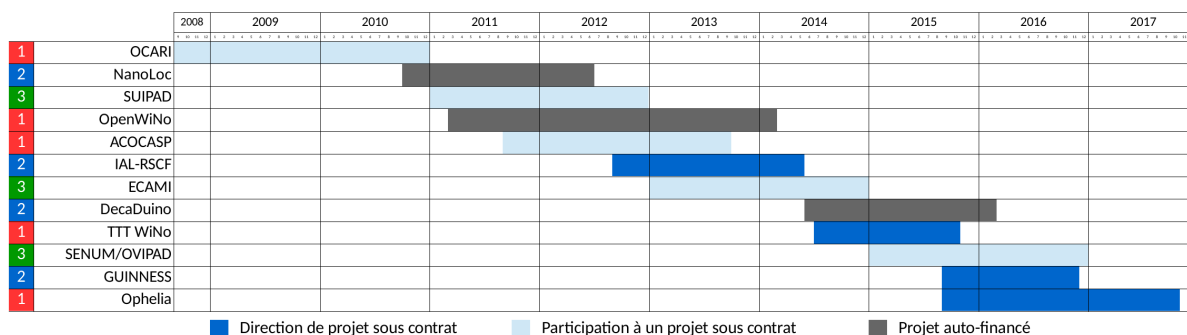


FIGURE 2 – Projets : participations et directions

La frise chronologique en figure 2 illustre ces différentes participations aux projets de recherche. Ces projets et contrats seront détaillés dans les chapitres suivants.

La structure du document est la suivante : après cette introduction, nous avons choisi de présenter les activités de recherche qui ont été conduites et dirigées, ainsi que les encadrements liés, en les regroupant dans les trois grands thèmes scientifiques présentés plus haut. Chaque thème fait l'objet d'un chapitre, lui-même découpé en sections pour chaque activité de recherche. Une conclusion et une présentation des perspectives de recherche clôtureront le manuscrit. En complément, dans l'annexe A de ce document, nous présenterons les activités pédagogiques que nous avons développées en lien avec nos activités de recherche et nous terminerons ce document par un *Curriculum Vitae* détaillé présentant également nos activités pédagogiques et administratives.

Chapitre 1

Problématiques MAC dans le contexte multi-saut des réseaux sans fil

Dans ce chapitre, nous présentons nos encadrements de travaux de recherche typiquement disciplinaires en Réseaux et Protocoles, dans la suite directe de notre thèse de Doctorat. Par rapport à nos travaux doctoraux, nous orientons ces recherches sur les algorithmes et les approches protocolaires ad hoc et réparties, tout en restant focalisés sur les couches d'accès au médium à rendez-vous et pseudo-déterministes en vue de minimiser les consommations énergétiques et favoriser la Qualité de Service au niveau contrôle d'accès au médium. Au départ situés dans le contexte des Réseaux de Capteurs Sans Fil, nous constatons une migration lente mais certaine vers la thématique de l'Internet des Objets.

Sommaire

1.1	Cadre général des travaux menés	10
1.2	Synthèse des directions, projets et encadrements	12
1.2.1	Projets	12
1.2.2	Encadrements	13
1.2.3	Publications	14
1.3	Détail des travaux	15
1.3.1	Conception, développement et évaluation des performances de MaCARI	15
1.3.2	Couche MAC sans hiérarchie	21
1.3.3	Synchronisation répartie et consensuelle	29
1.3.4	Collaboration MAC-NWK	38
1.3.5	Testbeds pour les WSN et le réseau de collecte de l'IoT	47
1.4	Conclusion et perspectives	63

1.1 Cadre général des travaux menés

Si la caractéristique *sans fil* permet théoriquement le déploiement simplifié des réseaux, il convient cependant de considérer que cette simplicité apparente entraîne une complexité non négligeable pour le système, notamment pour ce qui nous concerne, au niveau des protocoles de communication et des algorithmes qui leur sont associés. Dans nos travaux, nous visons un objectif de déploiement du réseau *minimisant les contraintes* : nous considérons par exemple que l'ensemble des nœuds est potentiellement limité en énergie, parce qu'alimenté par une source énergétique finie, même si un sous-ensemble de ces nœuds peut être soulagé de cette limitation. Dans les protocoles conçus, nous prévoyons donc des options d'économie d'énergie débrayables si nécessaire. *Si la limitation énergétique du nœud est totalement transparente pour l'utilisateur, c'est alors une contrainte de déploiement en moins*, et les nœuds peuvent être placés à des endroits sans énergie si l'application le requiert¹. Il est courant de considérer que cette économie d'énergie peut être réalisée en réduisant l'activité de communication des nœuds au niveau de la couche de contrôle d'accès au médium, *Medium Access Control* (MAC).

Les travaux présentés dans ce chapitre concernent donc nos recherches dans le cadre purement disciplinaire des méthodes d'accès au médium pour les réseaux sans fil, dans une suite directe de nos travaux de doctorat [5]. L'objectif de ces travaux est de concevoir, développer et évaluer les performances de protocoles d'accès au médium à rendez-vous pour les réseaux sans fil. Par la notion de rendez-vous, nous entendons ici le fait qu'un couple ou un ensemble de nœuds va rechercher un instant commun pour accéder au médium, l'un en émission (source), l'autre en réception (destination). Ce rendez-vous est négocié à l'avance, ce qui permet d'activer :

1. **une économie d'énergie** : les nœuds étant généralement contraints en énergie et l'état de réception étant systématiquement le plus consommateur [6], le rendez-vous permet d'activer la veille du nœud en attendant le rendez-vous,
2. **une garantie de l'accès au médium** : les nœuds ayant contracté un rendez-vous au préalable, si ce rendez-vous est annoncé aux autres nœuds du réseau par protocole, alors ces derniers peuvent éviter d'utiliser la ressource commune au moment du rendez-vous pour ne pas provoquer de collision de trames. Par cette propriété, il est possible d'activer des options de Qualité de Service au niveau contrôle d'accès au médium.

Bien entendu, en créant des cycles de rendez-vous et en jouant sur la fréquence de ces cycles, chacune de ces deux caractéristiques peut-être ajustée pour coller au cahier des charges de l'applicatif ; pour des applications contraintes sur le plan énergétique, les rendez-vous sont pris et maintenus cycliquement, mais minimisés en nombre. Leur fréquence est calculée pour permettre un réveil du nœud et un acheminement du trafic en un temps acceptable par l'application. Pour des applications contraintes temporellement, des cycles fréquents pourront être mis en place, doublés éventuellement de prises pro-actives de rendez-vous fréquents, afin d'écouler le trafics, à minima, lors de ces rendez-vous. Si la contrainte énergétique est faible ou inexistante, les périodes de sommeil peuvent être remplacées par des périodes d'accès à contention ; le rendez-vous constitue alors une échéance lointaine mais certaine pour écouler le trafic, au pire, dans un temps borné. Ces différents leviers ont largement été utilisés dans les travaux menés qui sont présentés dans ce chapitre.

Dans cet objectif, nous avons eu l'opportunité de diriger plusieurs études dans lesquelles nous avons exploré différentes approches :

1. Nous discuterons de ce point au chapitre 3 dans le cadre de *déploiements éphémères* de réseaux de capteurs pour des applications dans le maintien à domicile.

- **Avec ou sans contrainte topologique.** Dans le contexte des WSN, de nombreux travaux de la littérature, tels que [7] ou [8] par exemple, s'appuient sur des topologies hiérarchiques de type arborescentes pour traiter la problématique énergétique. Grâce à cette hiérarchie, qui peut être auto-générée ou imposée par installation, les nœuds ont une place bien déterminée dans une organisation, avec un unique parent ascendant et un ou plusieurs descendants. Les périodes d'activités et les périodes de veilles sont alors clairement établies; cependant, la reconstruction de l'arborescence entraîne une certaine complexité en cas de modification des liens, ce qui est relativement courant en sans fil. Dans certains travaux, les communications ne sont pas organisées en hiérarchie, ce qui permet une plus grande dynamique du réseau et des liens; cependant, l'organisation des accès au médium est plus complexe et l'alternance des phases de veille et d'activité plus fine à mettre en place,
- **Dans le respect de la norme des protocoles ou volontairement en rupture avec les normes.** Si la standardisation est fondamentale dans le domaine des Télécoms et Réseaux - il est impossible de créer un réseau d'éléments hétérogènes sans une base commune - les deux approches ont leur intérêt pour la recherche académique : contribuer sur les réseaux et protocoles en choisissant de respecter les normes en place est un gage de meilleure intégration dans l'écosystème existant. Cependant, les protocoles normalisés sont généralement figés et laissent peu de place à l'innovation. La rupture, si elle est a priori plus risquée, permet d'aller plus loin dans l'innovation, mais elle va de pair avec des difficultés d'incompatibilité, par toujours visibles par ailleurs,
- **Mettant en œuvre des couches physiques en rupture.** La grande majorité des travaux, dans les réseaux de capteurs, s'appuie en particulier au début de nos recherches, sur une unique couche physique 2.4 GHz DSSS normalisée par le standard IEEE 802.15.4-2006 [9]. Pourtant, explorer d'autres moyens de transmission (tels que les bandes hyper étroites sub-GHz ou la lumière) constitue là encore un moyen fort pour l'innovation; c'est ce que nous désignons par *l'utilisation de couches physique en rupture*. Alors que cette approche était très originale quand nous nous y sommes intéressés il y a près de dix ans, à l'heure actuelle, des technologies comme LoRa et SigFox sont largement utilisées. De plus, c'est une lapalissade que d'affirmer que le domaine des Réseaux et Télécoms est en constante évolution : les technologies de communication et de mise en réseaux sont rapidement obsolètes. De ce fait, il nous semble pertinent de s'appuyer, dans nos contributions, sur de multiples couches physiques. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point précis plus loin (§1.3.5.2.2) dans ce document,
- **Fortement synchronisé ou non.** La synchronisation est une thématique fondamentale pour les protocoles de communication sans fil, notamment si on considère le volet d'économie d'énergie [10] [11]. Les protocoles de synchronisation permettent d'obtenir des temps précis pour convenir de rendez-vous entre nœuds. Cependant, ils induisent une charge protocolaire et des algorithmes de traitement associés potentiellement coûteux en ressources (médium, processeur, mémoire) et donc, en énergie. Dans ce contexte, il est intéressant de pouvoir comparer les deux approches et travailler sur des topologies non nécessairement hiérarchiques pour parvenir à synchroniser les nœuds, ce qui est assez novateur,
- **Basé interférences du voisinage à n sauts.** Une des difficultés majeures des protocoles MAC est la collision des trames de données. Pour tout réseau sans fil, cette problématique est augmentée de part la non-égalité de l'état du médium de transmission pour chaque nœud du réseau. C'est ainsi, par exemple, qu'à été posé le problème bien connu de la *station cachée* [12]. Dans un réseau sans fil multi-saut, cette problématique est encore augmentée car non seulement la collision est possible, mais le message transmis peut également générer une interférence qui peut dépasser sa portée radio. C'est ainsi que de nombreux travaux tel que [13] tentent d'augmenter les performances des protocoles de communication sans fil en tenant compte du voisinage à n sauts, ce qui, là encore, est susceptible d'augmenter la charge protocolaire.

Dans le cadre des différents travaux de recherche que nous avons dirigés, nous avons généralement cherché à proposer des protocoles d'auto-organisation du réseau en minimisant la centralité de la gestion, ainsi que la hiérarchie. Il s'agit bien d'une auto-organisation, puisque les nœuds tentent de s'organiser seuls, en collaboration avec le reste du groupe. Pour que cette gestion soit la plus décentralisée possible, nous avons cherché à ce que chaque nœud du réseau *diffuse* (*broadcast*) sa propre vision de la situation pour que les nœuds voisins puissent prendre des décisions les plus pertinentes possibles. Le canal utilisé en diffusion présente de nombreux avantages : pour une MAC dans un contexte multi-saut, il permet d'atteindre l'ensemble des voisins à un saut avec un unique message ; il est cependant non fiable mais si les algorithmes sont tolérants à la perte de message, alors ce mode de transmission permet d'entrevoir des approches *opportunistes* pour arriver à organiser le réseau. C'est là une première problématique commune que nous avons cherché à résoudre dans la plupart des travaux présentés dans ce chapitre. Les protocoles proposés ADCF (§1.3.2.2), SiSP (§1.3.3.2.2) et plus tard, au chapitre 2, BB-TWR (§2.3.3.2) fonctionnent sur ce principe.

Sur le plan de l'évaluation des performances des protocoles, généralement, les travaux menés consistent à proposer un protocole et à l'évaluer conjointement par simulation et en réel sur *testbed*. Les *testbeds* actuels ne nous donnant pas entièrement satisfaction, nous avons alors développé notre propre architecture de prototypage rapide *OpenWiNo* (*Open Wireless Node*).

Enfin, alors que les premiers travaux s'inscrivaient dans le contexte des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF), en anglais WSN, nous parlons plus fréquemment dans les derniers travaux de l'Internet des Objets, en anglais *Internet of Things* (IoT), et plus précisément du réseau de collecte de l'IoT (DL-IoT, *Device-Layer IoT*) dans les plus récentes contributions. Bien que l'IoT désigne un réseau sans fil en lien avec le réseau Internet, au niveau 2 de l'empilement protocolaire, les problématiques sont extrêmement semblables.

1.2 Synthèse des directions, projets et encadrements

1.2.1 Projets

La figure 1.1 illustre la chronologie de nos projets majeurs réalisés sur la période. Une distinction est faite entre les projets sous contrat - avec financement - en direction (au nombre de 2) et en participation (2), mais aussi sans contrat - financement par le budget récurrent de l'équipe, reliquats, etc. (1).



FIGURE 1.1 – Projets sur la thématique MAC

- **2007-2010 (4 ans) OCARI** (ANR) *Optimisation des Communications Ad hoc pour les Réseaux Industriels*. Création de MaCARI, une couche MAC contrainte temporellement basée sur une topologie en arbre et une cascade de *beacons*, développée conjointement avec le LIMOS. Simulation sous NS2, implémentation sur nœuds IEEE 802.15.4 de TELIT (ex. OneRF), proposition d'une couche MAC tirant profit de la réutilisation spatiale et temporelle avec les *Simultaneous Garanted Time Slot* (SGTS),

- **2011-2013 (2 ans) ACOCASP** (CNRS/DGRS-Echange de chercheurs) *Architectures de COmmunication basées sur réseaux de CApteurs pour la Surveillance de Personnes*. Collaboration entre l'IRIT/CNRS de Toulouse, équipe IRT – IUT Blagnac, France et le Laboratoire CRISTAL de l'ENSI – Univ. De la Manouba, Tunis, Tunisie (2011-2014). Échange de chercheurs, co-encadrement de la thèse de Sabri Khssibi.
- **2011-2014 (3 ans) OpenWiNo** (Projet non financé) *Open Wireless Node*. OpenWiNo est notre environnement de prototypage rapide pour les RCSF et le réseau de collecte de l'IoT. Développé petit à petit à la fin du projet OCARI, nous aurions souhaité le développer dans le cadre d'un projet ANR JCJC (Jeune Chercheuse-Jeune Chercheur), déposé trois années de suite sans succès. La plate-forme, à la fois matérielle et logicielle, a progressivement et finalement vu le jour sans l'aide de l'ANR :) OpenWiNo est désormais l'outil de base utilisé dans la plupart de nos travaux actuels. Nous y reviendrons plus loin dans ce chapitre.
- **2014-2015 (14 mois) TTT WiNo** (SATT UFT) *Valorisation d'OpenWiNo par un transfert à Snootlab*, avec le support de Toulouse-Tech-Transfer, la SATT de l'Université Fédérale de Toulouse. Le logiciel a pu être transféré sous licence GPL, en commun accord entre Snootlab et l'IRIT. Snootlab fabrique désormais le *hardware* TeensyWiNo, l'un des matériel utilisable avec le logiciel OpenWiNo.
- **2015-2017 (2 ans) Ophelia** (Région MPY/FEDER) *Open Framework for Real-Life IoT Applications* s'inscrit dans la suite du projet TTT WiNo mentionné ci-dessus. Il vise à poursuivre le travail entamé avec OpenWiNo en développant un nouveau *hardware* (Snootlab) et de nouveaux protocoles de communication sans fil (IRIT), l'ensemble dans un objectif de meilleures performances énergétiques, mais aussi de plus longues portées radio par l'usage de la technologie LoRa.

Ces travaux sont détaillés dans les sections suivantes.

1.2.2 Encadrements

Dans la catégorie des travaux présentés dans ce chapitre, nous comptons dix encadrements : 3 encadrements de niveau Master (M2 ou PFE ingénieur), 3 co-encadrements de thèse à 50%, 2 co-encadrements de thèse en co-tutelle à 25%, et 2 encadrements d'ingénieurs d'études (IGE). La figure 1.2 illustre la chronologie des différents encadrements et co-encadrements réalisés sur la période.

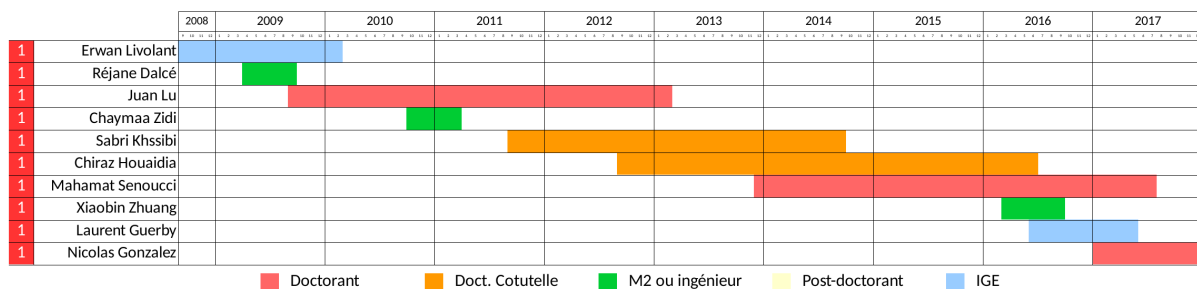


FIGURE 1.2 – Encadrements sur la thématique MAC

Les encadrements sont énumérés ici chronologiquement :

- **2008-2010 (18 mois) : encadrement de M. Erwan Livolant, ingénieur d'études** sur le projet ANR OCARI. Développement de MaCARI, couche MAC développée conjointement par le

LIMOS et le LATTIS EA4155 dans le cadre du projet ANR OCARI. Méthodes de développement, analyse des performances sur *testbed* réel, valorisation.

- **2009 (6 mois) : encadrement de Mlle Réjane Dalcé dans son stage de Master Recherche.** Étude et développement d'une MAC pour un réseau sans fil dans le cadre du projet ANR OCARI évoqué ci-dessus.
- **2009-2013 (42 mois) : co-encadrement (50%) de la thèse de Mlle Juan Lu.** Proposition et évaluation des performances d'une couche MAC décentralisée, économe en énergie et avec garantie d'accès au médium sans collision ADCF-MAC pour les réseaux de capteurs sans fil, avec déploiement à la Maison Intelligente de Blagnac.
- **2010-2011 (6 mois) : encadrement de Mlle Chaymaa Zidi dans son stage de Master Recherche.** État de l'art des protocoles de synchronisation pour les réseaux de capteurs sans fil.
- **2011-2015 (48 mois) : co-encadrement (25%) de la thèse de M. Sabri Khssibi.** Proposition et évaluation des performances de mécanismes d'optimisation de la MAC IEEE 802.15.4 pour les BANs, dans le cadre du projet CANet
- **2012-2015 (42 mois) : co-encadrement (25%) de la thèse de Mme Chiraz Houaidia.** Proposition et évaluation des performances de métriques de routage basées sur des collaborations PHY-MAC-NWK dans un contexte IEEE 802.11 et réseaux d'accès métropolitains collaboratif, dans le cadre de la collaboration avec l'opérateur Tetaneutral.net.
- **2013-2017 : co-encadrement (50%) de la thèse de M. Mahamat Senoussi.** Proposition et évaluation des performances par *testbed* de protocoles MAC multi-canaux aléatoires dans le contexte multi-saut.
- **2016 (6 mois) : encadrement de M. Xiaobin Zhuang dans son stage de Master** sur le projet Région/FEDER Ophelia. État de l'art et *benchmarking* des protocoles *long-range* pour les réseaux de capteurs sans fil et le réseau de collecte de l'IoT.
- **2016-2017 (12 mois) : encadrement de M. Laurent Guerby, ingénieur d'études** sur le projet Région/FEDER Ophelia. Conception et déploiement d'un *testbed* large échelle pour de vraies applications utilisant l'Internet des Objets. Protocoles MAC, analyse des performances sur *testbed* réel, valorisation.
- **2017-aujourd'hui : co-encadrement (50%) de la thèse de M. Nicolas Gonzalez.** Architectures protocolaires interopérables et multi-technologie pour le réseau de collecte dans l'Internet des Objets.

Ces encadrements sont détaillés dans les sections suivantes.

1.2.3 Publications

Les travaux présentés dans ce chapitre ont donné suite à :

- Dix publications dans des revues internationales (Ad-Hoc Networks, Computer Networks, Computer Communications, Wireless Sensor Networks...),
- Une vingtaine de publications dans des conférences internationales avec comité de lecture et actes publiés (MSWIM, WCNC, VTC, ETFA, AICCSA, CIVEMSA, Wireless Days...).

1.3 Détail des travaux

Dans ce chapitre et le suivant, le détail des travaux est systématiquement présenté par activité de recherche et avec le même plan : tout d’abord, un ou plusieurs blocs grisés résument les encadrements de recherche rattachés à l’activité ; viennent ensuite un rappel du contexte, la problématique, les axes de recherche développés et principales contributions liées à l’activité de recherche. La problématique principale de chaque activité est mise en évidence dans un encart bleu. Les résultats les plus marquants sont ensuite évoqués. Les conclusions et la mise en perspective de l’activité par rapport à notre projet global, sont enfin présentées. Pour finir, les principales publications sont mentionnées.

1.3.1 Conception, développement et évaluation des performances de MaCARI

Encadrement de M. Erwan Livolant, ingénieur d’études sur le projet OCARI

« Développement et implémentation de MaCARI, une couche MAC pour le réseau OCARI »

Période : octobre 2007 - mars 2009 (18 mois)

Financement : projet ANR OCARI

Encadrement de Mlle Réjane Dalcé dans son stage de M2R

« Étude et développement d’une méthode d’accès au médium pour un réseau sans fil »

Période : février 2009 - juillet 2009 (6 mois)

Financement : projet ANR OCARI

1.3.1.1 Contexte des recherches menées

Suite à notre thèse de Doctorat, nous avons été rattaché au projet OCARI (*Optimisation des Communications Ad hoc pour les Réseaux Industriels*) porté par EDF R&D, dont notre laboratoire de l’époque, ICARE EA3050 puis le LATTIS EA 4155, était alors partenaire. L’objectif de ce projet était de concevoir une technologie de réseau de capteurs sans fil présentant des caractéristiques de garanties sur le plan temporel où l’ensemble des nœuds devaient pouvoir être alimentés par batteries, et donc, présenter des fonctionnalités d’économie d’énergie. De plus, le consortium OCARI comptait l’équipe HIPERCOM2 (INRIA Paris - Rocquencourt) (maintenant, EVA) de l’INRIA spécialisée dans le routage des MANETs, notamment dans les algorithmes de coloration en vue de faire de la réutilisation spatiale du médium à n sauts. La séparation arbitraire entre mécanismes d’accès au médium (à la couche 2) et mécanismes de routage (couche 3) pouvait être remise en question, dans un objectif de gain énergétique : si nous n’avions pas parlé de *cross-layering* à l’époque, nous étions pourtant bien dans cette approche, bien que les aspects *modèle* de cette approche n’aient pas été traités dans ce projet.

Au delà des considérations purement scientifiques et techniques, le porteur de projet souhaitait se différencier des solutions de type WirelessHART et ISA100, justifiant les propositions faites dans le cadre de ce projet, propositions concurrentes à ce qui allait être ensuite 802.15.4e, TSCH et 6TISCH par exemple [14]. Sur le plan applicatif, les réseaux OCARI devaient servir à la surveillance d’installations de production d’énergie de type hydro-électriques et nucléaires. DCNS, également partenaire du projet, devait pouvoir déployer de tels réseaux sur des frégates et navires militaires, là aussi à des fins de *monitoring*.

Scientifiquement, nos travaux sur MaCARI prenaient place dans la suite directe de notre thèse de doctorat, où nous avons proposé une méthode d’ordonnement des communications sans fil totalement

déterministe avec accès au médium concurrents et sans collision. Ce projet ANR nous a non seulement permis de poursuivre le travail [15] entamé pendant la thèse et, comme bien souvent dans cette situation, confronter les propositions académiques à la réalité de l'industrie, avec les difficultés liés à l'implémentation des solutions proposées, notamment.

1.3.1.2 Axes de recherche et principales contributions

Au niveau du contrôle d'accès au médium, les deux verrous concernaient donc l'économie d'énergie pour tous les nœuds, ainsi qu'une possibilité de Qualité de Service permettant à certains trafics d'être acheminés dans un temps limité. Dans le standard IEEE 802.15.4-2006 [16], la gestion de l'énergie des nœuds feuilles est décrite et implémentée dans les solutions industrielles. Les nœuds feuilles contraints en énergie peuvent utiliser le mode *beacon* ou le mode *non-beacon* [17]. Cependant, pour activer l'économie d'énergie de l'ensemble des nœuds - y compris les routeurs - seul le mode *beacon* est utilisable. Ce mode prévoit la création d'une topologie *en arbre* dont la racine est l'un des routeurs du réseau, désigné par CPAN (Coordinateur de PAN). Le choix de ce routeur au rôle central est donc stratégique; il est généralement choisi lors de l'installation du réseau. Les routeurs voisins à un saut du CPAN sont ses descendants directs, puis les suivants, etc. jusqu'à une profondeur maximale paramétrable par installation. Dans la phase de découverte du voisinage et de construction de l'arbre, le protocole cherche à minimiser la profondeur de l'arbre, ce qui a pour conséquence négative de favoriser la sélection de liens de piètre qualité au détriment de « bons liens » qui augmenteraient la profondeur de l'arbre². De plus, de part l'unicité du parent, la construction logique de la topologie en arbre supprime systématiquement des chemins potentiellement plus courts, par rapport à une topologie *mesh*, ce qui, là encore, peut augmenter la latence du transport des données dans un routage multi-saut (figure 1.3).

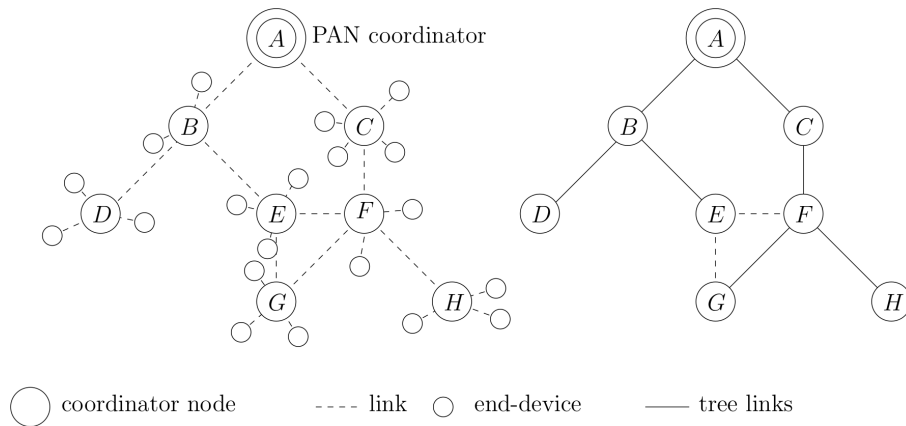


FIGURE 1.3 – Représentation d'une topologie physique et logique après organisation en arbre

En terme de contrôle d'accès au médium, le mode *beacon* va de pair avec l'organisation temporelle en supertrame [16]; chaque supertrame débute par un *beacon*, suivi d'une *Contention Access Period* (CAP) puis d'une *Contention Free Period* (CFP) optionnelle, qui contient 0 à n (GTS). En dehors de la période de la supertrame, le nœud doit chercher à économiser son énergie; il active alors le mode *somnolence* (*doze*). Le standard spécifie que tout routeur à une profondeur p de l'arbre est actif pendant sa supertrame, mais aussi celle de son *père*, c'est-à-dire le routeur de profondeur $p - 1$ auquel il est *associé*. Le TG 15.4b [18]

2. Ce problème est un défaut bien connu des protocoles de routage à vecteurs de distance.

prévoyait alors deux mécanismes pour éviter les collisions de *beacons* : l'approche *Time Division* (TD) et l'approche *Beacon Only Period* (BOP) (figure 1.4) [19].

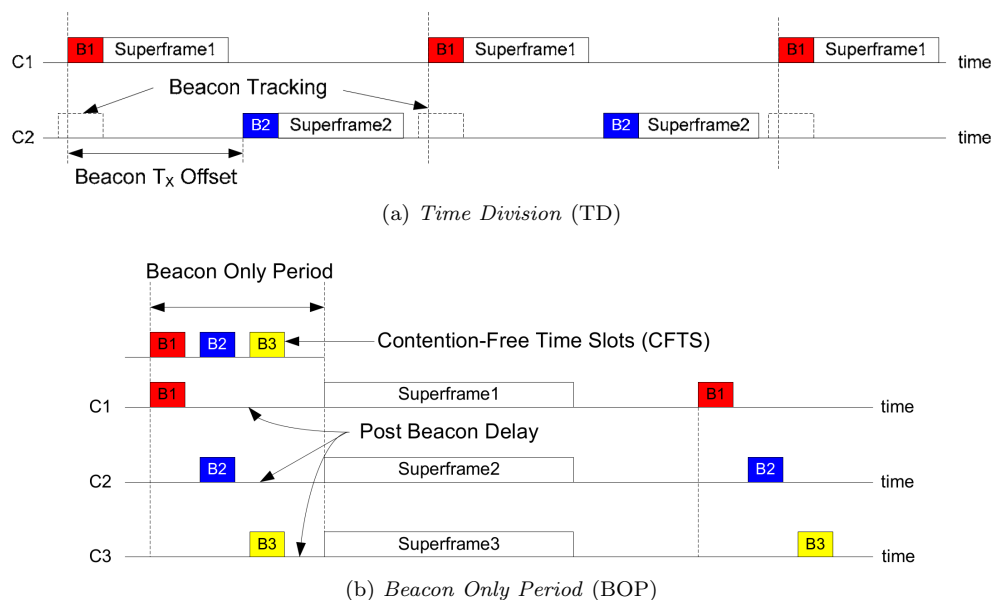


FIGURE 1.4 – Les deux approches recommandées par le TG 15.4b de l'IEEE

Avec l'approche TD, lorsqu'une information doit être envoyée à plusieurs sauts, la succession temporelle des supertrames introduit une latence potentiellement élevée, qui dépend de l'ordonnancement des supertrames. L'approche BOP est plus réactive car elle autorise la parallélisation des supertrames, comme nous pouvons l'observer sur la figure 1.4b. Cependant, à cette époque, l'IEEE ne spécifiait aucun algorithme d'ordonnancement des *beacons* et des supertrames. Seul le paramètre *Beacon TX Offset* était spécifié par la norme, mais sa détermination restait propre au déploiement du réseau.

La problématique principale de cette activité de recherche était donc la suivante : comment permettre l'organisation d'un réseau de capteurs sans fil basé sur le standard IEEE 802.15.4 où tous les nœuds peuvent dormir, y compris les routeurs ? Si l'approche par BOP est séduisante, comment ordonnancer les *beacons* pour favoriser la réactivité des échanges au sein du WSN ? Enfin, dans l'organisation du routage multi-saut sur le réseau, comment permettre le partage des informations entre les deux couches et, pour le niveau MAC, permettre l'utilisation de liens exclus par l'arbre sans pour autant perdre l'organisation arborescente du réseau ?

C'est dans ce contexte que nous avons, avec le LIMOS de Clermont-Ferrand également partenaire du projet, participé à la spécification, l'implémentation et l'évaluation des performances de MaCARI, « une MAC pour OCARI », doté de plusieurs caractéristiques en adéquation avec les attentes du projet :

- proposant un découpage temporel permettant la coexistence des différents mécanismes MAC,
- reposant sur l'approche BOP et spécifiant une méthode d'ordonnancement des *beacons* sans collision, la *cascade de beacons*,
- donnant la possibilité, au niveau routage, d'outre passer les restrictions topologiques de l'arbre pour organiser un routage *mesh*,

- toujours en collaboration avec le niveau routage et l'algorithme de coloration utilisé à ce niveau, permettant une parallélisation des échanges pour augmenter les performances du réseau - augmenter le débit, réduire la latence - tout en minimisant les collisions de trames,
- permettre quand cela est possible, des communications simultanées entre couples de nœuds feuilles suffisamment éloignés, au sein même d'une même étoile centrée sur un coordinateur (notion proposée de SGTS),
- permettant la mise en veille de tous les nœuds, y compris les routeurs.

Le découpage temporel de MaCARI (figure 1.5) est le suivant : dans une première période $[T_0, T_1]$, les *beacons* sont envoyés sans collision par la *cascade de beacons*; dans une seconde période $[T_1, T_2]$ se tiennent les activités ordonnancées. Il s'agit de supertrames sans *beacon* permettant à la fois l'écoulement du trafic *intra-étoile* et la communication père-fils à travers l'arbre. L'utilisation des GTS peut permettre la réservation de slots d'accès au médium garantis pour écouler le trafic multi-saut en un temps borné. Grâce à l'information donnée par la couche routage, les supertrames peuvent être parallélisées; Dans la dernière période $[T_2, T_0]$, se tiennent les activités non-ordonnancées, où les routeurs échangent en utilisant le protocole CSMA/CA.

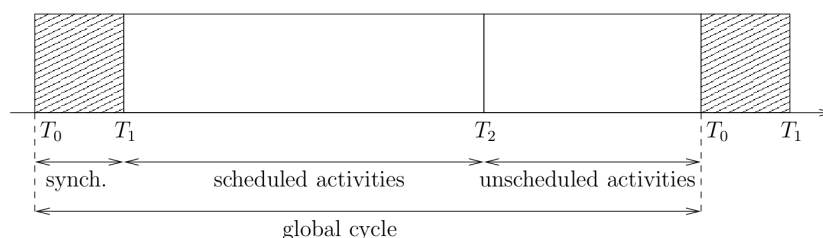


FIGURE 1.5 – Séquençement MaCARI

MaCARI est une organisation relativement complexe et riche, permettant la mise en concurrence de plusieurs modes d'accès au médium. Par exemple, dans [20], l'impact sur la latence de l'ordonnancement des *beacons* et des activités ordonnancées, est discutée, en fonction de la direction du trafic, dans le sens montant ou descendant de l'arbre. Le lecteur pourra se référer à la thèse de M. Gérard Chalhoub [21] pour la description complète de MaCARI. Pour notre part, nous avons d'une part contribué plus spécifiquement sur les mécanismes MAC intra-étoile et d'autre part, encadré l'ingénieur d'études M. Erwan Livolant dans l'implémentation de MaCARI.

Sur le volet intra-étoile, nous retiendrons deux contributions : une première qui concerne l'impact de la taille de la CAP sur les performances du réseau, et une seconde qui vise à améliorer le protocole MAC utilisé par les nœuds au sein d'une même étoile, depuis des options de différenciation de service sur l'allocation des GTS (n -GTS) [15] jusqu'à la possibilité de provoquer des accès concurrents au médium au sein d'une même étoile sans créer de collision, comme illustré sur la figure 1.6a (SGTS). En effet, à la fin de notre thèse de doctorat, nous avons entamé un travail sur la synchronisation des accès au médium simultanés sans collision. L'objectif était de parvenir à provoquer des communications simultanées qui, sous certaines conditions, ne provoquaient pas de collisions, dans un contexte IEEE 802.15.4. Ce travail a été terminé [22] et développé dans le cadre du projet OCARI.

1.3.1.3 Résultats

MaCARI a été développé conjointement avec le LIMOS de Clermont-Ferrand, également partenaire du projet. Il a été simulé sous NS2 et implémenté sur des nœuds IEEE 802.15.4 fabriqués par TELIT (ex. OneRF), également partenaire du projet ANR. Le projet a fait l'objet de nombreux développements et les codes sources qui ont été enregistrés sous forme d'un dépôt APP. Nous détaillons ici quelques résultats que nous considérons comme les plus originaux, mais surtout, qui ont contribué à orienter la suite de nos travaux.

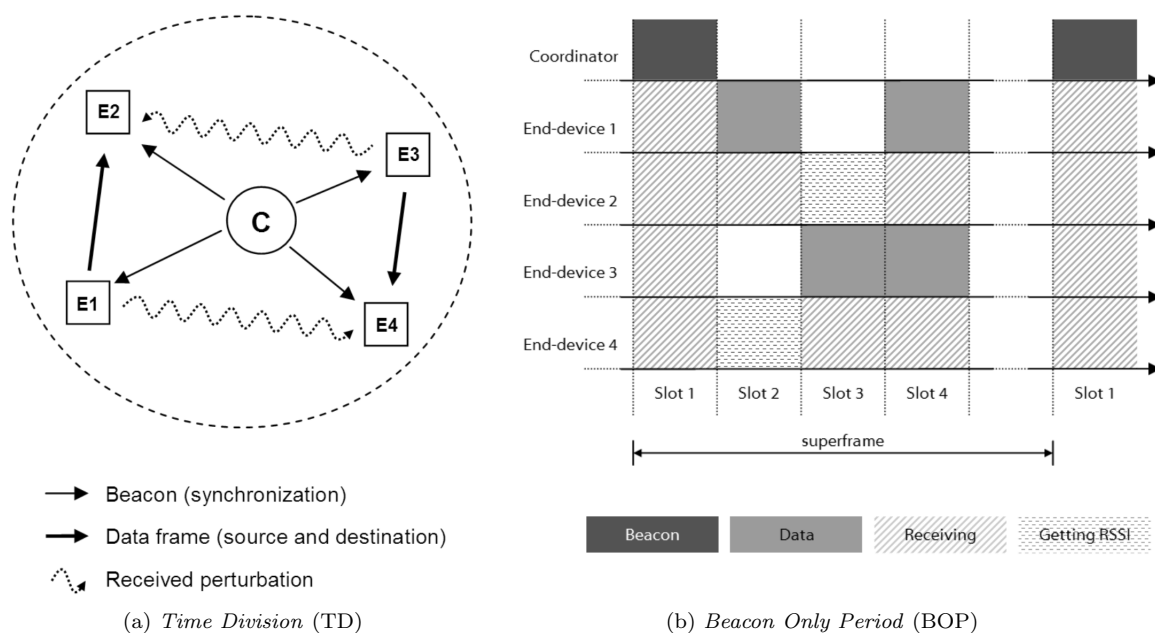


FIGURE 1.6 – Expérience conduite pour la mise en évidence des SGTS

Le principe de SGTS a été mis en évidence par une série d'expériences dont le principe est illustré par la figure 1.6. Deux nœuds E_1 et E_3 , synchronisés par le coordinateur C , transmettent chacun des messages à E_2 et E_4 , respectivement. Les messages envoyés le sont tout d'abord dans un GTS classique (slot n° 2 pour E_1 , slot n° 3 pour E_3). Tout *End-Device* recevant l'un de ces messages en note le *Received Signal Strength Indication* (RSSI), même s'il n'en est pas le destinataire. Un nouveau message est ensuite transmis par E_1 et E_3 , mais cette fois-ci dans un SGTS, c'est-à-dire simultanément dans le même slot (n° 4). E_2 et E_4 notent le message reçu et mettent en correspondance la différence de RSSI recueillie par les deux premiers messages. Ce principe est répété à chaque cycle, où la puissance d'émission des émetteurs est tirée aléatoirement en début de période dans l'intervalle permis par le *hardware* [0 dBm, +20 dBm]; afin d'augmenter l'étendue de la différence au delà de 40 dB, les nœuds E_1 et E_3 ont également été déplacés puis l'expérience a été relancée. Nous faisons ici l'hypothèse que les RSSI restent stables pendant un cycle, ce qui a été préalablement vérifié. Nous précisons également que le mécanisme de détection d'erreur basé sur le FCS de IEEE 802.15.4 est actif : lorsqu'une trame reçue a été comptée positivement, c'est qu'elle était bien destinée à ce nœud et ne comportait pas d'erreur.

La figure 1.7 représente le taux de succès pour le nœud E_2 en fonction de la différence de force de signal $RSSI_{E_1} - RSSI_{E_3}$ (cette différence est positive lorsque le signal émis du nœud E_1 est reçu plus fort

que le signal émis par E_3 , soit le cas favorable pour E_2). Comme nous pouvons l’observer sur cette figure, les messages n’entrent systématiquement en collision que pour une différence de RSSI inférieure à +3 dB, même si on note quelques pertes (FER meilleur que 5.10^{-2}) dans l’intervalle [+3 dB, +25 dB]. Enfin, nous pouvons noter que quelques rares trames sont tout de même reçues jusqu’à un écart défavorable de -10 dB, ce qui est surprenant.

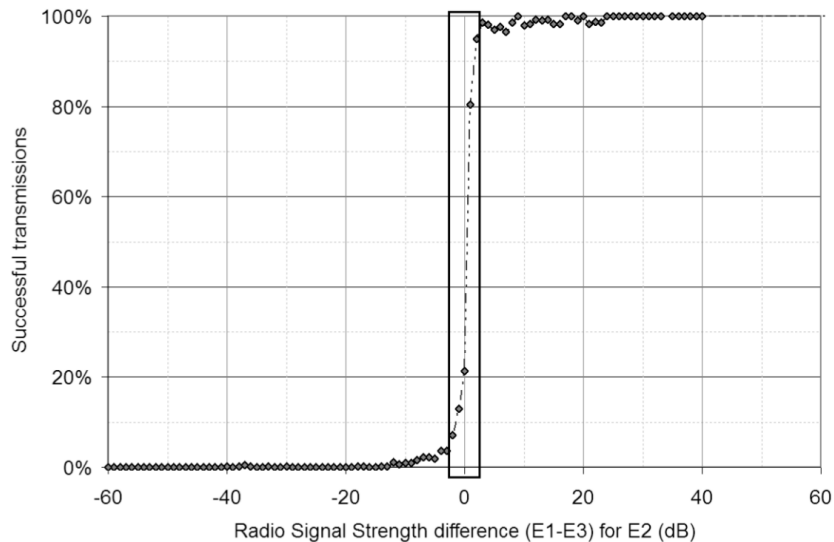


FIGURE 1.7 – SGTS : transmissions à succès vs. différence de RSSI

Cette expérience montre que si la notion de collision est bien réelle, la plupart des modèles rencontrés dans la littérature, notamment ceux utilisés dans les logiciels de simulation réseau, sont pessimistes car considèrent, à tort, que des émissions simultanées dans le domaine de portée du nœud entraînent systématiquement des collisions, ce qui est manifestement exagéré. De plus, nombre de modèles utilisés communément dans la littérature considèrent une zone d’interférence au delà de la portée du nœud, ce qui semble là encore être contredit par cette expérience, puisqu’à partir de +25 dB, le nœud interférant n’a plus d’impact. Il n’est pas rare, en effet, dans le contexte IEEE 802.15.4, de considérer que la zone d’interférence d’un nœud est le double de sa portée, soit deux sauts sur une topologie en ligne. Le très populaire modèle TRCA (*Receiver Transmitter Conflict Avoidance*) [23] largement utilisé dans les évaluations de performances des protocoles de routage multi-saut utilisant une couche physique IEEE 802.11b, considère même une zone d’interférence à trois sauts ! Il serait intéressant de généraliser cette expérience à d’autres couches physiques et revoir plus précisément *la notion de collision*.

1.3.1.4 Conclusions et perspectives sur l’encadrement de l’activité de recherche

Cette première activité de recherche post-doctorale fût très riche et menée avec une certaine liberté concédée à la fois par le porteur du projet et notre responsable d’équipe. Si nous étions largement poussés par le porteur de projet pour aller jusqu’à l’implémentation de nos contributions sur du matériel réel (et non se cantonner aux habituels modèles et logiciels de simulation réseau), nous avons nous-mêmes cette volonté et avons poussé pour que les contributions soient systématiquement évaluées aussi sur le matériel de l’équipe projet, même si celui-ci n’était pas pleinement adapté pour cet usage. Ces expériences réelles, dont celle présentée sur plus haut sur les SGTS, nous ont clairement montré leur valeur scientifique, mais également les difficultés de mise en oeuvre en l’absence d’infrastructure d’évaluation des performances.

A cette époque, les infrastructures de test à large échelles, les *testbeds*, n'étaient pas encore disponibles publiquement.

Même si les résultats ne sont pas mentionnés ici par souci de concision, le travail effectué par Mlle Réjane Dalcé sur la fin du projet OCARI [24], a permis d'apprécier ses qualités scientifiques et humaine et a facilité l'obtention de sa bourse ministérielle et son intégration dans notre équipe (cf. §2.3.1).

Si notre participation au projet OCARI a permis une première opportunité d'encadrement autre que des stagiaires de M2, elle nous a également permis de prendre conscience de la réalité des collaborations académie-industrie. Afin de contribuer efficacement, c'est-à-dire en minimisant les aller-retours entre partenaires industriels et académiques, les *frameworks* utilisés dans l'industrie pouvaient être largement améliorés. Par exemple, une difficulté majeure pour les académiques concerne l'évaluation de l'*implémentabilité* des solutions proposées, caractère très difficile à évaluer avec les outils et les *frameworks* utilisés dans l'industrie. Ce travail d'ingénierie nous a clairement marqué et servi par la suite pour le développement d'OpenWiNo (cf. 1.3.5.2.1).

1.3.1.5 Publications marquantes

Revue : Adrien van den Bossche, Thierry Val, and Eric Campo. Modelisation and Validation of a Full Deterministic Medium Access Method for IEEE 802.15.4 WPAN. *Elsevier Ad Hoc Networks*, pages 1285–1301, 2009

Revue : Gérard Chalhoub, Erwan Livolant, Alexandre Guitton, Adrien van den Bossche, Michel Misson, and Thierry Val. Specifications and evaluation of a MAC protocol for a LP-WPAN. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 7(1-2):69–89, 2009

1.3.2 Couche MAC sans hiérarchie

Co-encadrement de la thèse de Mlle Juan Lu

« *Modelling and realization of a wireless communicating multisensors devices network for remote measurement of relevant environmental parameters : application to monitoring the elderly at home* »

Directeur de thèse : Pr. Eric Campo

Période : octobre 2009 - janvier 2013 (42 mois)

Financement : bourse CSC (gouvernement Chinois)

1.3.2.1 Contexte des recherches menées

Dans la suite des travaux sur notre thèse de doctorat d'une part et le projet ANR OCARI d'autre part, nous avons retenu plusieurs centres d'intérêt :

- la nécessité de synchroniser les nœuds pour provoquer des rendez-vous, de façon à limiter la consommation énergétique de tous les nœuds, y compris les routeurs, afin de pouvoir déployer un réseau avec un minimum de contraintes. Cette synchronisation pouvait être assurée par l'émission régulière de *beacons*, qui pouvaient également véhiculer d'autres informations nécessaire à la gestion du réseau, dans un unique message,

- l'option de disposer de plusieurs modes d'accès au médium - accès à contention, par CSMA/CA, pour l'approche *Best-effort*, comme l'accès déterministe, par GTS, pour l'approche garantie - pour permettre de satisfaire plusieurs classes de trafics sur un même réseau.

Cependant, les solutions apportées dans les deux précédents travaux n'étaient pas pleinement satisfaisantes à notre avis, car reposant dans les deux cas sur une topologie en arbre, donc hiérarchique. Bien que très utilisée dans la plupart des réseaux réellement déployés, notamment dans les réseaux industriels, la topologie en arbre n'est pas satisfaisante car, comme dans tous les systèmes hiérarchiques, l'élément racine est le plus exposé; ses défaillances sont généralement les plus coûteuses. De plus, la topologie en arbre réduit le nombre de chemins possibles et empêche une certaine dynamique du réseau. Enfin, elle est peu satisfaisante du point de vue du chercheur, car coûteuse en temps et en trafic pour réorganiser le réseau si l'un des éléments vient à tomber, ce qui, de part le caractère fortement variable du médium sans fil, peut être fréquent, en fonction de l'environnement (perturbation du médium, ...) ou de l'application (mobilité des nœuds, ...).

La problématique principale de la thèse était donc la suivante : comment permettre l'auto-organisation totalement décentralisée d'un réseau de capteurs sans fil maillé, sans connaissance de l'ensemble de la topologie, pour des nœuds très contraints en mémoire et en énergie, tout en permettant des mécanismes de garanties temporelles sur la remise des messages ?

Le protocole MAC publié dans le standard IEEE 802.15.4 [9] présentant des caractéristiques de base intéressantes mais très centralisées, nous avons tout simplement cherché à les réduire au maximum. Les travaux ont consisté à, d'une part supprimer la notion générale de *coordonateur* (PAN coordonateur et coordonateur d'étoile) pour la remplacer par des algorithmes répartis; d'autre part, remplacer la topologie en arbre par une topologie maillée, pour permettre une forte dynamique des liens entre les nœuds (au niveau MAC) et permettre un routage plus efficace (au niveau routage). Cependant, les applications visées étant susceptibles d'être critiques sur le plan temporel, un mode d'accès au médium de type GTS devait être conservé, malgré l'absence de hiérarchie. Enfin, le protocole devait intégrer la dimension d'économie énergétique pour favoriser les déploiements sans contrainte, y compris au niveau des routeurs.

Dans ce travail de thèse, nous avons proposé un protocole MAC original désigné par *Adaptive and Distributed Collision-Free MAC Protocol* (ADCF). Ce protocole MAC a été décomposé en plusieurs sous-protocoles et algorithmes et présenté dans le manuscrit de Mlle Juan Lu [26], ainsi que dans [27]. Il est résumé dans la section suivante.

1.3.2.2 Axes de recherche et principales contributions

ADCF-MAC se veut *une version maillée et décentralisée de IEEE 802.15.4*. Comme dans le protocole original, on y retrouve les *beacons* ainsi que les créneaux temporels garantis (GTS), mais dans une approche maillée et décentralisée. En effet, avec ADCF, les notions de coordonateur et d'arborescence ont disparu. Nous sommes en présence d'une topologie à plat, plus souple et moins contrainte, où tous les nœuds sont susceptibles d'assurer la coordination des accès au médium comme le routage des paquets. Tous les nœuds sont donc considérés comme des FFD³ et constituent l'épine dorsale du réseau [9].

La figure 1.8 présente l'organisation temporelle d'ADCF. Comme on peut le voir sur cette figure, le concept de *supertrame* hérité de IEEE 802.15.4, a été conservé. Cependant, pour satisfaire à la topologie maillée, cette supertrame a été modifiée. Elle débute par une *Beacon Only Period*, suivie d'une période active composée de slots pour les accès en mode best-effort (CAP) et de slots dédiés (CFP), puis une période inactive où l'ensemble des nœuds somnolera.

3. dans la terminologie IEEE 802.15.4, *Full-Function Devices*

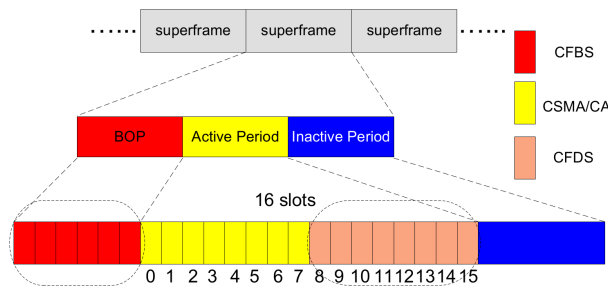


FIGURE 1.8 – Structure de la supertrame et schéma de fonctionnement d’ADCF

Deux mécanismes, CFBS « *Collision Free Beacon Slot* » et CFDS « *Collision Free Data Slot* » ont été proposés dans ce travail ; ce sont ces mécanismes, à proprement parler, qui permettent de se substituer à la l’architecture centralisée d’IEEE 802.15.4 et rendre possible une approche répartie sur une topologie maillée :

- CFBS permet la diffusion des *beacons* sans collision, en mettant en oeuvre un découpage de type TDMA dans la *Beacon Only Period*. Un mécanisme de réutilisation spatiale des slots, pour une distance supérieure à deux sauts, est incluse dans le mécanisme CFBS. CFBS permet à chaque nœud de disposer d’un slot dédié, donc sans collision, pour diffuser son *beacon* au début de chaque nouvelle supertrame. Les *beacons* permettent de découvrir le voisinage, détecter les liens asymétriques et effectuer les réservations de slots de données. Si la topologie est dynamique, parce que des nœuds quittent ou rejoignent le réseau, ou à cause de l’instabilité des liens radios, la BOP s’adapte et change dynamiquement en fonction des changements topologiques.
- CFDS permet la négociation de slots entre deux nœuds voisins, pour permettre des communications sans collision, là encore avec une réutilisation spatiale à deux sauts. CFDS peut être à juste titre considéré comme une adaptation du mécanisme des GTS (utilisé dans IEEE 802.15.4) dans une topologie maillée. Alors que dans IEEE 802.15.4, les GTS ne peuvent être demandés qu’au sein d’une étoile, qui plus est que d’un nœud feuille vers son coordinateur, ici, chaque nœud peut demander un slot garanti à l’un de ses voisins si un fort niveau de garantie est nécessaire pour l’acheminement de ce trafic. Le médium sans fil est donc dédié aux nœuds qui utilisent le CFDS pour transmettre les données dans un délai borné. En outre, ADCF permet à tous les nœuds, y compris les routeurs, de se mettre en veille pour économiser l’énergie.

L’hypothèse suivante a été considérée : les nœuds disposent préalablement chacun d’une adresse courte⁴ unique [9] ; en l’absence de mécanisme d’association implémenté, c’est une contrainte forte qui reste néanmoins réaliste car opérée par une pré-configuration des nœuds avant leur installation. La synchronisation des nœuds et la symétrie des liens étaient également des hypothèses de départ mais elles ont été levées par la suite en renforçant le protocole.

En l’absence de coordinateur central, la phase de découverte de voisinage répartie est fondamentale et assurée par la diffusion périodique des *beacons* dans la BOP. Chaque *beacon* ADCF contient les informations suivantes, permettant de construire et maintenir la *table de voisinage* de chaque nœud :

1. l’adresse 16 bits du nœud,

4. au sens IEEE 802.15.4, c’est-à-dire une adresse 16 bits

2. l'énergie résiduelle du nœud,
3. la liste des voisins à un saut du nœud,
4. la *densité* du nœud, c'est-à-dire le nombre de voisins du nœud dans son voisinage à deux sauts⁵.

Nous pouvons distinguer deux étapes dans l'exécution d'ADCF : une étape d'initialisation (*initialisation stage*) et une étape de travail (*working stage*). Il n'y a pas de supertrame dans l'étape d'initialisation, les nœuds envoient et collectent les données et le trafic de contrôle (beacons) en utilisant CSMA/CA non slotté. L'objectif de la phase d'initialisation est d'identifier les voisins et parvenir à construire le plus rapidement possible la supertrame, dans une approche totalement répartie, donc sans un nœud central coordonnant cette étape. Dans l'étape de travail, les accès au médium sont organisés selon la structure de supertrame décrite ci-dessus (figure 1.8). La structure de la supertrame (maintien de la synchronisation, négociation des slots, etc.) est maintenue grâce aux informations transmises dans les *beacons*.

Afin de simplifier la compréhension de l'ensemble du processus, ADCF est divisée en plusieurs protocoles et algorithmes associés :

- BEP « *Beacon Exchange Protocol* » est le premier protocole exécuté par les nœuds. Il est chargé de créer et maintenir une table de voisinage à deux sauts, et ce, en deux étapes. Chaque nouveau nœud va tout d'abord écouter le canal pendant une période déterminée et identifie son voisinage à l'aide des *beacons* reçus. Chaque nœud diffuse régulièrement sa balise, soit dans la BOP formée (*working stage*) ou en court de formation (*initialisation stage*). Pour chaque voisin, le nœud connaît l'adresse, l'énergie, la densité et la liste des voisins à un saut.
- SPA « *Simple Priority Algorithm* » permet de déterminer une priorité entre deux nœuds, par comparaison de trois paramètres liés à ces deux nœuds. L'ordre de comparaison est 1) la densité du nœud, puis 2) l'énergie résiduelle du nœud et enfin, 3) son adresse. Dans un premier temps, le nœud avec une densité maximum est sélectionné. Si les deux nœuds ont la même densité, SPA choisit celui avec un maximum d'énergie résiduelle. Enfin, en cas d'égalité sur les deux premiers paramètres, le nœud avec l'adresse la plus petite est déterminé comme ayant la plus haute priorité.
- ISP « *Initiator Selection Protocol* » permet à chaque nœud, à l'aide des informations contenues dans la table de voisinage et selon l'algorithme SPA, de choisir un nœud *Initiateur* dont le rôle est de matérialiser l'instant marquant le début de la BOP et fixer sa longueur minimale. Si un nœud désigne un candidat *Initiateur* différent de ses voisins, SPA est utilisé pour décider d'un *Initiateur* unique. L'adresse du nœud désigné comme *Initiateur* est diffusée dans les *beacons*, outrepassant la limite de deux sauts. Il est présent dans chaque table de voisinage. Il n'a pas de rôle centralisateur et peut disparaître sans compromettre l'intégrité du réseau.
- BSAP « *Beacon Slot Allocation Protocol* » est déclenché lorsque l'initiateur est choisi. Ce protocole permet à chaque nœud de choisir un CFBS dans la BOP. Les nœuds exécutent SPA localement, laissant choisir leur CFBS les nœuds voisins avec une priorité plus haute. A son tour, toujours selon SPA, le nœud prend le premier slot disponible qui n'est pas utilisé par un autre nœud dans son voisinage à deux sauts et inscrit le numéro du slot choisi dans sa table de voisinage. A la fin de l'exécution de BSAP, le nœud dispose d'un CFBS et peut entrer dans la phase de travail (*working stage*) ; certains nœuds peuvent tarder à rentrer en *working stage* sans que cela ne pose de problème au fonctionnement du réseau. Une fois l'ensemble des nœuds en *working stage*, le réseau est construit.

5. Les voisins à deux sauts sont connus individuellement et décomptés au moment de la réception des *beacons*, mais ne sont pas mémorisés dans la table de voisinage, afin d'économiser la mémoire du nœud.

- DSAP « *Data Slot Allocation Protocol* » permet l'allocation d'un CFDS avec l'un de ces voisins : c'est l'équivalent *mesh* de la primitive **GTS.request** d'IEEE 802.15.4. DSAP est typiquement déclenché par une demande locale au nœud, par une couche supérieure à la couche MAC. Chaque nœud peut demander un CFDS par *beacon* à chacun de ses voisins. Quand un nœud reçoit le *beacon* d'un voisin contenant une demande DSAP, il va allouer à ce voisin le premier slot de données (CFDS) disponible dans sa table de voisinage et annoncer cette allocation dans son *beacon* suivant. Lorsque le nœud demandeur reçoit le *beacon* avec le numéro du slot choisi, les deux nœuds peuvent communiquer dans ce CFDS sans risquer d'entrer en collision dans le voisinage à deux sauts de chacun des deux nœuds.
- SRP « *Smart Repair Protocol* » permet à un nœud de passer de l'un à l'autre des deux états d'ADCF (*initialisation stage* vers *working stage* et vice-versa), typiquement après la détection d'un changement de topologie. SRP tente de réduire l'impact d'un changement de topologie autant que possible. SRP prévoit quatre types de changement de topologie : un premier cas provoquant l'augmentation de la taille de la BOP, un second cas impliquant une réduction de la BOP, un troisième cas avec la séparation du réseau en deux (ou plus) groupes de nœuds et enfin la fusion de deux (ou plus) groupes de nœuds en un seul réseau. Les quatre types ont été étudiés dans la thèse de Mlle Juan Lu et nous proposons ici de ne pas rentrer plus dans les détails. SRP est vital pour ADCF car il permet et améliore la souplesse et la robustesse du réseau dans sa globalité.

L'étude menée dans le cadre de la thèse de Mlle Juan Lu fut très complète sur le plan descriptif, le protocole ADCF n'étant pas totalement trivial. Nous limiterons ici sa description à ce stade, suffisant pour comprendre l'approche et les résultats exposés dans la section suivante. Nous invitons le lecteur intéressé à se référer à [27] ou, pour sa description complète, au manuscrit de Mlle Juan Lu [26] où sont détaillés les formats de messages et les primitives de gestion d'ADCF (**ADCF-Get.***, **ADCF-CFDS.***, etc.).

1.3.2.3 Résultats

ADCF a été évalué conjointement par simulation et sur prototype réel et ce, pour plusieurs raisons. En premier lieu, aux vues de la complexité et de la forte imbrication des sous-protocoles et algorithmes associés, une première étude de type « preuve de concept et implémentabilité » était nécessaire, surtout compte tenu des faibles ressources de la cible visée à l'époque (CPU 8 bits 8 MHz, 4 ko de RAM). Ensuite, le travail mené avec le Pr. Eric Campo devait pouvoir être déployé dans la Maison Intelligente de Blagnac et semblait constituer une bonne base pour pouvoir, ensuite, monter des projets transversaux utilisant le réseau de capteurs développé dans le cadre de cette thèse. Nous verrons au chapitre 3 que ceci s'est effectivement avéré juste. Enfin, l'évaluation pragmatique reposant sur un *testbed* réel était un choix délibéré que nous souhaitons développer et renforcer dans l'équipe. A ce titre, ADCF a été le premier protocole de l'équipe à être implémenté dans l'environnement OpenWiNo, comme nous l'évoquerons plus loin dans ce manuscrit (§1.3.5.2.1).

Plus généralement, comme pour tout protocole, l'évaluation conjointe en simulation et prototypage réel permet de bénéficier des avantages des deux modes opératoires : sur un scénario simple et identique en simulation et *testbed*, la confrontation des résultats permet de vérifier l'exactitude du simulateur. Si cette première étude est validée, alors le simulateur peut permettre de simuler des scénarios plus complexes, par exemple en nombre de nœuds. Le *testbed*, quant à lui, permet de confronter le protocole à des situations difficilement modélisables comme les obstacles ou des caractéristiques fines de la couche radio, et d'aller jusqu'à l'évaluation par l'usage (cf. chapitre 3).

1.3.2.3.1 Évaluation par simulation

L'évaluation d'ADCF, en simulation, a été réalisée grâce au logiciel de simulation réseau OPNET. Le modèle IEEE 802.15.4 de ce simulateur avait été jugé à la fois suffisamment fiable et versatile pour servir de base à l'implémentation d'ADCF ; il a également été utilisé tel quel pour permettre une confrontation d'ADCF avec le protocole original issu du standard. Dans un souci de conformité avec la réalité, la plupart des simulations effectuées ont été paramétrées avec des caractéristiques du nœud au plus proche de la réalité, notamment la taille des tampons mémoire (*buffers*). Nous avons noté, à cette occasion, que le manque de ressources sur le nœud impactait très fortement les performances du protocole. La limitation mémoire, notamment, faisait ressortir les problématiques de congestion qui n'avaient pas de lien direct avec le protocole évalué. Pourtant, cette observation en simulation contrainte était nécessaire pour confronter les résultats obtenus par prototypage réel - nécessairement contraints, eux - avec ceux issus du simulateur. Cette remarque, très importante à nos yeux car impactant fortement l'évaluation des performances, nous a amené à proposer, plus tard, des outils d'évaluation des performances réelles correctement dimensionnés pour ne pas être confrontés à ces limitations. De façon plus générale, dans ce travail, nous avons également observé les écueils classiques des logiciels de simulation réseau : portées circulaires et liens symétriques, zones d'interférence sur-considérées, risque de synchronisation entre la couche application et la couche d'accès au médium biaisant les observations.

Plusieurs scénarios expérimentaux ont été simulés avec ADCF et la MAC originale du standard IEEE 802.15.4 ; des indicateurs de performances classiques, au niveau MAC, ont été observés : la capacité de QoS, la flexibilité, la robustesse et l'économie d'énergie. Les résultats les plus pertinents sont présentés dans les paragraphes suivants.

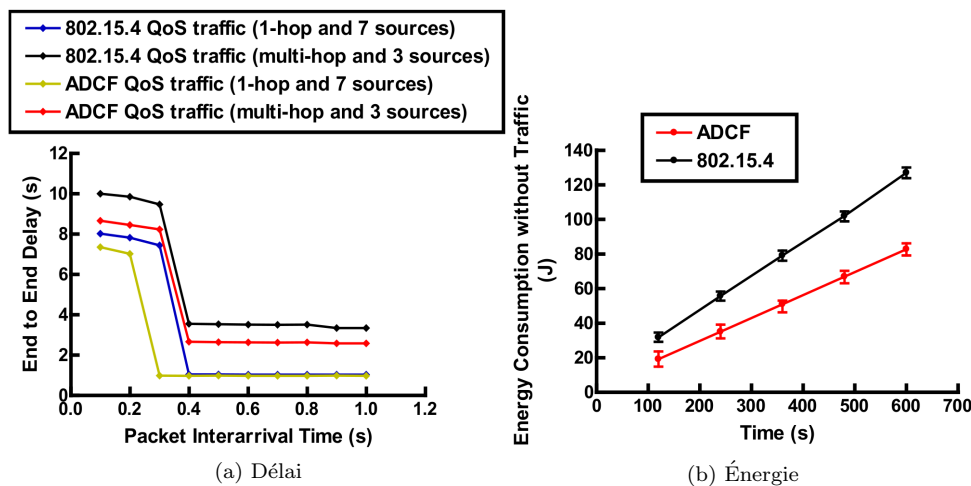


FIGURE 1.9 – Comparaison d'ADCF avec IEEE 802.15.4 : délai et énergie

La figure 1.9a montre la comparaison du délai de bout en bout pour des données à QoS, c'est-à-dire transmises dans des slots garantis CFDS. Il y a une légère différence pour les données à un saut, en moyenne (60 ms de mieux pour ADCF) quand les buffers ne sont pas saturés. Pour les données multi-sauts, ADCF est meilleur qu'IEEE 802.15.4 dans la plupart des cas grâce à la diversité des liens due à la topologie maillée. D'autre part, tant que les buffers ne sont pas saturés, les taux de succès de remise des paquets sont toujours de 100% dans ce cas où le canal ne présente aucune erreur de transmission. Au final, les résultats montrent qu'ADCF satisfait les besoins applicatifs pour des transmissions de données

contraintes sur le plan temporel.

La figure 1.9b représente l'énergie consommée par un nœud ADCF en l'absence de trafic de données (maintient de la synchronisation et de la BOP, etc.) en *working stage*. Les résultats montrent que le protocole natif d'IEEE 802.15.4 consomme plus d'énergie qu'ADCF à cause des doubles périodes actives dans la topologie en arbre (période d'activité pour son étoile, période d'activité de son parent), où une durée plus importante est consacrée à l'écoute du médium ; ceci se traduit par une économie d'énergie de près de 37% en faveur d'ADCF.

D'autre part, nous avons étudié le coût de la construction de la topologie maillée, en particulier le pire des cas qui consiste à reconstruire le réseau alors que les nœuds se trouvent en fonctionnement nominal (*working stage*). Les résultats montrent que ce coût est acceptable, par exemple moins de 30 secondes pour un réseau de 50 nœuds, bien qu'il faille le confronter aux attentes de l'applicatif. Dans l'application de surveillance à domicile qui avait servi de contexte à la thèse de Mlle Juan Lu, ce temps était acceptable puisque la phase de fonctionnement nominal pouvait durer plusieurs mois. Sur le long terme, si le coût du temps de convergence est acceptable, il peut tout de même être réduit au prix d'une plus grande quantité de messages échangés sur la même durée (typiquement, par une augmentation du nombre de *beacons* par seconde) mais ceci n'a pas été étudié dans le travail. La relation entre les performances du réseau et les changements topologiques est difficile à étudier en raison du grand nombre de cas complexes et spécifiques. Dans cette étude, nous avons simulé les cas les plus courants comme, par exemple, un seul changement de topologie généré pour chaque simulation. Les résultats complets sont disponibles dans le manuscrit de Mlle Juan Lu [26].

1.3.2.3.2 Évaluation par *testbed*

L'évaluation d'ADCF, en prototypage réel, a été réalisée à l'aide de la plate-forme OpenWiNo, développée dans le cadre de nos activités de recherche. OpenWiNo permet le prototypage rapide des protocoles pour les réseaux de capteurs et le réseau de collecte dans l'Internet des Objets. Il permet notamment une maîtrise des aspects de bas niveau tels que le temps d'accès au médium et le cycle veille-sommeil, mais aussi le temps CPU et la mémoire généralement limités. Il sera présentée à la section §1.3.5.2.1 de ce manuscrit.

Le prototype d'ADCF était basé sur des cartes de développement Freescale 13192-SARD et 1321x-SRB. Une dizaine de cartes étaient disponibles pour réaliser ce premier *testbed*. Une console, associée à un *data-logger*, ainsi qu'un analyseur de protocole (*Daintree Sensor Network Analyser*) sont venus compléter les outils disponibles pour l'évaluation des performances du protocole en conditions réelles. Des améliorations significatives du protocole ont été apportées pendant la phase d'évaluation sur *testbed*, notamment sur la partie synchronisation, prise en compte des liens asymétriques et de confirmation/désapprobation des liens de mauvaise qualité. Là encore, les résultats les plus pertinents sont discutés, notamment ceux comparant les résultats réels et les résultats issus de la simulation.

Tout d'abord, le coût protocolaire est acceptable. Par exemple, le temps de convergence est de 82.54 s en moyenne et 489 *beacons* sont envoyés pour mener à bien l'étape d'initialisation et arriver à la construction d'un réseau maillé de 8 nœuds. Les nœuds peuvent librement rejoindre ou quitter le réseau sans perturber le fonctionnement du reste du réseau. Le point le plus intéressant est la négociation des slots des données avec succès via les *beacons*.

La figure 1.10a représente le délai de bout en bout (application à application) en fonction de la durée de la supertrame *SD* et la période d'arrivée des paquets à transmettre, pour un réseau de 4 nœuds dont 2 sont générateurs de données, dans un contexte mono-saut. La figure 1.10b représente le taux de livraison de bout en bout en fonction des mêmes paramètres et dans la même configuration. Il est intéressant

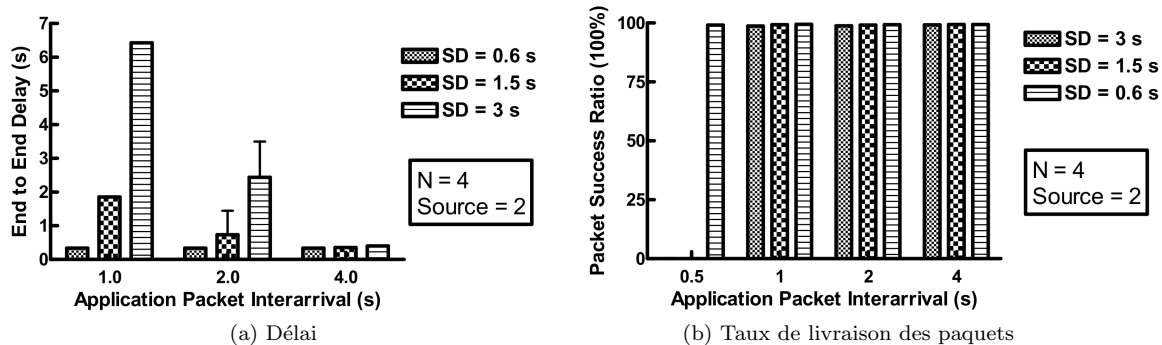


FIGURE 1.10 – Résultats du prototype : délai et taux de livraison de paquets

d’observer qu’un nœud utilisant un CFDS peut transmettre des données en 0.37 secondes en moyenne et sans perte de paquets si les buffers sont disponibles. On notera que les résultats sont meilleurs que ceux obtenus par la simulation grâce à un modèle plus adapté de la couche application, laquelle a pu être désynchronisée de la MAC, ce qui est réaliste. Les résultats complets sont disponibles dans le manuscrit de Mlle Juan Lu [26].

Un déploiement de 6 nœuds ADCF a également été effectué dans la Maison Intelligente de Blagnac et a fait l’objet d’une vidéo de démonstration [28]. Ce déploiement est détaillé au chapitre 3 de ce manuscrit.

1.3.2.4 Conclusions et perspectives sur l’encadrement de l’activité de recherche

La problématique posée au début de cette activité de recherche était ambitieuse : parvenir à proposer une version *mesh* et décentralisée d’IEEE 802.15.4 dans un contexte où tous les nœuds doivent pouvoir passer en veille pour économiser de l’énergie, tout en conservant les mécanismes d’accès au médium garantis. Cet objectif impliquait donc la suppression du coordinateur de PAN et la mise en place d’une gestion décentralisée de la synchronisation, de prévoir des rendez-vous d’accès au médium comme les GTS, mais dans une approche *pair à pair*, sans hiérarchie. Si la construction décentralisée du réseau était un premier objectif, sa maintenance l’était tout autant. Des mécanismes ont également été proposés pour cette tâche. Les contributions de la thèse de Mlle Juan Lu ont permis d’atteindre ces objectifs dans la conception - tous les formats de messages et les primitives ont été spécifiés - mais aussi dans la réalisation - un prototype opérationnel était disponible à la fin de la thèse.

Dans la phase d’évaluation, ce travail nous a permis de constater une fois de plus les faiblesses des logiciels de simulation réseau, qui ne suffisent pas, à nos yeux, pour juger de l’intérêt réel d’une proposition académique ; les résultats qu’ils produisent sont intéressants et nécessaires mais insuffisants. Le passage au prototype nous a forcé à proposer un mécanisme de synchronisation réel (synchronisation qui était implicitement réalisée par OPNET dans la phase de simulation) et à considérer les liens asymétriques, qui, dans une topologie *mesh* réelle, sont bien souvent plus nombreux que les liens symétriques !

Cependant, ce travail nous a également permis de constater, une fois de plus, que l’évaluation des performances des protocoles par prototype réel est très complexe à mettre en œuvre. Tout d’abord, la mémoire très limitée des cibles disponibles limite clairement les possibilités d’évaluation des performances des protocoles. Il faut pouvoir disposer de nœuds mieux dotés pour pousser à l’extrême l’évaluation des performances, même si le *hardware* utilisé dans cette phase en laboratoire n’est pas celui considéré dans la phase industrielle. Mais il faut faciliter le transfert de l’un à l’autre et donc, rapprocher au maximum

les architectures pour minimiser les modifications dans la phase de transfert de technologie. D'autre part, la mise en oeuvre concrète des nœuds (placement/déplacement des nœuds, mise à jour des micro-logiciels embarqués (*firmwares*), démarrage/arrêt des expériences, collecte non invasive des données de l'expérience) demeurait une étape chronophage et, même si elle était réalisée avec rigueur, pouvait introduire des biais dans les résultats. La nécessaire contribution qui allait venir, sur la mise en place d'outils pour rationaliser l'usage des *testbeds* et faciliter la phase d'évaluation des performances, devenait de plus en plus claire à nos yeux.

De plus, le manque de maîtrise du *hardware* utilisé dans cette activité ne nous a pas permis d'aller jusqu'à l'évaluation du protocole sur le plan énergétique. C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles nous avons ensuite travaillé sur le *hardware* WiNo, présenté plus loin dans ce document.

Les perspectives propres à ADCF étaient alors nombreuses. Certaines, comme le manque de synchronisation des nœuds, ont été traité ensuite et ont fait l'objet de propositions scalables et abouties. D'autres, comme l'interaction d'ADCF avec une couche routage, n'ont pas été traitées. Pourtant, sur ce cas précis, il est clair que les informations collectées par ADCF peuvent avantageusement être mises à disposition d'une couche routage : la découverte du voisinage à deux sauts est une étape préliminaire classique pour tout protocole de routage pro-actif.

1.3.2.5 Publications marquantes

Conférence : Juan Lu, Adrien Van den Bossche, and Eric Campo. A New Beacon Scheduling Mechanism for Mesh Wireless Personal Area Networks based on IEEE 802.15.4. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Toulouse, 05/09/2011-09/09/2011, septembre 2011

Conférence : Juan Lu, Adrien Van den Bossche, and Eric Campo. Enabling Guaranteed Beacon and Data Slots in Multi-hop Mesh Sensor Networks for Home Health Monitoring. In *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC)*, Venice, Italy, 24/06/2012-29/06/2012, juin 2012

Revue : Juan Lu, Adrien Van den Bossche, and Eric Campo. An IEEE 802.15.4 Based Adaptive Communication Protocol in Wireless Sensor Network: Application to Monitoring the Elderly at Home. *Wireless Sensor Network*, 6:192–204, septembre 2014

1.3.3 Synchronisation répartie et consensuelle

Encadrement de Mlle Chaymaa Zidi dans son stage de M2R

« Étude de la synchronisation dans un réseau de capteurs sans fil »

Période : octobre 2010 - mars 2011

Financement : points chercheurs du laboratoire

1.3.3.1 Contexte des recherches menées

Dans la suite de nos travaux de doctorat et des premiers travaux encadrés, la thématique de la synchronisation était sous-jacente à la plupart des travaux menés. Dans le processus d'accès au médium par rendez-vous, par exemple, la synchronisation est fondamentale car de sa qualité dépend aussi bien la précision des slots utilisés pour la transmission des trames, avec un impact sur le débit, que la justesse

des instants de mise en veille et de réveil, avec un impact sur la consommation énergétique. L'importance de cette thématique est claire.

Dans un premier temps, nous avons proposé de traiter cette thématique dans un premier encadrement sous la forme d'un stage de M2R. Par la suite, la thématique a été proposée dans le cadre de l'appel à projet ANR « Jeune Chercheuse-Jeune Chercheur » (JCJC) mais n'a pas été retenue pour financement. Le travail a cependant été poursuivi sans étudiant. Cependant, le travail en solo a permis d'avancer cette activité et a donné lieu à deux collaborations que nous détaillons en fin de partie.

1.3.3.2 Axes de recherche et principales contributions

1.3.3.2.1 Modélisation de la synchronisation

Dans le cadre de ce stage, nous avons demandé à Mlle Chaymaa Zidi de :

1. réaliser un état de l'art sur la formalisation de la problématique de la synchronisation dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil,
2. réaliser un état de l'art des protocoles de synchronisation dans le même contexte,
3. mettre à l'épreuve des idées de l'équipe, en les implémentant dans un logiciel de simulation réseau et sur *testbed*.

Nous avons alors en effet plusieurs idées originales quant à une synchronisation répartie. Fin 2010, plus d'un an après le début de la thèse de Mlle Juan Lu, nous avons identifié la nécessité d'introduire un protocole de synchronisation pour pouvoir réaliser le prototype d'ADCF (cf. section 1.3.2). A ce moment-là, la proposition d'ACDF n'était pas complète, mais l'approche par *Beacon-Only Period* avait déjà été identifiée et sélectionnée. Dans un souci de cohérence de nos travaux, nous étions à l'œuvre dans la conception d'un protocole de synchronisation qui devait pouvoir s'intégrer dans la charge utile de *beacons* diffusés en BOP, c'est-à-dire n'utilisant que des trames de type *broadcast*, probablement sans précaution d'accès au médium⁶ et sans acquittement.

Un premier travail a donc consisté à répertorier les modèles existants pour la synchronisation de nœuds communicants sans fil. Le modèle suivant a été retenu : le système de synchronisation repose sur une horloge h , qui, d'un point de vue matériel, est généralement implémentée par un compteur associé à un *timer*. Cette horloge h , modélisée par fonction $h(t)$, donne la valeur de ce compteur à l'instant t . Matériellement, ce compteur est incrémenté par le *timer* à une certaine fréquence f , généralement cadencée par un quartz ; elle est donc susceptible de dériver, par exemple à cause des variations de température subies par le quartz. Nous pouvons exprimer la fonction $f(t)$ (équation 1.1 comme la dérivée de $h(t)$:

$$f(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (1.1)$$

L'écart instantané entre deux horloges, par exemple pour deux systèmes différents, est généralement désigné par le terme *offset*, défini par l'équation 1.2.

$$offset(t) = h_2(t) - h_1(t) \quad (1.2)$$

6. Dans le standard IEEE 802.15.4, lorsque le mode *beacon* est actif ($BO \neq 15$), les *beacons* sont diffusés régulièrement à une fréquence $f_{beacon} = \frac{1}{(15.36ms \times 2^{BO})}$ et directement au début du premier slot de la supertrame, sans l'usage de CSMA/CA.

L'offset constitue une première source de désynchronisation entre deux systèmes. Si les deux fréquences sont identiques, l'offset est une constante, donc relativement simple à corriger par protocole. Cependant, les fréquences sont généralement plus ou moins différentes ; deux horloges matérielles étant cadencées par deux quartz différents, leurs fréquences respectives f_1 et f_2 seront légèrement différentes. On désigne cette différence (équation 1.3) par le terme *skew*, ou dérive, qui, elle aussi, peut évoluer dans le temps, par exemple en cas de changement de température sur l'un des quartz.

$$skew(t) = f_2(t) - f_1(t) \quad (1.3)$$

Compte tenu de la littérature et en vue de proposer des protocoles de synchronisation implémentables, c'est-à-dire tenant compte des contraintes matérielles et logicielles de nos futurs nœuds, nous avons considéré les trois hypothèses suivantes :

1. chaque nœud est doté d'une horloge locale h désignée par l'équation 1.1,
2. la fréquence de cette horloge locale est la même pour tous les nœuds, à la dérive près,
3. chaque nœud est capable d'horodater un message à l'émission comme à la réception avec son l'horloge locale.

Nous considérons ici que les nœuds seront synchronisés si chaque nœud du réseau est capable d'obtenir à tout instant une horloge commune hc avec tous les autres nœuds. Autrement dit, les n nœuds du réseau seront considérés comme synchronisés si, à tout instant t , tous les $hc_1(t), hc_2(t) \dots hc_n(t)$ sont égales (équation 1.4).

$$\forall t \rightarrow hc_1(t) = hc_2(t) = \dots = hc_n(t) \quad (1.4)$$

Dans la réalité, ces horloges seront très proches les unes des autres, et ces différences seront considérées comme négligeables devant la *précision de synchronisation* attendue par le bénéficiaire de cette synchronisation, qu'il soit une application, une couche d'accès au médium ou un dispositif de localisation par exemple.

Dans une première approche, le nœud n'ayant matériellement qu'une seule horloge - son horloge locale - et toutes les horloges étant cadencées à la même fréquence, synchroniser les nœuds revient à ce que chaque nœud parvienne à maintenir une valeur d'*offset* (équation 1.2) qui lui est propre, par l'usage d'un protocole de synchronisation. Cet offset permet à ce nœud de retrouver l'horloge partagée à partir de l'horloge locale, et vice-versa.

Dans une seconde approche, plus précise que la première, synchroniser les nœuds revient à ce que chaque nœud parvienne à maintenir un couple de valeurs (*offset, skew*), qui lui sont propres, par l'usage d'un protocole de synchronisation. Dans cette seconde approche, le nœud tient compte de sa propre dérive par rapport à un ou plusieurs autres nœuds et parvient à une synchronisation plus précise s'il est capable d'identifier cet écart de fréquences.

L'état de l'art réalisé pendant le stage a montré que la synchronisation d'horloge dans les systèmes répartis a largement été étudiée, y compris sur les réseaux sans fil, et y compris pour les réseaux de capteurs sans fil. Dans ce contexte, la convergence vers une horloge commune est une problématique plus complexe que sur les systèmes centralisés, à cause de l'absence d'un référentiel temporel unique. D'autre part, puisque nous sommes dans un contexte sans fil, les problèmes liés à l'incertitude de la réception des messages et les délais de transmission ajoute une difficulté supplémentaire à la tâche de synchronisation.

1.3.3.2.2 Élaboration de SiSP, un protocole de synchronisation simple et léger

Suite au stage de Mlle Chaymaa Zidi, nous avons continué à travailler sur la problématique et avons proposé le protocole *Simple Synchronisation Protocol* (SiSP) en nous basant sur les trois hypothèses indiquées plus haut. De plus, nous souhaitions parvenir à une synchronisation :

- sans aucune hypothèse de hiérarchie dans les nœuds; la synchronisation devait être *consensuelle*, c'est-à-dire obtenue après une suite de compromis entre les nœuds participants, sans hiérarchie,
- sans aucune hypothèse d'ordre topologique; le protocole doit être opérationnel sur n'importe quelle topologie, étoile, arbre comme maillée, et à partir de deux nœuds,
- par l'intermédiaire de messages diffusés (*broadcast*) dans le voisinage à un saut de chaque nœud, si possible sans unicast, de manière à pouvoir être encapsulés dans des messages de découverte de voisinage, tels que des *beacons* au niveau MAC (comme ceux proposés dans OCARI ou dans ADCF) ou des messages *hello* d'un protocole de routage, par exemple.

Simple Synchronisation Protocol (SiSP) répond à ces contraintes et son principe est relativement simple. Soit l'horloge locale de chaque nœud désignée par (LCLK, *Local Clock*) et l'horloge commune, désignée par « *horloge partagée* » (SCLK, *Shared Clock*), cadencée à la même fréquence que LCLK, dont l'offset est défini selon l'équation 1.5. L'objectif de SiSP est de déterminer et de maintenir une valeur d'offset interne à chaque nœud, de manière répartie et sans hiérarchie, par une série de consensus, de manière à ce que tout nœud du réseau dispose à tout instant une valeur commune de SCLK dans une marge acceptable. Les protocoles se limitent à des transmissions en diffusion.

$$offset(t) = LCLK(t) - SCLK(t) \quad (1.5)$$

Régulièrement, tout nœud SiSP va diffuser sa vision de l'horloge partagée par un message SYNC; à la réception de SYNC, tout nœud fait une moyenne entre sa propre valeur de l'horloge partagée à l'instant de la réception et la valeur contenue dans SYNC, puis modifie son offset avec le résultat de la moyenne. Après plusieurs itérations, dont le nombre dépend en particulier du nombre de nœuds et de la topologie, les horloges convergent et la synchronisation est obtenue. Les messages continuent à être diffusés pour maintenir la synchronisation.

L'algorithme 1 détaille les actions exécutées sur réception de SYNC. La constante SYNC_PRECISION est fixée à la dizaine de microsecondes. Un nœud se considérera synchronisé s'il n'existe aucun `synchroFlag` positionné à faux dans sa table de voisinage.

La précision visée est la dizaine de microsecondes à un saut sur une couche physique telle que celles utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil. L'objectif n'est pas ici de fournir une synchronisation absolue parfaite, mais plutôt une synchronisation relative (entre voisins) acceptable pour synchroniser des actions de niveau MAC comme le cadencement d'un TDMA par exemple. Cette synchronisation doit donc rester satisfaisante à deux ou trois sauts. A n sauts, SiSP peut fournir un service de datation global, mais d'une part avec une précision moins bonne puisque la synchronisation reste relative à la masse des nœuds synchronisés, et d'autre part à condition de mettre en place une translation vers une base de temps absolue.

Plusieurs variantes de SiSP ont été ensuite proposées, comme par exemple SiSPv2, où les nœuds diffusent un *poids* dans les messages SYNC en plus de l'horloge partagée. Ce poids est par exemple égal au nombre de voisins avec lequel le nœud se sait synchronisé, plus un. Le poids du nœud est ensuite utilisé dans le calcul de la moyenne; un nœud déjà synchronisé avec un nombre important de voisins aura un

Algorithm 1 Algorithme du traitement d'un message SYNC reçu dans SISP v1

$lclk$ = valeur de l'horloge locale à la réception de SYNC
 $neighb$ = adresse de l'émetteur de SYNC
 $rsclk$ = horloge partagée contenue dans SYNC
 $sclk$ = $lclk - \text{offset}$ ▷ Heure partagée à la réception de SYNC
if $|rsclk - sclk| < \text{SYNC_PRECISION}$ **then** ▷ Maintien de la table de voisinage
 $neighbourTable[neighb].\text{synchroFlag} = \text{vrai}$
else
 $neighbourTable[neighb].\text{synchroFlag} = \text{faux}$
end if
 $\text{offset} = lclk - \frac{sclk + rsclk}{2}$ ▷ Mise à jour consensuelle de l'offset du nœud récepteur

Algorithm 2 Algorithme du traitement d'un message SYNC reçu dans SISP v2

$lclk$ = valeur de l'horloge locale à la réception de SYNC
 $weight$ = poids du nœud récepteur ▷ Nombre de voisins synchronisés + 1
 $neighb$ = adresse de l'émetteur de SYNC
 $rsclk$ = horloge partagée contenue dans SYNC
 $rweight$ = poids du nœud émetteur contenu dans SYNC
 $sclk$ = $lclk - \text{offset}$ ▷ Heure partagée à la réception de SYNC
if $|rsclk - sclk| < \text{SYNC_PRECISION}$ **then** ▷ Maintien de la table de voisinage
 $neighbourTable[neighb].\text{synchroFlag} = \text{vrai}$
else
 $neighbourTable[neighb].\text{synchroFlag} = \text{faux}$
end if
 $\text{offset} = lclk - \frac{sclk * weight + rsclk * rweight}{weight + rweight}$ ▷ Mise à jour consensuelle de l'offset du nœud récepteur

poids important, ce qui permettra à un nœud non-synchronisé de converger plus rapidement vers l'horloge consensuelle. L'algorithme 2 détaille les actions exécutées sur réception de SYNC.

Une troisième et dernière version de SiSP reprend le principe de la version n° 2, mais augmente la phase d'écoute pour rejoindre le réseau et initialise le poids initial d'un nœud à zéro. Ainsi, dans le cas d'un réseau déjà synchronisé, les nouveaux nœuds adhèrent immédiatement au consensus préétabli par les autres nœuds, ce qui augmente la stabilité de la synchronisation et diminue son temps de convergence en déploiement large échelle, notamment dans un contexte multi-saut à faible densité de liens.

1.3.3.2.3 Collaborations dans le sillage de SiSP

Au delà de nos propres travaux, cette thématique a permis le montage de deux collaborations où SiSP a été repris :

- Dans le cadre du projet GUINNESS, qui sera présenté en fin de chapitre 2, le protocole SiSP a servi de base pour proposer une méthode de synchronisation MAC pour un réseau de capteurs sans fil UWB. Dans ce contexte, plusieurs actions visant à améliorer le protocole original ont été menées : dans un premier temps, la convergence de SiSP a été démontrée mathématiquement ; dans un second temps, l'amélioration du modèle de synchronisation a été proposée et le calcul du temps de convergence a été établi ; enfin, une version améliorée du protocole, désignée par « PulseSiSP », a été proposée. En tenant compte de la dérive des horloges, elle permet d'obtenir une meilleure précision de synchronisation que SiSP v1. Ces résultats ont été publiés dans [31].
- Dans le cadre d'un partenariat non-contractualisé avec Dr. Nicolas Fourty et Dr. Jean-Paul Jamont du LCIS, nous avons mené une étude de SiSP sous l'angle de la *confiance (trust)*. En effet, le caractère collaboratif et consensuel du protocole SiSP en fait une cible particulièrement intéressante pour ce domaine de recherche. Cette étude est très importante car, si le caractère collaboratif imposé par la décentralisation du réseau entraîne une moindre robustesse du protocole, il est absolument nécessaire de disposer d'outils pour compenser cette faiblesse. Bien entendu, une partie des problèmes peut être solutionnée par un chiffrement permettant aux seuls nœuds autorisés de participer au consensus, mais en cas de faille, une parade peut être trouvée. De plus, ces outils de renforcement doivent eux aussi respecter une approche décentralisée ! C'est ainsi qu'une version plus robuste « TrustSiSP » a été proposée et évaluée par simulation. Cette version inclut des sondes permettant à chaque nœud d'observer le comportement de ses voisins dans l'exécution du protocole, et si besoin, de prendre des décisions visant à exclure un ou plusieurs voisins douteux. Ce travail a également fait l'objet d'une publication dans [32].

1.3.3.3 Résultats

Dans une première étude, le protocole a été implémenté sur un simulateur simple puis sur les nœuds Freescale IEEE 802.15.4 utilisés dans le cadre de la thèse de Mlle Juan Lu. Ses performances ont été évaluées et publiées dans [33]. Par exemple, la figure 1.11 illustre la convergence de 20 nœuds par SiSP v1, par simulation, où est représenté, pour tous les nœuds, l'évolution de l'horloge partagée SCLK dans le temps. Dans cette expérience, les nœuds sont répartis aléatoirement dans une topologie *mesh*, transmettent un message SYNC toutes les secondes et sont bootés à $t = 0$ avec une valeur aléatoire de $LCLK \in [0, 2^{31} - 1]$. En quelques secondes, les nœuds sont synchronisés.

Dans le cadre du projet GUINNESS, une nouvelle implémentation a été faite sur simulateur et également sur des nœuds réels, mais cette fois sur des DecaWiNos (cf. §2.3.2.3.4), nos nœuds implémentant

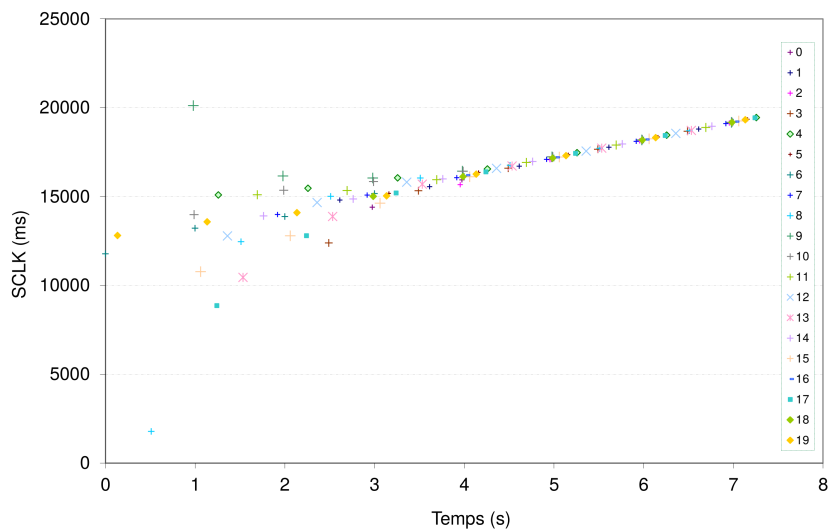


FIGURE 1.11 – Convergence de 20 nœuds par SiSP v1

la couche physique UWB du standard IEEE 802.15.4-2011 [34] utilisés dans le cadre du projet GUINNESS. La figure 1.12 représente l'évolution temporelle de l'écart d'horloge résiduel, pour trois nœuds exécutant SiSP v1, dans deux topologie différentes : en anneau (clique) ou en ligne, dans une échelle semi-logarithmique. Dans cette expérience, les nœuds diffusent un message SYNC toutes les secondes ; ces résultats ont été obtenus par simulation, nous permettant de maîtriser la différence des fréquences entre les nœuds : 0 ppm pour N_0 , 10 ppm pour N_1 et 20 ppm pour N_2 . Nous y voyons la convergence des horloges et leur maintien régulier malgré le *drift* des horloges. On observe un rapport de un à trois dans la durée de convergence entre les deux topologies ; en effet, dans la topologie en ligne, le nœud central est tiré successivement entre les deux nœuds extrêmes et qu'il ramène progressivement vers le consensus, effet relativement gommé par la représentation semi-logarithmique de la figure.

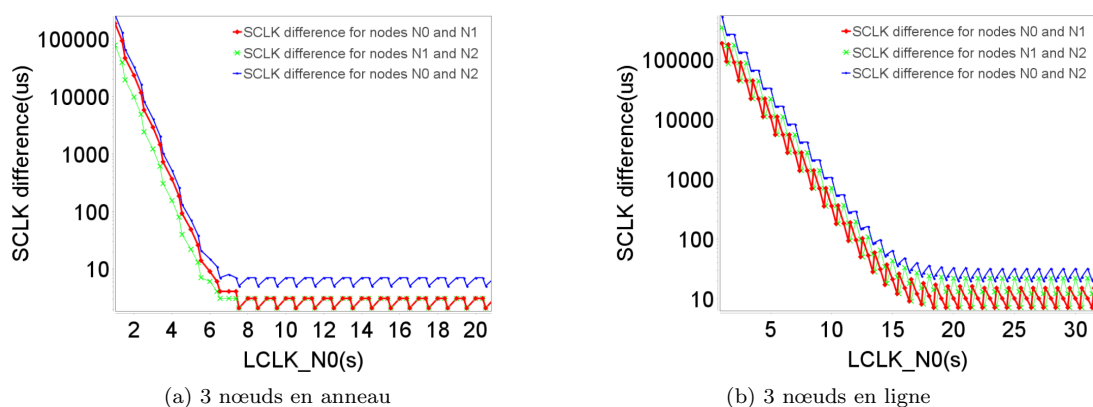


FIGURE 1.12 – Convergence de 3 nœuds par SiSP v1

Enfin, une implémentation de TrustSiSP a été réalisée dans l'environnement de simulation MASH [35]

[36] qui a permis d'une part la validation du passage à l'échelle de la convergence de SiSP v1 (300 nœuds) et d'autre part la comparaison entre SiSP et TrustSiSP. La figure 1.13 représente l'un des résultats obtenus, où les nœuds sont colorés en fonction de leur état : en rouge les nœuds malveillants, en vert les nœuds ayant lancé une procédure de lutte contre les nœuds malveillants et en jaune, les nœuds en état normal.

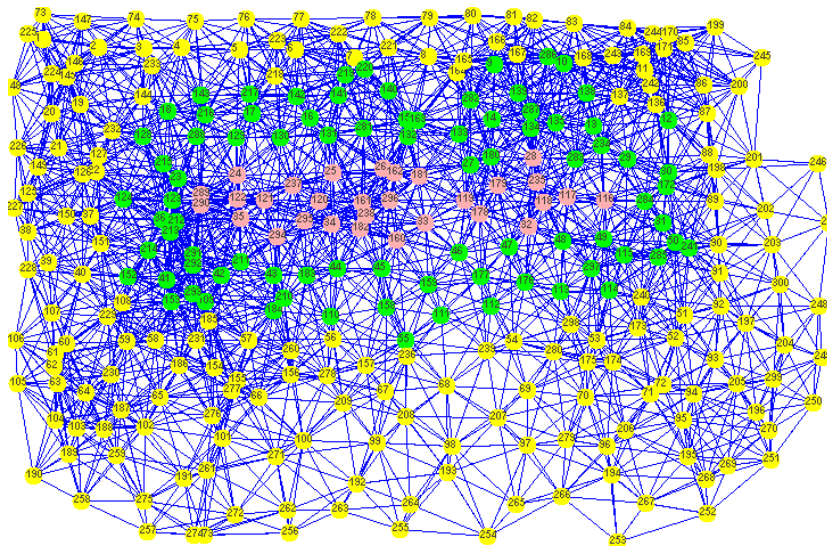


FIGURE 1.13 – Exclusion de nœuds déviants par TrustSiSP

SiSP a également été implémenté dans l'environnement OpenWiNo (cf. §1.3.5.2.1) et a permis la mise en place d'une MAC TDMA slottée sans hiérarchie, très simple, sans réutilisation spatiale, où les nœuds disposent chacun d'un slot temporel pour leurs échanges. Le numéro du premier slot disponible est diffusé sur l'ensemble du réseau dans les messages SYNC pour permettre à un nouveau nœud de s'insérer dans le réseau. Le départ d'un nœud n'est pas géré (le slot n'est pas réutilisé). Les nœuds maintiennent une table de voisinage et ne s'éveillent que pendant les slots de leurs voisins. Cette solution très simple qui ne passe pas à l'échelle permet néanmoins le déploiement de WSN sans hiérarchie auto-organisés de petite taille. Grâce à un analyseur de signaux logiques et les GPIO des nœuds, il est possible de représenter le découpage temporel et étudier la précision de synchronisation. La figure 1.14 représente le cadencement des slots TDMA synchronisé par SiSP pour un réseau de 8 nœuds, obtenu en temps réel à l'aide de l'analyseur d'état logique. Sur cette figure, on voit le découpage en slots pour les 8 nœuds ; grâce à cet outil, le temps de convergence (en phase de synchronisation) et la précision de synchronisation (en phase de maintien de synchronisation) peuvent être quantifiés.

1.3.3.4 Conclusions et perspectives sur cette activité de recherche

La thématique de la synchronisation est essentielle pour les protocoles MAC des réseaux sans fil à économie d'énergie ; c'est grâce à elle que les périodes de veille et d'activité peuvent être synchronisées, et les *rendez-vous* pris par les nœuds. La qualité de la synchronisation a un impact direct sur les dépenses énergétique des nœuds.

Le protocole SiSP a été proposé pour apporter une solution de synchronisation consensuelle et répartie, sans nœud central, ni hiérarchie. Il est opérationnel sur tout type de topologie. Basé sur un unique message SYNC diffusé, il est parfaitement adapté pour être encapsulé dans un *beacon* IEEE 802.15.4, OCARI ou

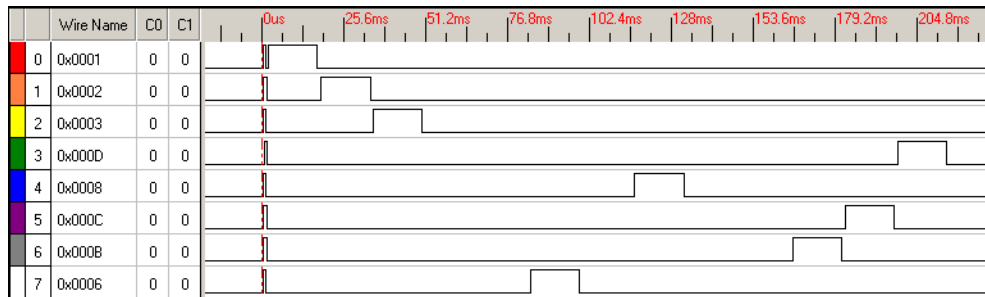


FIGURE 1.14 – Représentation des slots TDMA synchronisés par SiSP

ADCF. Ce détail est important car, de cette façon, il s’inscrit parfaitement dans notre objectif initial : en venant enrichir le contenu des *beacons*, il parvient à faciliter le déploiement sans contrainte des nœuds.

Bien que cette thématique n’ait pu être approfondie dans le cadre d’une thèse, elle a cependant été traitée comme une thématique qui nous était « propre » (ce qui est aussi très plaisant) et finalement, se révèle relativement complète : la convergence de l’algorithme de base a été démontrée mathématiquement, une étude du protocole de base a été réalisée par simulation et prototype et plusieurs améliorations ont été proposées par le biais de collaborations, très variées dans l’approche scientifiques - de l’asservissement sur la dérive à aspects *trust* des systèmes multi-agents.

Il ne resterait qu’à finaliser une étude homogène et comparative de SiSP dans ses différentes versions avec les protocoles classique de la littérature tels que *Reference Broadcast Time Synchronisation* (RBS), *Flooding Time Synchronization Protocol* (FTSP), etc. Ce papier est en cours d’écriture.

1.3.3.5 Publications marquantes

Conférence : Oana Andreea Hotescu, Katia Jaffres-Runser, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Synchronizing Tiny Sensors with SISP: a Convergence Study. In *ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, Miami Beach, USA, 21/11/2017-25/11/2017, novembre 2017

Conférence : Adrien Van den Bossche, Nicolas Fourty, and Jean-Paul Jamont. A Trusted Lightweight Synchronisation Protocol for Wireless Ad-hoc Networks. In *CIVEMSA IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Application*, Annecy, France, 26/06/2017-28/06/2017, juin 2017

Conférence : Adrien Van den Bossche, Thierry Val, and Rejane Dalce. SISP: a lightweight Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks (short paper). In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Toulouse, France, septembre 2011

1.3.4 Collaboration MAC-NWK

Co-encadrement de la thèse de M. Sabri Khssibi

« Utilisation des réseaux de capteurs de canne pour la surveillance de personnes »

Directeur de thèse : Pr. Thierry Val

Période : septembre 2011 - 2015

Financement : bourse de co-tutelle Franco-Tunisienne

Co-encadrement de la thèse de Mme Chiraz Houadia

« Vers des mécanismes de routage robustes et optimisés pour un réseau sans fil métropolitain et collaboratif »

Directeur de thèse : Pr. Thierry Val

Période : septembre 2012 - 2016

Financement : bourse de co-tutelle Franco-Tunisienne

1.3.4.1 Contexte des recherches menées

Pendant notre thèse de doctorat et le suite au projet OCARI, nous avons identifié un intérêt à faire collaborer les couches 2 et 3, dans la mesure où nombre de nos travaux, positionnés au niveau liaison de données, *empiétaient* sur les prérogatives du niveau réseau; par exemple, en vue d'améliorer substantiellement les performances d'une méthode d'accès par TDMA, il peut être judicieux de maintenir une table de voisinage à deux sauts par le niveau 2 - c'est justement cette option qui avait été retenue dans la thèse de Juan Lu avec le protocole ADCF. Pourtant, la plupart des protocoles de routage, dans les MANET notamment, sont basés sur un processus de découverte du voisinage, qui est très proche de celui mis en oeuvre au niveau 2.

Dans cette situation, plusieurs solutions sont envisageables :

- Le respect scrupuleux du modèle OSI et de son étanchéité : les protocoles des deux couches vont exécuter leur propre processus de découverte de voisinage. Cette solution est conforme au principe de séparation des tâches préconisé par le modèle OSI et simplifie la mise en place de l'empilement, mais induit une surcharge protocolaire, avec des conséquences énergétiques,
- Une collaboration entre les couches : l'un des protocoles exécute le processus de découverte du voisinage, puis partage ses informations avec l'autre protocole. Le nombre de messages échangés pour parvenir à cette connaissance du voisinage est réduit, mais cette collaboration n'est possible que si les deux couches partagent une interface riche et commune.

C'est dans ce contexte que nous avons rencontré le Pr. Leila Saidane et le Dr. Hanen Idoudi, du laboratoire CRISTAL, École Nationale des Sciences de l'Informatique (ENSI) de l'Université de la Manouba, Tunis, Tunisie, dont les travaux portent sur le routage dans les réseaux sans fil. Nous avons alors proposé deux sujets dans la thématique d'une possible collaboration entre les couches 2 et 3 : un premier sujet, traité dans le cadre de la thèse de M. Sabri Khssibi où, partant du niveau 2, nous avons cherché à faire utiliser au plus fin les primitives de paramétrage de la couche MAC IEEE 802.15.4 par les couches supérieures, dans un contexte RCSF; un second sujet, traité dans le cadre de la thèse de Mme Chiraz Houadia, où nous sommes partis, au contraire, de la couche 3 en vue d'explorer et utiliser au mieux les

possibilités offertes par les couches 1 et 2 pour optimiser les mécanismes de routage, cette fois dans un contexte de réseau d'accès sans fil métropolitain.

1.3.4.2 Axes de recherche et principales contributions

1.3.4.2.1 Optimisation de IEEE 802.15.4 pour les BANs

Le travail présenté ici s'inscrit dans le projet Franco-Tunisien ACOCASP (*Architectures de COmmunication basées sur réseaux de CAPteurs pour la Surveillance de Personnes*) et le projet CANet (*CANe NETWORK*), qui proposent une étude de la mise en réseau de cannes de marche équipées de capteurs. L'objectif est de permettre la surveillance de personnes âgées de façon non intrusive, par l'intermédiaire de leur canne de marche, sans nécessité d'équiper la personne d'un boîtier porté à la ceinture ou en pendentif. La canne embarque des capteurs et actionneurs, qui sont activés en fonction des paramètres à surveiller et des interactions possibles avec l'objet. La figure 1.15 illustre cette canne.

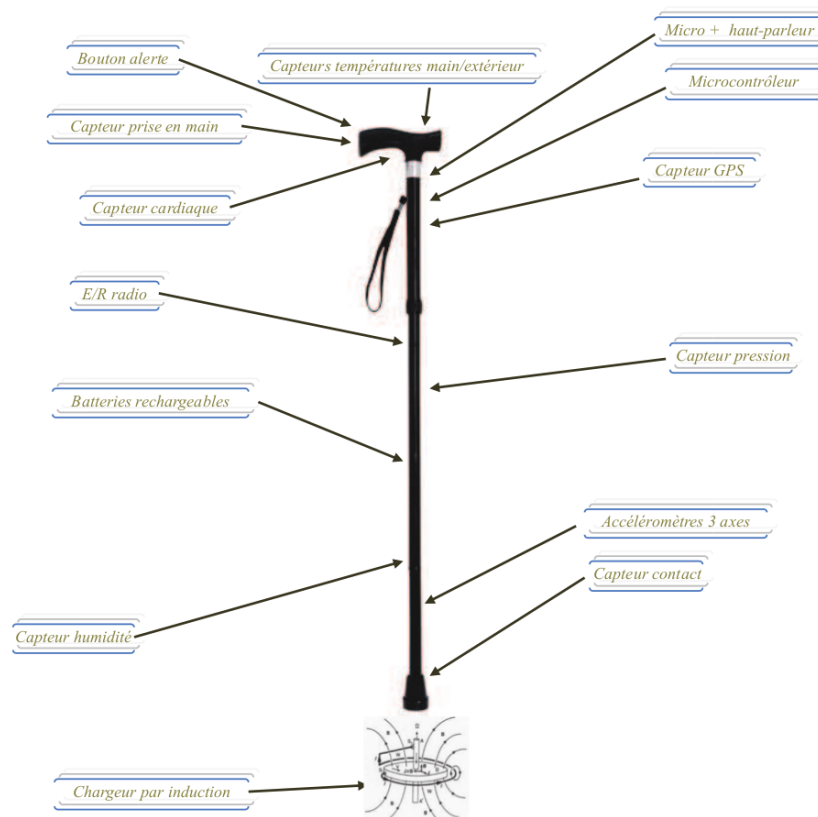


FIGURE 1.15 – CANet : une canne connectée et équipée de nombreux capteurs et actionneurs

D'un point de vue réseau, la canne est un nœud typique au sens RCSF, mais embarquant un nombre important de capteurs et d'actionneurs. Ces capteurs et actionneurs étant chacun soumis à des contraintes temporelles différentes, il convient de mettre en place des stratégies de priorisation des trafics en fonction

de l'information véhiculée et de sa criticité dans la surveillance de la personne, ce qui n'est pas prévu par la norme initiale IEEE 802.15.4 [9].

Dans la thèse de M. Sabri Khssibi, à la différence des travaux précédents (Notre thèse, OCARI, ADCF), nous avons fixé comme contrainte de ne pas modifier les deux premières couches de l'empilement protocolaire IEEE 802.15.4, mais plutôt de jouer sur ses différents paramètres (SO, BO, etc.) et ses fonctionnalités (GTS, longueur de GTS, etc.) afin de proposer à la couche supérieure un service le plus finement adapté, en fonction du profil de trafic soumis au transport.

La problématique principale de la thèse de M. Sabri Khssibi était donc la suivante : comment, sans apporter de modification à la structure ni aux services rendus par les deux premières couches PHY et MAC normalisées par le standard IEEE 802.15.4, permettre la prise en charge de trafics hétérogènes, tout en respectant des contraintes de Qualité de Service imposées ?

L'étude a d'abord consisté à proposer une classification des trafics engendrés par les capteurs et actionneurs de la canne pour mettre en évidence des classes de Qualité de Service. Les critères suivants ont été retenus : périodicité, débit et priorité. Chaque trafic a été qualifié selon ces trois critères en fonction de l'application qui a généré ce trafic, et ce de manière exhaustive pour le prototype de canne étudié.

Après avoir étudié la littérature - très dense, sur ce thème, les lacunes de la norme IEEE 802.15.4 ont été identifiées. L'un des inconvénients majeurs est l'impossibilité pour la sous-couche SSCS (située entre la sous-couche MAC et l'interface IEEE 802.2) de prendre en charge plusieurs paquets, ceci à cause du support d'un unique service LLC (type 1 uniquement). De ce fait, lorsqu'un paquet est soumis à l'interface SSCS, celle-ci est bloquée tant que la couche MAC n'a pas retourné un message de succès. Or, sur un réseau bas débit et fortement organisé temporellement comme le mode *beacon* de IEEE 802.15.4, l'attente de la bonne période MAC (CAP ou CFP) monopolise le nœud et introduit des délais importants qui pénalisent le transport des données, rendant impossible le respect des contraintes temporelles évoquées plus haut.

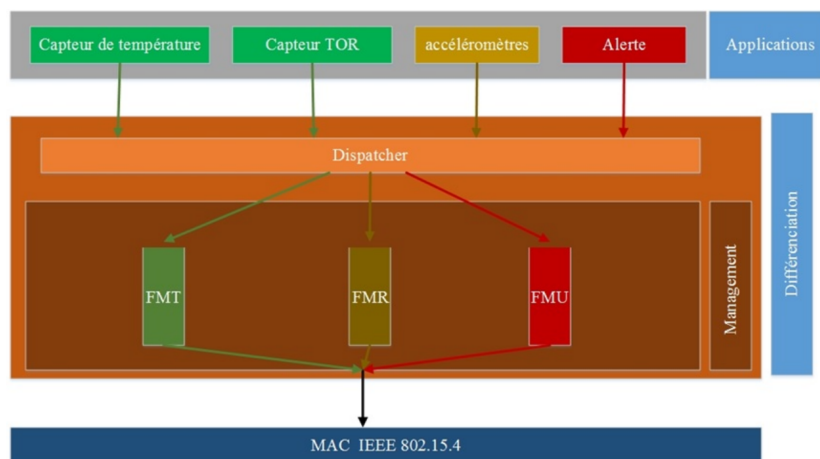


FIGURE 1.16 – Dispatcher dans l'empilement protocolaire (source : thèse Sabri Khssibi)

Pour résoudre ce problème, l'une des contributions de la thèse a été de proposer une sous-couche de différenciation, présente sur le Coordinateur comme sur les *End-Devices*, intermédiaire entre le niveau 2 et le niveau 3 de l'empilement protocolaire, dont le rôle était de traiter le paquet et solliciter le service de la MAC le plus approprié à la donnée à transporter, en fonction de ses critères de QoS. Les critères de QoS considérés étaient la fiabilité du transport ou non (vis-à-vis du transport temps réel de l'audio, notamment)

et les contraintes temporelles. La sous-couche de différenciation proposée est représentée sur la figure 1.16. Elle est constituée :

1. d'une couche *Dispatcher*, qui est chargée de la classification des paquets, en fonction de l'information associée à ce paquet, venant de la couche supérieure,
2. de trois files d'attente *FMT* (sans contrainte temporelle), *FMR* (avec contraintes temporelles) et *FMU* (pour les messages d'alerte),
3. d'un objet *Management*, qui est chargé de la mise en file d'attente et de la sollicitation de la couche MAC dans le mode opportun en fonction de la période en cours (CAP, par utilisation du protocole CSMA/CA ou CFP, par utilisation des GTS).

La couche est chargée de la configuration des paramètres de IEEE 802.15.4 côté coordinateur (BO, SO) et sur les *End-Devices* (gestion des GTS). A l'émission, lorsque la sous-couche de différenciation reçoit un paquet de la couche supérieure, elle le place dans l'une des files d'attente, en fonction du profil de trafic associé aux données présentes dans le paquet. La ou les files d'attente sont ensuite vidées en utilisant la période et le mode de transmission adéquats (CAP ou CFP). Afin d'utiliser au mieux les services de la couche MAC, la primitive *PURGE*, permettant de vider le paquet en cours de traitement par IEEE 802.15.4, a été utilisée; ceci permet la sous-couche différenciation de délester la MAC en fin de période CAP ou CFP pour présenter le paquet suivant à transmettre, en restant synchrone avec la MAC. Un algorithme de sélection des files d'attente, ainsi qu'un format de données pour la communication entre les couches, a également été spécifié dans les travaux de cette thèse.

Une autre contribution de la thèse de M. Sabri Khssibi concerne le transport de l'audio sur IEEE 802.15.4, afin de permettre une communication audio temps réel, via la canne, entre la personne et le plateau de télé-assistance, par exemple pour une levée de doute en cas de détection de chute. Si la technologie IEEE 802.15.4 est initialement peu adaptée aux transports d'information à fortes contraintes temporelles, les travaux de M. Sabri Khssibi ont permis d'améliorer sensiblement la technologie sur ce plan; cependant :

- le débit demeurant faible, il convient de choisir finement le codec utilisé pour compresser les données de voix; un travail d'identification et de comparaison de plusieurs codecs a été effectué. L'un d'entre eux a été choisi et testé en simulation sous OMNET++,
- le transport de la voix, sans latence, nécessite un accès au médium fréquent et régulier, ce qui peut nécessiter une reconfiguration dynamique de l'accès au médium; un mécanisme de reconfiguration dynamique a donc été proposé par M. Sabri Khssibi et ses performances ont été étudiées par simulation.

Les résultats complets des travaux de M. Sabri Khssibi sont consultables dans son manuscrit.

1.3.4.2.2 Métriques de routage basées sur les interférences

Dans ce second travail sur la thématique de la collaboration entre les couches MAC et NWK, nous nous étions donné pour objectif de travailler sur les techniques de *cross-layering*, avec dans l'idée que, pour être efficace, le protocole de routage mis en oeuvre sur un réseau sans fil maillé pouvait profiter d'informations émanant des couches inférieures. Si la métrique mise en oeuvre dans la détermination des routes pouvait tenir compte d'informations telles que le taux de perte de trame (FER) ou le débit *efficace* de la couche Physique, la pertinence de ses décisions serait grandement améliorée. En effet, dans un réseau sans fil maillé où les communications peuvent emprunter différents chemins pour arriver à destination, les

différentes ré-émissions, mono-canales, liées au routage des paquets, peuvent provoquer une perturbation dont la portée dépasse le simple lien entre les deux routeurs concernés à un instant t [37]. Mieux, si le protocole de routage pouvait anticiper l'interférence créée par l'émission de ses propres paquets [38] issus d'un même flux (interférences *intra-flux*) voire de différents flux (interférences *inter-flux*), alors il pourrait prévoir l'emprunt de chemins parallèles non interférents et augmenter considérablement les performances du réseau.

Au même moment, nous étions impliqué, à titre personnel, sur la création de l'opérateur Télécoms associatif *Tetaneutral.net* (TTN) [39]. L'un des objectifs de TTN est de promouvoir la neutralité de l'Internet ; pour ce faire, TTN avait alors décidé de déployer plusieurs réseaux d'accès en IPv4 et IPv6 dans la région Toulousaine, en vue de sensibiliser très concrètement le public intéressé dans la démarche, par la *fourniture d'un accès internet neutre*. C'est dans cette démarche que TTN s'était rapproché de l'association Toulouse-Sans-Fil (TSF) [40] dont nous étions membre actif, qui avait une expérience pragmatique dans le déploiement de liens sans fil haut débit et longue distance, sur les toits de Toulouse. Ce réseau était principalement basé sur un *backbone* constitué de liens IEEE 802.11n longue distance - typiquement plusieurs kilomètres entre deux nœuds. Si les liens déployés par TSF puis par TTN étaient fiables, leur gestion très statique (configuration AP-STA, WDS actif) ne supportait aucune dynamique, ni dans la topologie (arbre), ni dans le routage (pas de boucle au niveau L2, un seul sous-réseau IP).

C'est dans ce contexte partenarial, avec le laboratoire CRISTAL pour les compétences réseau d'une part, et avec TTN pour le terrain d'expérimentation d'autre part, que nous avons entamé le co-encadrement de la thèse de Mme Chiraz Houaidia, orienté sur la robustesse et l'optimisation du routage sur un réseau sans fil maillé, métropolitain et collaboratif.

La problématique principale de la thèse de Mme Chiraz Houaidia était donc la suivante : comment, à partir d'informations remontées par les couches Physique et Liaison de données, dans un contexte technologique IEEE 802.11n, était-il possible d'améliorer une métrique de routage existante - voire d'en proposer une nouvelle - permettant de prendre en compte les interférences intra-flux et inter-flux dans le processus de routage, sur un réseau maillé sans fil ?

Le travail de thèse de Mme Chiraz Houaidia a débuté par une phase intense d'étude et de caractérisation des liens IEEE 802.11n dans le contexte réel. Plusieurs nœuds semblables à ceux utilisés sur le *backbone* TTN ont été déployés dans le laboratoire à Blagnac pour former un petit *testbed* compatible IEEE 802.11n désigné par BlueMeLab (*Blagnac University MESH LAB*). Ce *testbed* était composé d'une dizaine de nœuds mono-interface sous Debian GNU/Linux et OpenWRT. C'est ainsi que nous avons pu réaliser plusieurs études montrant l'impact des couches PHY/MAC/NWK sur les performances, tantôt par l'usage du *testbed*, tantôt par simulation, en faisant varier les combinaisons de protocoles des trois premiers niveaux de l'empilement OSI :

- **au niveau PHY**, avec les deux versions IEEE 802.11b et IEEE 802.11n,
- **au niveau MAC**, avec la version originelle IEEE 802.11b, les mécanismes d'agrégation de IEEE 802.11n et la gestion particulière de 802.11s, incluant le relayage de trame multi-saut - semblable au routage - au niveau 2 (à la manière *mesh-under* de 6LoWPAN),
- **au niveau NWK**, par la mise en oeuvre de différents protocoles : réactifs (AODV), pro-actifs (OLSR) et hybrides (HWMP), avec une étude plus spécifique sur les différentes métriques utilisées classiquement sur OLSR (HC, ETX, ETT).

A partir de cette première étude, nous avons imaginé pouvoir proposer de nouveaux outils en vue d'estimer la capacité d'un lien, considérant son taux de perte et son débit résiduel. Une première métrique estimant le taux d'occupation du canal a été proposée, puis améliorée pour estimer le débit résiduel du

lien. Cette métrique RLC (*Residual Link Capacity based metric*) a été évaluée par l'usage du *testbed BlueMeLab*. La capacité résiduelle RLC_l d'un lien l est calculée ainsi : une fois la capacité du canal B_l sur le lien l estimée, on y retranche la quantité de données Tx_l à envoyer sur le lien l par unité de temps ω . L'équation 1.6 résume ce principe. La capacité résiduelle d'une route est la plus petite capacité résiduelle, pour chaque lien l de la route R (équation 1.7).

$$RLC_l = B_l - \frac{Tx_l}{\omega} \quad (1.6)$$

$$RLC_R = \min(RLC_l) \quad (1.7)$$

Dans un second temps, les interférences inter-flux et intra-flux ont été considérées par la proposition d'une troisième métrique basée sur un modèle d'interférences via le calcul d'un graphe de conflit. A la différence des travaux de Mlle Juan Lu sur ADCF (cf. section 1.3.2), l'élaboration de cette métrique a reposé sur l'hypothèse que lorsqu'un nœud transmet un message, sa zone d'interférence (*Range of sensivity, R_s*) est le double de sa zone de portée (*Range of communication, R_c*); considérant une topologie multi-saut, la zone d'interférence est donc théoriquement bornée maximale à deux sauts. Si le message transmis nécessite un acquittement par le destinataire - situé à un saut - alors la zone d'interférence est de deux sauts *après* le destinataire (destinataire local, au niveau MAC).

Appliquons ce principe à la topologie en ligne représentée par la figure 1.17a : lorsque le lien 1 est utilisé par les nœuds a et b , alors les liens 2 et 3 ne doivent pas être utilisés car ils seront perturbés :

- le lien 2 par la réception directe des messages de b et la réception des interférences de a ,
- le lien 3 par la réception des interférences de b .

Il est possible de représenter ces contraintes sous forme du graphe d'interférence représenté en figure 1.17b, où chaque lien de la topologie est un nœud sur le graphe, et où chaque arc du graphe lie deux liens interférents. On y retrouve toutes les interférences de la topologie de la figure 1.17a.

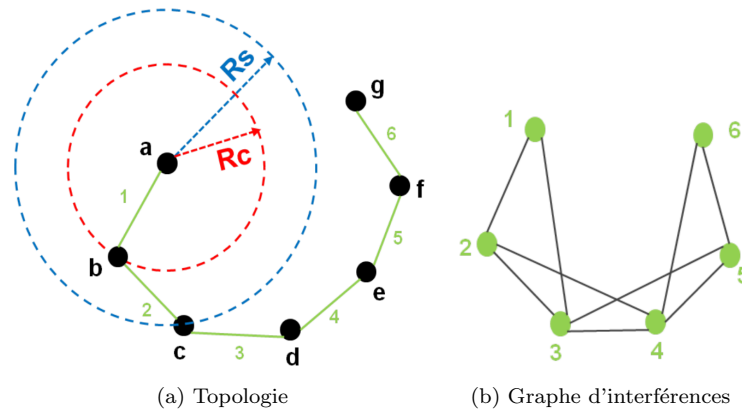


FIGURE 1.17 – Exemple de topologie et graphe d'interférences correspondant

Grâce à ce graphe d'interférence, nous pouvons modéliser les interférences entre les liens du réseau possiblement impliqués dans le routage, par la recherche des *cliques d'interférences*; dans la thèse de Mme Chiraz Houaidia, une clique d'interférence a été définie comme *est un ensemble de sommets en conflit*

mutuellement les uns avec les autres dans le graphe de conflit. Par exemple, dans le cas de la figure 1.17, $\{1, 2\}$, $\{1, 3\}$, $\{1, 2, 3\}$ et $\{3, 4, 5\}$ sont des cliques d'interférence. De plus, une clique maximale d'interférence est un sous-graphe complet qui n'est pas contenu dans un autre sous-graphe complet. Toujours dans le même exemple, $\{1, 2, 3\}$ et $\{3, 4, 5\}$ sont des cliques maximales. Si le modèle d'interférence considéré est valide dans la réalité, alors il suffit de limiter les émissions d'un seul nœud du réseau par clique maximale à un instant donné pour garantir l'absence d'interférence entre flux sur le réseau. Si le protocole de routage a connaissance du modèle d'interférence, il peut organiser la sollicitation des liens de manière optimale selon ce critère. Nous sommes ici réellement au coeur de la problématique de collaboration MAC-NWK, où la couche routage vient activer macroscopiquement les accès au médium dans un voisinage de plusieurs sauts.

Pour optimiser ce routage, la métrique RLC définie plus haut est améliorée pour tenir compte non plus seulement de la capacité résiduelle du lien (équation 1.6), mais la capacité résiduelle de la clique, notée C_q (capacité résiduelle de la clique q). C'est ainsi qu'a été définie RLCI, pour (*Residual Link Capacity based metric with Interference consideration*) (équation 1.8), avec AB_R l'estimation de la capacité de la route R constituée d'un ensemble de n liens $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$.

$$AB_R = \min(C_k) \quad (1.8)$$

$$C_k = \left(\sum_{i=k}^{k+m} \frac{1}{RLC_i} \right)^{-1} \quad (1.9)$$

Nous noterons la présence d'un paramètre m dans l'équation 1.9 qui permet d'ajuster le nombre de liens considérés dans le modèle d'interférence; dans l'exemple de la figure 1.17, $m = 2$. Dans la thèse de Mme Chiraz Houaidia, le modèle très populaire TRCA (*Receiver Transmitter Conflict Avoidance*) [23] a également été étudié; dans ce cas, la zone de d'interférence considérée est trois sauts après le destinataire (destinataire local, au niveau MAC) : $m = 3$.

Un protocole adapté à la métrique a enfin été proposé : LARM, pour *Link Availability based Routing Mechanism*. LARM est basé sur le protocole de routage pro-actif DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*), et propose plusieurs améliorations pour tirer partie de la métrique, notamment en ajoutant une composante réactive sur la mise à jour des tables de voisinage et de routage. Une sélection des chemins candidats est également ajoutée à la diffusion à destination du voisinage. Ce protocole a été simulé sous NS3, et comparé à d'autres protocoles et métriques.

Les résultats présentés dans la thèse de Mme Chiraz Houaidia sont nombreux. Nous retiendrons deux études pour ce document : une première sur l'évaluation des performances de la métrique RLCI, et une seconde sur le protocole LARM et sa comparaison avec d'autres protocoles et métriques.

Dans une première expérimentation, nous avons mis en oeuvre, par simulation, une quarantaine de nœuds répartis aléatoirement sur une zone de 2,5 km², avec une portée circulaire fixée, dans le simulateur, à 250 mètres. 12 flux de 1 Mbit/s sont produits aléatoirement dans le temps, et entre différentes paires de manière à brasser les longueurs de routes. Les mêmes trafics et les mêmes paires de nœuds sont rejoués plusieurs fois, en recalculant le routage par d'autres métriques : HC, ETX et ALM. La figure 1.18 donne un aperçu des performances de LARM/RLCI; sur les trois graphes, nous représentons le débit cumulé par paire de nœuds pour différentes routes calculées par RLCI et par une autre métrique. Pour chaque flux, la valeur du débit obtenu par LARM/RLCI est représentée sur l'axe y , alors que le débit obtenu par l'autre combinaison protocole/métrique est représenté sur l'axe x . La partie gauche supérieure représente donc des flux où la combinaison LARM/RLCI est gagnante sur l'autre. On y voit globalement la supériorité de RLCI.

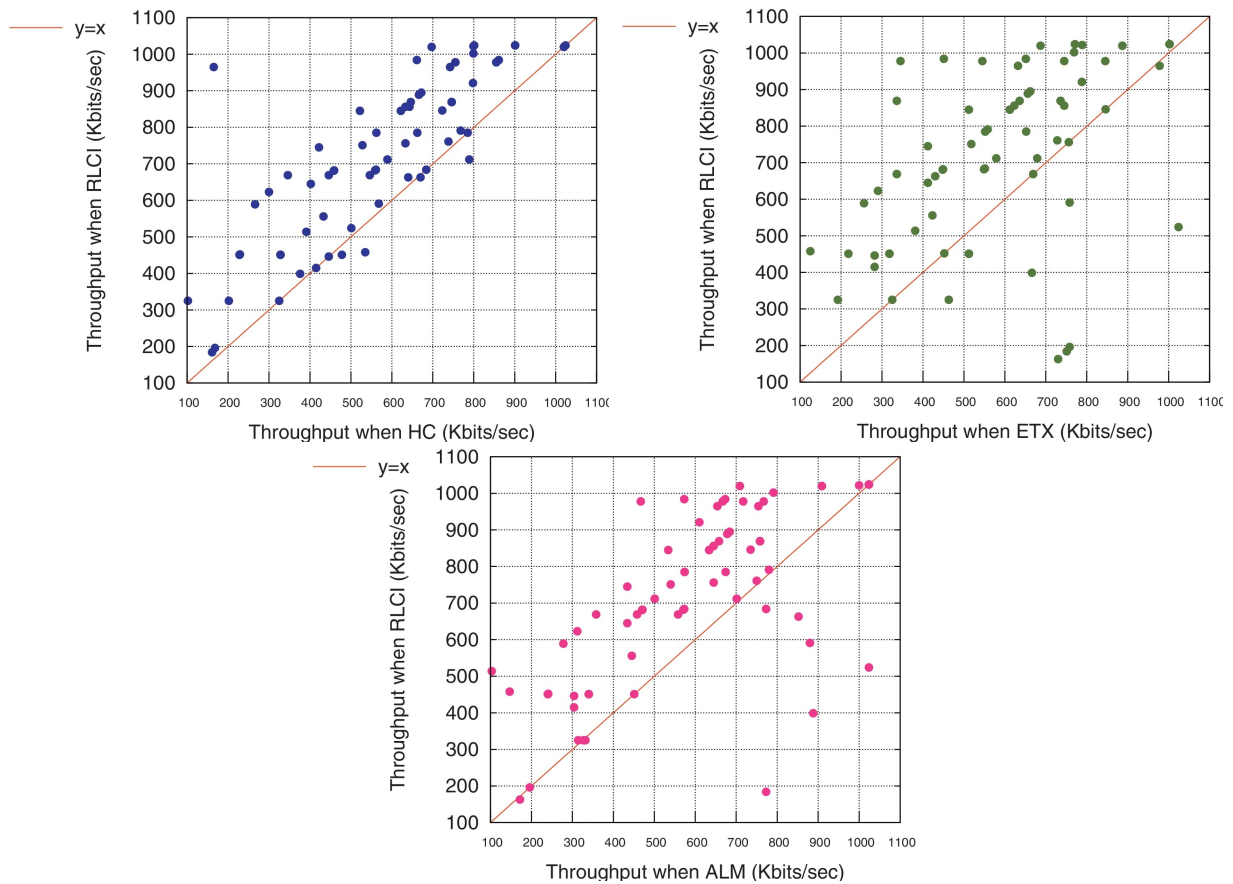


FIGURE 1.18 – Résultats LARM : comparaison entre plusieurs métriques, dont RLCI

Dans une seconde expérimentation, nous avons cherché à comparer le tandem LARM/RLCI avec d'autres couples {protocole, métrique}. Les protocoles étudiés sont aussi bien réactifs, proactifs qu'hybrides. La figure 1.19 montre les combinaisons d'empilements protocolaire/métriques qui ont été étudiées par simulation : DSDV/HC, OLSR/ETX, DSR/HC et HWMP/ALM. Les simulations ont tenu compte d'un nombre variable de nœuds (20 à 100 nœuds sur la même zone et les mêmes portées, ce qui est relativement réaliste par rapport aux déploiements de Tetaneutral). Les critères de performance classiques ont été observés : délai de bout-en-bout, taux de perte, débit et *overhead*. Les nombreux résultats sont visibles dans le manuscrit de la thèse. Nous retiendrons que la détection des interférences inter-flux et intra-flux donne des performances intéressantes sans trop augmenter la charge protocolaire, y compris en situation dense où les voisins sont nombreux.

Une grande partie des résultats de la thèse de Mme Chiraz Houaidia a été publiée dans [41].

1.3.4.3 Conclusions et perspectives sur l'encadrement de l'activité de recherche

Dans cette activité de recherche, nous avons cherché à utiliser les couches MAC IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11 telles quelles, sans les modifier, et de les faire collaborer avec la couche supérieure le plus finement possible. Alors que dans le travail de thèse de M. Sabri Khssibi, nous avons joué sur les mécanismes de

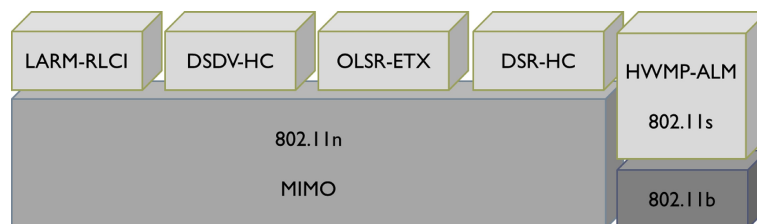


FIGURE 1.19 – Combinaisons d’empilements protocolaire et métriques qui ont été étudiées par simulation

files d’attente pour présenter à la couche MAC le paquet le plus pertinent à l’instant t malgré un trafic hétérogène, dans le travail de thèse de Mme Chiraz Houaidia, nous avons proposé des métriques de routage et leur protocole associé en vue de tenir compte des interférences intra-flux et inter-flux identifiées par les remontées des couches basses. Les travaux ont permis d’aboutir à de résultats intéressants qui ont été publiés dans deux revues [42] et [41]

Même si nous avons poussé les deux doctorants à investiguer le volet prototypage réel, les performances des protocoles proposés ont majoritairement été étudiés par simulation (OMNET++, NS2 et NS3). Dans ces encadrements, nous avons une nouvelle fois noté que les portées radio et l’omnidirectivité de l’antenne implémentées dans les modèles de logiciels de simulation réseaux ne sont pas réalistes. De plus, même avec une version très récente de NS3, il n’est pas trivial de simuler une couche PHY IEEE 802.11n car les modèles disponibles en 2014 et 2015 s’arrêtaient à 802.11b, alors que la couche MiMo de WiFi avait été standardisée plus de dix années auparavant. Enfin, une autre difficulté venait de la complexité et de la non versatilité des logiciels de simulation réseau qui rendent impossibles les simulations d’empilements pourtant possibles en réalité : exemple de 802.11s avec une couche PHY MiMo.

Cependant, nous avons également noté, dans ces encadrements, la difficulté de conduire des travaux de recherche jusqu’à l’implémentation réelle en vue de confronter les résultats de simulation à la réalité. Mis à part le réalisme de l’environnement - réel par nature - les environnements de prototypage réels souffrent finalement des mêmes défauts que les outils de simulation ; les environnements de développements ne sont pas assez versatiles, les empilements protocolaires présentent des interdépendances qui en limite les combinaisons, etc. Comble de découragement, pour les utilisateurs les plus téméraires, l’inévitable coloration *embarqué*, avec un nécessaire développement de bas niveau en Langage C, par exemple, fait que le travail d’ingénierie nécessaire n’est clairement pas du niveau de tout doctorant, car ajoute une difficulté d’ingénierie à la tâche de recherche, qui, avec ce degré de complexité dans le développement logiciel, constituent deux métiers différents.

Ces travaux nous ont définitivement convaincus qu’il fallait innover dans le prototypage rapide des protocoles sur environnements réels, thème que nous allons développer dans l’activité de recherche suivante.

1.3.4.4 Publications marquantes

Revue : Sabri Khssibi, Hanen Idoudi, Adrien Van den Bossche, Thierry Val, and Leila Azzouz Saidane. Presentation and analysis of a new technology for low-power wireless sensor network. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications*, 3(1), 2013

Revue : Chiraz Houaidia, Hanen Idoudi, Adrien van den Bossche, Leila Azouz Saidane, and Thierry Val. Inter-flow and intra-flow interference mitigation routing in wireless mesh networks. *Elsevier Computer Networks*, 2017

1.3.5 Testbeds pour les WSN et le réseau de collecte de l'IoT

Encadrement de M. Xiaobin Zhuang dans son stage de M2

« *Protocoles pour le réseau de collecte dans l'Internet des Objets* »

Période : mars - juillet 2016

Financement : projet Région/FEDER Ophelia

Encadrement de M. Laurent Guerby, ingénieur d'études

« *Développement de protocoles pour le réseau de collecte de l'IoT* »

Période : avril 2016 - mars 2017

Financement : projet Région/FEDER Ophelia

Co-encadrement de la thèse de M. Nicolas Gonzalez

« *Architectures protocolaires interopérables et multi-technologie pour le réseau de collecte dans l'Internet des Objets* »

Directeur de thèse : Pr. Thierry Val

Période : janvier 2017 - aujourd'hui

Financement : bourse CIFRE

1.3.5.1 Contexte des recherches menées

Suite à notre thèse de doctorat, et ce fut confirmé par nos premiers encadrements, nous avons la conviction :

- que les études par simulation, dans le contexte scientifique des RCSEF, ne suffisaient pas. Les résultats sont trop approximatifs car très restrictifs, même avec des modèles très élaborés, forcément simplificateurs, qui induisent parfois des analyses de performances faussées. De plus, début 2010, nous assistions non seulement à une explosion technologique des moyens de transmission numériques sans fil (au niveau de la couche physique) mais aussi des usages, notamment avec la popularité croissante du thème de l'IoT et des objets connectés. LoRa, UWB, SigFox, LiFi, NFC, etc. étaient alors autant de moyens de transmission variés qui introduisaient de nouvelles problématiques que les logiciels de simulation réseaux tels que OPNET, NS, etc. ne pouvaient raisonnablement suivre : nous assistions alors à une nouvelle bataille technologique, comme celle que WiFi et Bluetooth avaient gagné face à HyperLAN, HomeRF, IrDA, etc. quinze années auparavant. Scientifiquement, dans les années 2010, cette nouvelle explosion technologique s'est traduite par une rupture méthodologique, où les méthodes d'évaluation par prototypage commencèrent à être vraiment reconnues par la communauté scientifique des Réseaux & Protocoles,
- de la nécessité de disposer d'un environnement de prototypage rapide pour les protocoles de niveau MAC et NWK très ouvert, souple, faible coût et permettant un transfert de technologie rapide et efficaces. Nous entendions par rapide et efficace, un transfert raccourci dans le temps, mais aussi et surtout une analyse pertinente et incontestable du point de vue de l'évaluation des performances - point très délicat en sans fil. Pourtant, grâce au prototypage, une évaluation réelle est faisable, y compris en environnement réel. Mais pour cela, faut-il encore disposer d'un outil souple et versatile,

permettant le déploiement efficace du réseau à évaluer dans l'environnement final, pour remonter des résultats de performances fiables et pertinents.

- que les travaux très nombreux sur les aspects énergétiques des réseaux de capteurs sans fil ne disposaient pas d'outils suffisamment efficaces pour traiter cette question. Là encore, les logiciels de simulation réseaux montraient rapidement leurs limites : trop peu précis dans les modèles énergétiques pour les simulateurs généralistes tels que OPNET, NS et OMNET++ car négligeant les dépenses énergétiques des capteurs voire même du processeur ; trop dépendants d'une architecture matérielle et/ou logicielle pour TOSSIM/WSim, Cooja, etc. Les protocoles n'atteignaient que trop rarement leurs promesses d'autonomie énergétiques en mois ou en années ; nous avons alors mené une étude publiée dans [6] prouvant que sans une rupture radicale dans le matériel et les protocoles, ces autonomies étaient inatteignables.

Cependant, les solutions matérielles de type « *motes* » produites dans les années 2000, toujours populaires à ce moment-là, avaient une architecture matérielle relativement figée, notamment sur la question du *transceiver* : les CC2420 et dérivés continuaient de dominer cet écosystème vieillissant ⁷, obligeant le chercheur de la communauté R&P à rester sur les couches physiques 2.4 GHz, et quelques fois 868/915 MHz, définies dans le standard IEEE 802.15.4-2006 [9]. Si ces nœuds étaient difficilement organisables en *testbed*, essentiellement à cause des systèmes de reprogrammation dédiés, mais aussi avec un coût financier prohibitif dans le passage à l'échelle, des *testbeds* publics et mutualisés, avec des équipements dédiés, voyaient le jour à ce moment-là. Pourtant, aujourd'hui, au printemps 2018, le *testbed* de référence en France [43], qui est aussi l'un des plus populaires au niveau mondial, ne propose encore que trois générations de nœuds équipées seulement d'un *transceiver* au standard IEEE 802.15.4-2006, qui date donc de plus de 10 ans, même si les générations de MCU, elles, évoluent.

Enfin, et pour en terminer avec ces éléments de contexte, le début des années 2010 allaient voir la montée en popularité de l'écosystème Arduino, alors très peu utilisé dans notre communauté scientifique. Libre, favorisant le prototypage rapide (autant matériel que logiciel) et avec une communauté relativement bien organisée, Arduino allait bientôt devenir un écosystème incontournable dans les réseaux de capteurs sans fil, et surtout, dans l'IoT. Il se devait d'avoir également une place dans notre communauté R&P.

La problématique de cette activité de recherche peut donc se résumer par ces questions : comment organiser efficacement une évaluation des performances fiable des protocoles de communication sans fil pour les réseaux de capteurs et le réseau de collecte de l'Internet des Objets dans un contexte où les protocoles de transmission, au niveau de la couche physique, sont très variés et changeants ? Quelles doivent être les caractéristiques des matériels et logiciels utilisés dans cet objectif ? Que faire pour que les logiciels et matériels utilisés dans cet objectifs puissent ensuite être utilisable dans l'industrie et le grand public, dans un souci de transfert de technologies ?

C'est dans ce contexte que nous avons proposé et publié plusieurs outils matériels et logiciels permettant de traiter cette problématique. Dans les sections suivantes, nous présentons WiNo et OpenWiNo (*Open Wireless Node*), notre environnement de prototypage rapide matériel et logiciel, pour les couches basses des réseaux de capteurs sans fil et le réseau de collecte de l'IoT [44] puis Ophelia, notre organisation *testbed* mettant l'accent sur le faible coût de déploiement et la reproductibilité des expériences. Nous présentons également le partenariat industriel avec Snootlab, avec qui ces travaux sont menés.

7. Thomas Watteyne, à propos du mote TelosB : « *the TelosB, this old friend !* »

1.3.5.2 Axes de recherche et principales contributions

1.3.5.2.1 OpenWiNo - de la genèse au transfert de technologie

Comme nous l'avons vu plus haut, nous avons initié le développement d'OpenWiNo pendant la thèse de Mlle Juan Lu. Nous étions alors en recherche d'une solution logicielle non dépendante d'un OS tel que TinyOS pour implémenter les contributions de cette thèse sur les nœuds Freescale 13192-SARD et SRB, également utilisés pendant notre thèse de doctorat. Bien que disposant que de 4 ko de RAM, ces nœuds étaient très intéressants dans le cadre de cette thèse car non contraints ni d'un point de vue MAC (nous disposions d'un accès juste au-dessus de la couche physique, ce qui n'était pas si courant à ce moment-là), ni d'un point de vue OS. Nous disposions alors d'une dizaine de nœuds dont nous avons une bonne maîtrise.

Nous avons alors développé un premier moteur logiciel simple, en Langage C :

- permettant de produire des trames, les mettre en file d'attente et les transmettre à des instants bien précis,
- incluant la gestion d'un empilement protocolaire réduit, où chaque franchissement de couche est effectué par pointeur, avec une éventuelle file d'attente, pour gagner de la RAM,
- gérant un moteur de console minimaliste (CLI, *Command Line Interface*), au travers de l'UART, mais en tâche de fond ; ainsi, l'interprétation de commande ou la production de contenu ne prenait pas de temps CPU, pour ne pas risquer, en l'absence de RTOS, de perturber temporellement les actions, notamment au niveau MAC. La CLI laissait une possibilité d'interaction avec le nœud, notamment pour afficher des tables en mémoire ou des messages de debug,
- compilable à la fois sur le *hardware* Freescale, mais aussi sous Linux, à des fins d'émulation. Dans ce cas, chaque nœud était émulé par un process Unix et la communication par des datagrammes IP, via un socket. Une matrice de connectivité était cependant implémentée, de manière à permettre d'émuler des liens et des taux d'erreur trame non nuls. Bien entendu, le code émulé ne permettait pas l'évaluation des performances des protocoles, mais permettait un premier niveau de test relativement avancé, en particulier sur les aspects Séquencement de trames et absence d'inter-blocage protocolaires.

L'implémentation d'ADCF a été confiée à des étudiants en DUT Informatique, qui, peu habitués au développement sur cible embarquée, ont travaillé avec l'environnement émulé, sous Linux, avec des directives simples tenant compte des contraintes de la future cible (peu de mémoire, éviter les flottants, etc.). Le protocole entièrement implémenté, il n'a suffi que de deux journées pour faire fonctionner le code à l'identique sur les nœuds réels ; ce succès nous a encouragé à poursuivre le travail dans cette direction. Un travail équivalent mais sur l'implémentation d'un protocole de routage réactif type AODV a été donné l'année suivante à des étudiants préparant un DUT R&T, puis l'implémentation du protocole DV-HOP, à chaque fois avec le même succès. L'ensemble des projets étudiants dans cette thématique est détaillé dans le chapitre 4 de ce mémoire.

Nous avons baptisé notre système OpenWiNo, pour *Open Wireless Node* et nous en avons donc poursuivi le développement entre 2011 et 2014, sans financement particulier, jusqu'à l'aboutissement d'un petit écosystème complet incluant :

- un empilement protocolaire propriétaire incluant les protocoles développés au laboratoire : MAC économe en énergie (ADCF, SiSP), routage *mesh*, ainsi que des protocoles standards comme RBS [45] [46], DV-HOP [47] et CSMA/CA,

- un système logiciel avec une CLI locale, sur UART ou USB, ainsi qu'un *remote-shell*, capable d'exécuter une commande sur un nœud distant à travers le réseau sans fil maillé,
- la prise en charge de différents matériels, avec différents processeurs et/ou différents *transceivers*,
- une infrastructure de déploiement incluant un réseau de supervision et une interface web pour le contrôle et l'exploitation des nœuds,
- quelques cartes filles d'extension, pour différentes applications : cartes à relais, *driver* de LED RGB adressables, etc. en vue de confronter OpenWiNo a des applications réelles.

Un portage dans l'environnement Arduino et la mise à l'étude de plusieurs *transceivers* a définitivement confirmé l'intérêt d'OpenWiNo.

Fin 2013, lors d'une rencontre avec l'entreprise Toulousaine *Snootlab*⁸, nous avons présenté notre environnement matériel et logiciel et l'entreprise a été séduite par nos travaux. Nous avons conclu un accord de transfert de technologie avec le support de Toulouse-Tech-Transfer, la SATT de l'Université Fédérale de Toulouse. TTT nous a permis de financer M. Julien Aubé, ingénieur de valorisation pour faire arriver le code à maturation. Le logiciel a pu être transféré sous licence GPL, en commun accord entre Snootlab et le laboratoire. Ce point était crucial pour nous car, désormais très ancré dans la communauté Arduino, le code devait rester sous une licence libre. Snootlab fabrique désormais le *hardware* TeensyWiNo, utilisé par le logiciel OpenWiNo. La collaboration avec Snootlab continue dans le cadre du projet Ophelia et de la thèse de M. Nicolas Gonzalez.

1.3.5.2.2 La famille WiNo*

Nous l'avons vu plus haut, l'un des objectif principaux d'OpenWiNo est le support de différentes couches Physique, normalisées comme IEEE 802.15.4-2006 ou « *en rupture* » comme UWB ou LoRa par exemple. D'abord développé avec pour cible les nœuds Freescale implémentant une couche physique IEEE 802.15.4-DSSS 250 kbit/s 2.4 GHz, nous avons ensuite souhaité pouvoir changer de *transceiver* facilement, pour mettre en concurrence ces nouveaux modes de transmission, idéalement aussi simplement qu'il est possible de le faire avec un logiciel de simulation réseau. C'est dans cet objectif que nous avons proposé un modèle de nœud matériel, le WiNo, dont l'architecture est représentée figure 1.20. L'originalité de cette architecture, très classique pour un nœud capteur sans fil, réside dans le fait que tout est mis en œuvre, matériellement et logiciellement, pour permettre ce changement simple de *transceiver*.

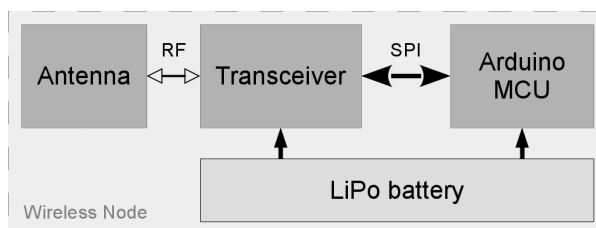


FIGURE 1.20 – Architecture typique du nœud WiNo

Un point important dans le design de ce modèle était la maîtrise temporelle et énergétique du nœud. En effet, pour évaluer finement les performances d'un protocole MAC dans un contexte réel, il est nécessaire de

8. Snootlab est une entreprise Toulousaine, concepteur de produits électroniques pour le prototypage, plus spécifiquement orienté vers les technologies innovantes de l'Internet des Objets.

maîtriser précisément les temps d'accès au médium, ainsi que de disposer de vraies capacités d'économie d'énergie, avec des consommations et des temps et de mise en veille et de réveil réalistes. Que ce soit dans le but de piloter des politiques drastiques d'économie d'énergie ou pour le respect de contraintes temps réel, une telle maîtrise est nécessaire ; WiNo est une plate-forme matérielle qui permet l'exécution de protocoles à fortes contraintes temporelles, visant un objectif de plusieurs mois de fonctionnement avec deux piles AAA [6].

Cette architecture se veut ouverte et la plus générique possible, pour permettre à la fois un prototypage rapide en terme réseau et protocoles, mais aussi, de manière globale, pour permettre le prototypage complet d'objets connectés avec capteurs, actionneurs, etc. En effet, de part nos activités autour des technologies pour l'accessibilité - qui seront présentées dans le chapitre 3 de ce document - nous avons besoin d'une plate-forme matérielle souple, avec un facteur de forme acceptable pour permettre l'évaluation par l'usage et favoriser des processus de conception centrée utilisateur (cf. §3.3.3). A l'heure de l'Open Source, du *Do-It Yourself* (DIY) et des imprimantes 3D, WiNo doit permettre d'élaborer un prototype d'objet connecté très réaliste, à l'aide de briques technologiques dont les sources ont été libérées.

D'un point de vue matériel, la solution repose sur l'écosystème Arduino, bien connu pour son intérêt et son efficacité dans le prototypage rapide de petits systèmes électroniques. Ce choix a été affiné avec la sélection d'un module microcontrôleur de cet écosystème adapté aux besoins : le module retenu, le Teensy 3.x, dispose de plus de mémoire et d'un processeur plus performant que la plupart des modules de l'écosystème Arduino. Nous l'avons clairement identifié dans le travail de Mlle Juan Lu avec ADCF, cette mémoire est notamment nécessaire pour l'évaluation des performances des protocoles où, en phase d'évaluation, les résultats sont mémorisés pour ne pas pénaliser le CPU avec une transmission Série ou USB. D'un point de vue logiciel, plusieurs briques ont été développées de manière à abstraire l'interface avec le *transceiver*. Enfin, et en vue d'une évaluation par l'usage, le modèle comprend une batterie de type Lithium Polymère (Li-Po) pour faciliter l'usage du prototype en situation mobile. Le tableau 1.1 résume l'ensemble des recommandations.

Ce modèle a ensuite été instancié dans quatre versions complémentaires, illustrant sa bonne généralité. En plus du WiNoRF22 (prototype labo) et le TeensyWiNo (industrialisé par Snootlab.com), nous avons proposé :

- le WiNoLoRa (figure 1.21a), qui implémente une couche physique LoRa en plus des modulations FSK, GFSK et OOK déjà disponibles avec le RFM22b présent sur le TeensyWiNo. Grâce à ce mode de transmission très bas débit, des sensibilités meilleures que -120 dBm peuvent être atteintes, rendant possibles des transmissions de plusieurs kilomètres avec quelques milliwatts en sortie de l'émetteur,
- le DecaWiNo (figure 1.21b), qui implémente une couche physique IEEE 802.15.4-2011 UWB [34], permettant notamment des opérations de *ranging* et de localisation. Nous reviendrons sur ce sujet dans le second chapitre de ce manuscrit.

Les caractéristiques de chacune de ces versions de WiNos sont résumées dans le tableau 1.2.

La figure 1.23 présente des visuels des différents WiNos. La possibilité de changer de *transceiver* est confirmée par ces différents modèles implémentant tous un *transceiver* différent. L'approche par platine de prototypage et *breakout-board* permet de réaliser, en laboratoire, un premier prototype avec un *transceiver* différent, avant de produire un PCB à l'aide de solutions libres telles que KiCad et faire fabriquer par un fablab tel que [48]. Pour notre part, les plans (schéma électrique et PCB) des différents WiNos ont été libérés sous Licence libre (CCBYCA ou GPLv3) et afin de diffuser ces designs et promouvoir le matériel, nous avons mis en place le site [49], qui regroupe toutes les informations au sujet des différents WiNo, propose des tutoriels, ainsi qu'un forum de type *ask* pour fédérer une communauté d'utilisateurs. Le TeensyWiNo, conçu et commercialisé par Snootlab.com, est un WiNo équipé de nombreux composants

Élément	Caractéristique	Recommandation/justification
MCU	Mémoire sur-dimensionnée	Disposer de suffisamment de ressources pour n'évaluer que le protocole. Exemple : ne pas introduire de biais par des buffers réduits
		Permettre le stockage en RAM des résultats de performance pendant l'expérimentation
	Bootloader générique et open-source	Faciliter l'intégration dans un <i>testbed</i> : Reprogrammation par USB pour un <i>testbed</i> filaire Reprogrammation OTA (<i>Over The Air</i>) pour un <i>testbed</i> sans fil
		Énergie en veille inférieure à 10 μ W
	Divers	Possibilité de connecter des capteurs et/ou actionneurs réels
		Même architecture que celle utilisée en production pour faciliter le transfert de technologie
		Disponible en <i>breakout-board</i> : facilitation du prototypage rapide
Transceiver	Mémoire sur-dimensionnée	Transceiver seul, sans MCU intégré, pas de couche MAC incluse
		Énergie en veille inférieure à 10 μ W
	Bibliothèque driver	Primitives minimales : envoi et de réception des données, mise en veille du <i>transceiver</i>
		Pilotage brut du <i>transceiver</i> au dessus de la couche PHY, doit permettre une réactivité à la dizaine de microsecondes
		Idéalement par bus SPI, éviter les modems avec jeu de commandes type AT
	Divers	Antenne intégrée ou présence d'un connecteur
Disponible en <i>breakout-board</i> : facilitation du prototypage rapide		
Pile ou batterie	Confrontation des performances énergétiques réelles avec les modèles prédictifs	
	Facilitation des tests en situation d'usage	
Écosystème	Open-source	
	Organisé avec partage de ressources telles que bibliothèques de composants, modèles 3D, etc.	

TABLE 1.1 – Recommandations des caractéristiques des éléments pour l'architecture WiNo

capteurs (figure 1.22) permettant le prototypage rapide de capteurs environnementaux, dispositifs d'interaction, etc. Nous l'avons notamment utilisé dans le cadre de nos travaux à la Maison Intelligente présentés dans le chapitre 3 de ce manuscrit. Le TeensyWiNo est également utilisé dans la pédagogie (cf. annexe du document).

L'architecture WiNo a fait l'objet de plusieurs publications, notamment [44] et [50].

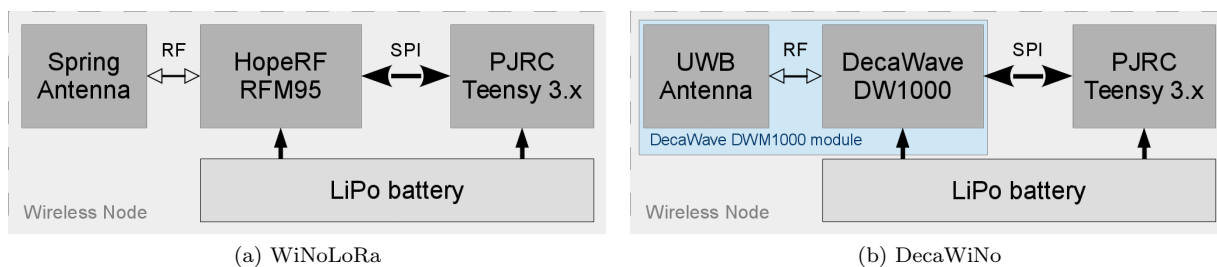


FIGURE 1.21 – Architectures du WiNoLoRa et DecaWiNo

	TeensyWiNo	WiNoRF22	WiNoLoRa	DecaWiNo
Usage	IoT et RCSF classiques		Longue portée, Ultra bas débit	Courte portée, <i>Ranging</i> , localisation
CPU/RAM	Arduino PJRC Teensy 3.2 (Freescale MK20DX256VLH7) ARM Cortex M4 72MHz, 64kB RAM, 256kB Flash			
Transceiver	RFM22b		RFM95	DW1000
Modulation	OOK/FSK/GFSK		Bande étroite LoRa/OOK/FSK/GFSK	Hyper Étalement de Spectre UWB
Librairie	RadioHead			DecaDuino
Capteurs	Température Luminosité Baromètre Accéléromètre Magnétomètre Gyroscope	Température, Luminosité		
Autres	RGB LED, GPIOs, PWM, ADC/DAC, SPI, I2C, CANbus			
Disponibilité	Snootlab.com	DIY, <i>Do-It Yourself</i>		

TABLE 1.2 – Caractéristiques des différents WiNos instanciés depuis le modèle

1.3.5.2.3 OpenWiNo

OpenWiNo est une plate-forme logicielle ouverte pour le prototypage rapide et l'évaluation pragmatique des performances des protocoles de niveau MAC, NWK et plus, pour les réseaux de capteurs sans fil comme pour le réseau de collecte de l'Internet des Objets. OpenWiNo est prévu pour être exécuté entre autres sur le matériel WiNo.

Le logiciel OpenWiNo inclut la gestion de la couche physique et des outils nécessaires à l'ingénierie d'une pile protocolaire complète. Le processus de développement et d'implémentation des protocoles est relativement simple, grâce à des possibilités conjointes d'émulation des nœuds et de déploiement sur cible finale, sans modification de code entre les deux. L'émulateur permet de valider les séquences de protocoles et leurs algorithmes associés. La topologie est émulée par une matrice de connectivité, dont les valeurs

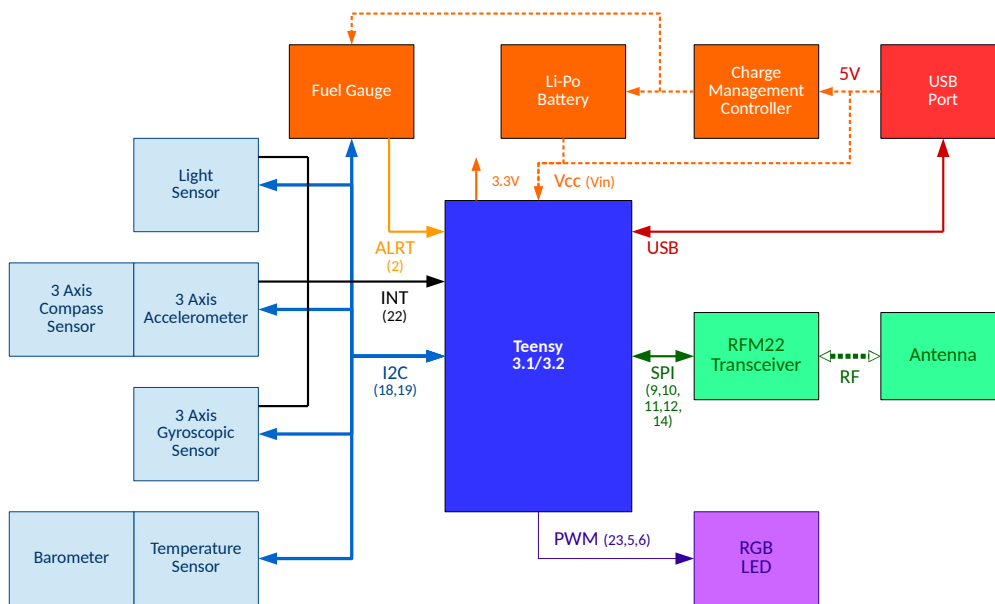


FIGURE 1.22 – Schéma fonctionnel du TeensyWiNo

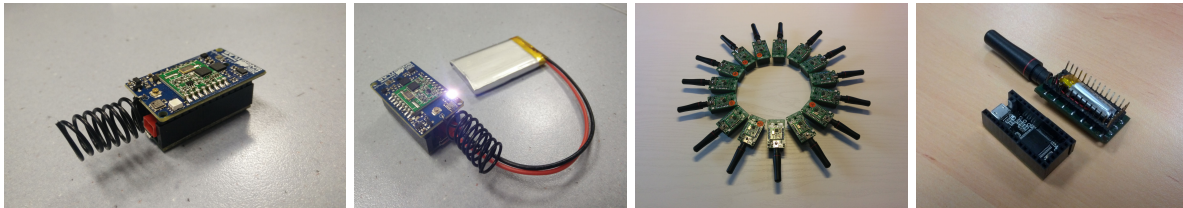
indiquent le taux d'erreur trame pour chaque paire de nœuds émulés. Le développeur peut avoir le contrôle de la topologie pour mener les tests de validation, ce qui est très complexe avec des nœuds réels. Bien entendu, l'émulateur ne permet pas d'évaluer les performances des protocoles, le médium n'étant pas modélisé (multi-trajet, collision, délai de propagation, etc. ne sont pas implémentés dans l'émulateur).

Le logiciel est donc constitué de deux sous-systèmes WiNoEmu (*Emulator*) et WiNoTB (*Testbed*) qui partagent un noyau commun (*Kernel*). La figure 1.24 illustre les liens entre ces trois composants. Pour le développeur, l'usage typique d'OpenWiNo est le suivant : une fois les fonctions du noyau prises en main, le développeur peut commencer à implémenter en langage C son protocole et les algorithmes associés dans l'émulateur, en compilant pour GNU/Linux. Le développeur veillera durant cette phase à respecter constamment les contraintes imposées par la cible finale visée. Pendant la phase d'implémentation, le développeur peut lancer plusieurs nœuds et procéder à des tests. Une fois le nouveau protocole rodé sous l'émulateur, le développeur intègre le code à la cible finale grâce à WiNoTB. L'étape suivante est le déploiement et l'analyse de performance en environnement réel. En développant suivant les méthodes agiles, le processus de développement peut permettre d'obtenir rapidement des résultats dans le monde réel.

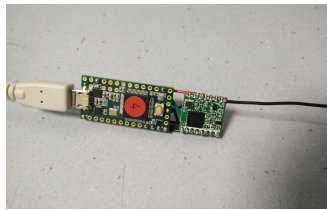
Enfin, grâce à la CLI et à la flexibilité du *bootloader* Arduino, il est possible d'utiliser les WiNos dans un déploiement simple en environnement contrôlé : une fois déployés, les WiNos exécutent l'empilement protocolaire sur leur interface sans fil, mais sont également reprogrammables et administrables via leur CLI, par USB et un second réseau de supervision, filaire ou sans fil (typiquement Ethernet ou WiFi), permettant le débogage, l'injection de firmware et la collecte des paramètres de performance. La figure 1.25 illustre cette organisation en *testbed*, où le réseau de supervision est typiquement réalisé à partir de Raspberry Pi reliés en Ethernet ou en WiFi. Il est donc possible de déployer un *testbed* à moindre frais, et de façon relativement simple, au plus proche de l'environnement ciblé par l'application. L'analyse des performances des protocoles développés peut donc être effectuée en environnement réel, y compris du point de vue de



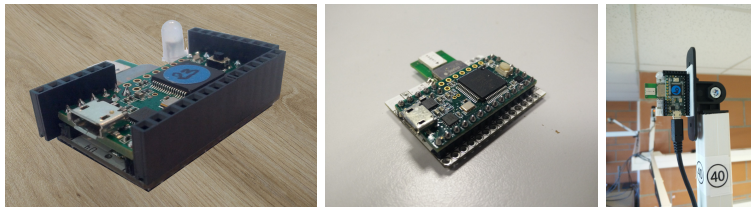
(a) WiNoRF22



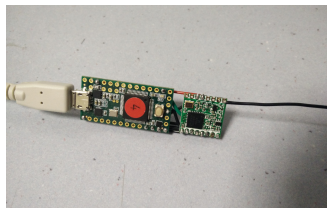
(b) TeensyWiNo



(c) WiNoLoRa



(d) DecaWiNo



(e) WiNo Proto

FIGURE 1.23 – WiNos : WiNoRF22, TeensyWiNos, DecaWiNos, WiNoLoRas, prototypes de WiNo en *breakout boards*

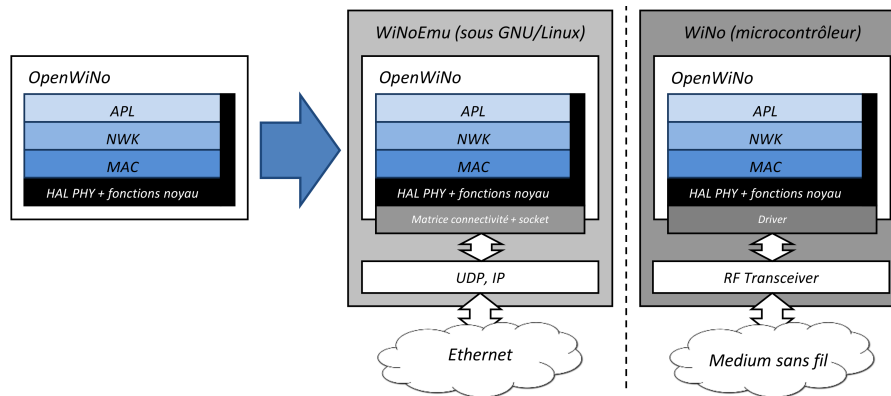


FIGURE 1.24 – Structuration des composants logiciels de WiNoEmu (gauche) et WiNoTB (droite)

l'application. Pour faciliter le déploiement et la gestion du réseau pendant les tests, une interface web incluant représentation de la topologie, accès à la CLI des nœuds et gestion de l'injection des *firmwares* a également été développée. Quelques visuels de cette interface sont visibles en annexe de ce document.

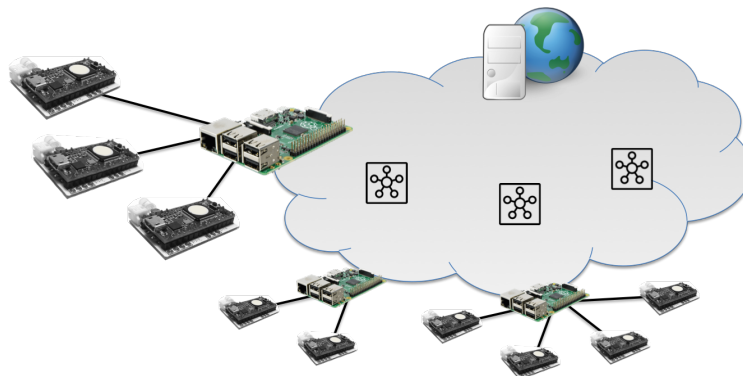


FIGURE 1.25 – Architecture du *testbed* WiNo

Si l'ensemble WiNo+OpenWiNo s'est révélé très efficace au départ, nous en pointons cependant plusieurs défauts : d'une part, le monolithisme de la solution est un premier frein à son utilisation. La gestion du *testbed* est intimement liée au logiciel OpenWiNo exécuté par les nœuds ; il conviendrait donc de décorréler ces deux logiciels, car, en l'état, nous nous retrouvons quelque peu dans la situation du couple TOSSIM/WSim, trop lié à TinyOS et le *hardware* pour lequel il est conçu. D'autre part, nous l'avons dit plus haut, l'une des difficultés essentielles dans l'évaluation des performances sur *testbed* est la maîtrise de l'environnement et la confiance que l'on peut avoir en cette maîtrise. Par exemple, l'environnement radio peut être pollué par d'autres réseaux dont le déploiement et l'utilisation ne sont pas maîtrisés. De ce fait, il est nécessaire de développer une méthodologie de conduite d'expérience visant à pré-évaluer l'environnement pour en avoir une maîtrise suffisante pour considérer que les résultats obtenus soient considérés comme valides. C'est notamment à cette problématique que nous nous sommes attaqués dans le projet Ophelia décrit dans la section suivante.

1.3.5.2.4 Ophelia

Le projet Ophelia, pour « *Open Framework for Real-Life IoT Application* », était un projet financé entre 2015 et 2017, par la région Midi-Pyrénées et le FEDER en partenariat avec l'entreprise Snootlab. Inscrit dans le contexte de l'IoT, ce projet partait du constat suivant : si beaucoup d'objets connectés n'intéressent aujourd'hui que les *geeks*, c'est parce qu'ils ne présentaient en 2015 que très peu d'intérêt réel pour la plupart des usages. Pourtant, même si les idées d'objets connectés et les tentatives de commercialisation ne manquent pas, développer un objet électronique coûte très cher et peut être fatal à l'entreprise en cas d'échec. Dans ce large contexte, le projet Ophelia se concentre sur un objectif, le *prototypage rapide des objets connectés* : l'objectif est de permettre à tout un chacun, spécialiste ou non, de développer simplement et rapidement un prototype d'objet connecté, puis d'aller tout aussi rapidement sur des tests pragmatiques d'usages, afin d'en déterminer l'intérêt réel.

Le projet Ophelia s'inscrit clairement dans la suite du transfert de technologie d'OpenWiNo vers Snootlab, avec d'une part un élargissement des plate-formes matérielles - ne pas se restreindre au seul WiNo - et d'autre part, pouvoir rattacher ces prototypes d'objets connectés à un réseau d'infrastructure puis à Internet. Inscrit dans ce développement d'un framework pour le prototypage rapide d'objets connectés, capteurs communicants sans fil, objets d'interaction, etc. nécessitant à la fois des briques matérielles et logicielles, nous avons développé dans le cadre de ce projet « boîte à outils » matérielle et numérique, venant compléter l'écosystème Arduino, en proposant :

- des cartes électroniques autonomes, de petite taille, et ouvertes, pour prototyper l'objet,
- des passerelles vers Internet pour assurer le lien vers des serveurs web et des bases de données,
- des logiciels permettant le pilotage des cartes et le développement rapide d'applications.

Dans Ophelia, le premier objectif de l'IRIT était de travailler l'aspect énergétique des protocoles de communications et d'élaborer une étude énergétique réelle du matériel comme nous l'avions fait par le passé dans [6].

Le second objectif pour nous était de mettre en place une infrastructure de test permettant d'une part de tester les nœuds dans un environnement connu et automatiser ces tests. D'autre part, ce *testbed* devait permettre, une fois le projet terminé, à tout utilisateur, de disposer soit d'un *testbed* déployé, soit de pouvoir déployer facilement son propre *testbed*. Nous avons donc développé et déployé sur la région Toulousaine un *testbed* large échelle avec un coût minimal, dont l'objectif est double : pour la communauté Réseaux et Protocoles, permettre aux équipes de reproduire le déploiement de ce *testbed* localement et inciter à travailler sur la reproductibilité (*reproducibility*) des résultats ; pour tout un chacun, tester son prototype d'objet connecté et disposer d'une infrastructure réseau pour les tests.

Les phases marquantes du projet ont été les suivantes :

- A partir des briques matérielles initiales (WiNo*), développement du Chistera-Pi (figure 1.26), mezzanine pour Raspberry-Pi dotée de deux *transceivers* HopeRF RFM22b et RFM95 en vue de préparer des briques matérielles de passerelles vers le réseau IP. Au lieu de partir sur une *gateway* basée sur un microcontrôleur sans OS, nous avons préféré une plate-forme basée sur un SoC et profiter des avantages de GNU/Linux, notamment en ce qui concerne les briques de sécurité (SSH, HTTPS et MQTT). A titre d'exemple, le Chistera-Pi permet de réaliser une passerelle LoRaWAN mono-canal pour moins de 100 EUR. Le RFM22b est essentiellement présent pour garder la compatibilité avec le TeensyWiNo. Le *hardware* a été développé par Snootlab. L'IRIT a participé aux tests du prototype et de la version finale.

- Développement d'un logiciel complet de gestion de *testbed*. Afin de minimiser les coûts et favoriser le déploiement de contrôleurs en nombre, le matériel choisi est le Raspberry-Pi pour le contrôleur, et Arduino comme *bootloader* avec un simple câble USB pour la mise à jour des micro-logiciels embarqués : il ne nécessite pas de sonde ou débogueur spécifiques. Le logiciel de gestion du *testbed* permet d'automatiser des scénarios d'expérimentation à partir d'un simple script python ; un fichier de log par nœud, avec estampille temporelle, est produite et est disponible en fin d'expérimentation ; une autre caractéristique originale de ce *testbed*, résolument tourné vers l'*open-source*, est que toutes les données d'expérimentation sont archivées sur le serveur, y compris les fichiers source du micro-logiciel. Le logiciel de gestion du *testbed* a été développé par l'IRIT par Laurent Guerby et a été publié sous licence libre. Nous encourageons sa diffusion par la mise en place du site [51]. Un *testbed* comprenant une vingtaine de contrôleurs et une cinquantaine de nœuds TeensyWiNo, DecaWiNo et Chistera a été déployé sur l'IUT de Blagnac pour la mise au point du logiciel.
- Le premier *testbed* déployé sur Blagnac a ensuite été mis à disposition à plusieurs publics pour en évaluer l'intérêt, la pertinence et la robustesse : des doctorants et post-doctorants de l'équipe, des étudiants de l'IUT (nous évoquerons ces travaux au chapitre 4) et des chercheurs travaillant sur la plate-forme Maison Intelligente de Blagnac (détails au chapitre 3).
- Étude de la couche physique LoRa dans le cadre du stage de Master 2 de M. Xiaobin Zhuang.

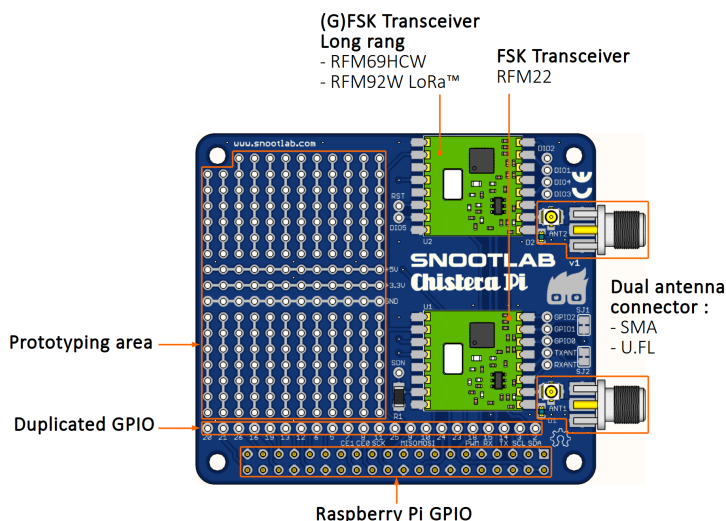


FIGURE 1.26 – Chistera : une carte mezzanine pour Raspberry-Pi

Une démonstration intermédiaire a été produite à mi-parcours du projet Ophelia, le 12 juillet 2016, en présence de plusieurs représentants du financeur et des milieux académiques et industriels de la région, notamment la vice-présidence de l'Université. Cette démonstration a permis d'illustrer le déploiement fonctionnel d'une cinquantaine d'objets connectés sur le campus de l'IUT de Blagnac.

Les briques matérielles et logicielles développées ont été mises à disposition sous licence libre.

Le projet Ophelia en cours poursuit le partenariat engagé avec Snootlab avec WiNo-TTT. Snootlab et IRIT-IRT se sont ensuite réengagés dans le cadre de la thèse de M. Nicolas Gonzalez sur l'hybridation des technologies de communications sans fil pour l'IoT, sur un financement CIFRE. La figure 1.27 illustre la continuité de ce partenariat.



FIGURE 1.27 – Frise chronologique partenariat IRIT-Snootlab

1.3.5.3 Résultats

Nous présentons dans cette partie quelques résultats importants issus du projet Ophelia. Dans une première expérience, nous cherchons à évaluer l'énergie consommée par un nœud WiNo, par poste énergétique, en fonction du *transceiver* utilisé. Les tableaux 1.3 et 1.4 détaillent ces consommations, en fonction de certains paramètres propres du composant évalué. C'est ainsi que l'énergie consommée par le processeur est évaluée en fonction de son état, de sa fréquence de travail et de la profondeur de sa veille. Les deux *transceivers* RFM22b (GFSK) et RFM95 (LoRa) sont examinés en fonction de leur état et de la puissance d'émission configurée. Ces valeurs permettent de mettre en oeuvre des modèles énergétiques simples et mettre en perspectives les autonomies énergétiques réellement constatées, comme nous l'avons fait dans [6]. Le RFM95 étant un *transceiver* LoRa très populaire, ces données peuvent servir à la communauté scientifique.

État MCU	Complément d'information	Puissance consommée (V _{cc} =3.3V)
Working mode	$f_{CPU} = 96$ MHz	129 mW
	$f_{CPU} = 72$ MHz	103 mW
	$f_{CPU} = 48$ MHz	89 mW
	$f_{CPU} = 24$ MHz	55 mW
	$f_{CPU} = 16$ MHz	33 mW
	$f_{CPU} = 8$ MHz	22 mW
	$f_{CPU} = 4$ MHz	15 mW
	$f_{CPU} = 2$ MHz	5,1 mW
Sleeping mode	Sleep, LPTMR wake	2 mW
	Deepsleep, LPTMR wake	650 μ W
	Hibernate, LPTMR wake	< 30 μ W

TABLE 1.3 – Consommation du TeensyWiNo : MCU Freescale MK20DX256VLH7

Dans cette autre expérience, nous cherchons à identifier les débits et durées de trames LoRa en fonction des paramétrage de la couche physique. Afin de réaliser cette expérimentation, deux nœuds WiNoLoRa sont configurés, le premier en émetteur, le second en récepteur. Le scénario est le suivant : l'émetteur forme des trames d'une charge utile de longueur aléatoire, et le récepteur veille à la bonne réception de ces messages. Le temps sur le canal est mesuré de part et d'autre, et vérifié égal. Le scénario est reproduit pour trois configurations différentes de la PHY LoRa, jouant sur les paramètres *Bandwidth* (BW), *Coding*

Transceiver	État	Puissance consommée (V _{cc} =3.3V)
HopeRFM22b GFSK 125 kHz 125 kbit/s	Transmit 10dBm	76 mW
	Receive	57 mW
	Idle	26 mW
	Sleep	< 5 μ W
HopeRFM95 LoRa 500KHz SF7	Transmit 5dBm	142 mW
	Transmit 8dBm	162 mW
	Transmit 11dBm	218 mW
	Transmit 17dBm	419 mW
	Transmit 23dBm	775 mW
	Receive	43 mW
	Idle	???
	Sleep	< 3 μ W

TABLE 1.4 – Consommation du TeensyWiNo : Transceivers HopeRF RFM22b et RFM95

Rate (CR) et Spreading Factor (SF) :

- BW = 125 kHz, CR = 4/5, SF = 7 (128 bits de code d'étalement),
- BW = 125 kHz, CR = 4/8, SF = 12 (4096 bits),
- BW = 31.25 kHz, CR = 4/8, SF = 9 (512 bits).

Les résultats (figure 1.28) montrent que, conformément à ce qui est attendu, le débit augmente avec la longueur de la charge utile (PPDU), ce qui s'explique par la présence d'une charge protocolaire native (en-tête, CRC) du protocole de niveau physique; cette charge est « rentabilisée » sur les messages de longueur importante. Alors que le premier scénario permet d'atteindre un débit efficace de près de 5 kbit/s, les deux autres paramétrages permettent d'atteindre respectivement des débits de 150 et 250 bit/s pour des charges utiles de 150 octets. Il est à noter que ces débits sont à considérer en tenant compte du temps sur le canal, qui peut atteindre plus de 7 secondes dans le scénario 2, pour une charge utile de 150 octets (figure 1.29). En effet, la réglementation impose un taux d'utilisation (*duty-cycle*) limité par unité de temps.

Le tableau 1.5 synthétise les valeurs de débit et de temps constant sur le médium hors *payload*, c'est-à-dire le préambule et le champ FCS de la trame LoRa, en fonction des paramètres LoRa *Bandwidth* (BW) et *Spreading Factor* (SF). Dans cette expérience, le *Coding Rate* (CR) est fixé à 4/5.

1.3.5.4 Conclusions et perspectives sur l'encadrement de l'activité de recherche

Dans cette partie, nous avons présenté nos travaux concernant les *testbeds* pour les réseaux de capteurs sans fil et le réseau de collecte de l'IoT. Cette activité de recherche a d'abord été menée sur ressources propres, puis, grâce à un partenariat industriel, a pu être poursuivie à l'aide de plusieurs financements. Le partenariat perdure avec le début d'une thèse sur financement CIFRE depuis début 2017.

Sur le plan scientifique, nous avons cherché à organiser efficacement une évaluation des performances fiable des protocoles de communication sans fil, tout particulièrement dans le contexte actuel où les proto-

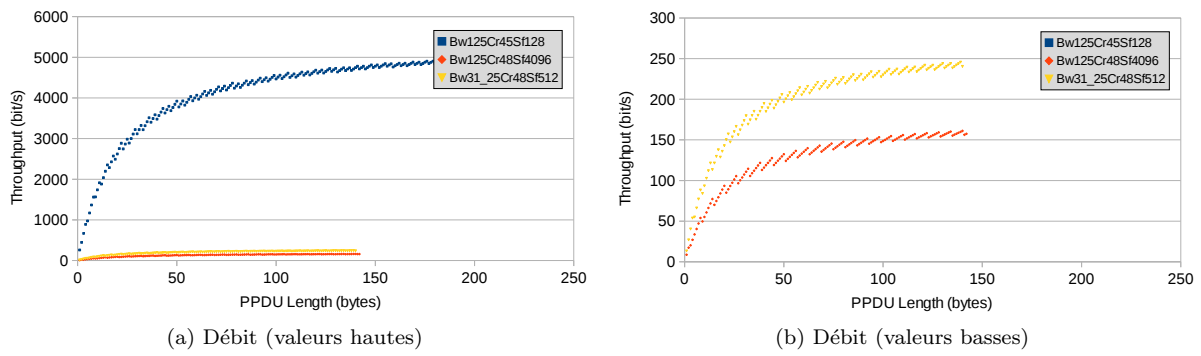


FIGURE 1.28 – Débits d'un lien utilisant une couche PHY LoRa en fonction des paramètres PHY

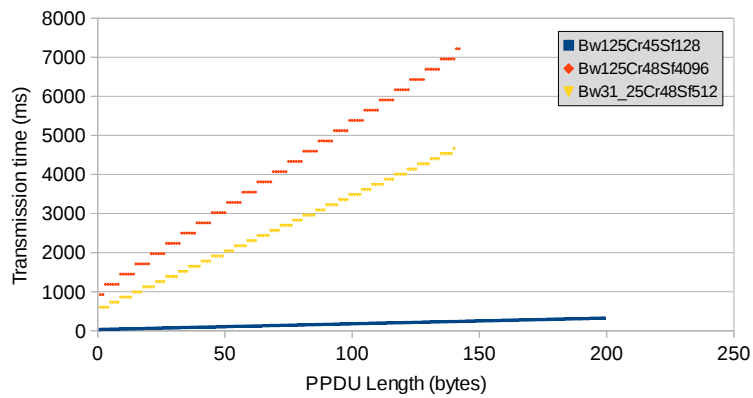


FIGURE 1.29 – Temps sur le médium pour une trame émise avec une couche PHY LoRa en fonction des paramètres PHY

SF	BW (kHz)	Throughput (kbit/s)	Temps constant hors payload : preamble et FCS (ms)
7	500	21,63	8,5
	250	10,88	16,44
	125	5,44	31,95
	62,5	2,73	63,24
9	500	7,01	29,38
	250	3,51	58,23
	125	1,76	115,91
	62,5	0,88	230,95
11	500	2,14	106,46
	250	1,07	211,91
	125	0,54	423,23
	62,5	0,27	845,87

TABLE 1.5 – Débit et temps constant sur le médium (hors payload : préambule et FCS) pour une trame émise avec une couche PHY LoRa en fonction des paramètres PHY

coles de niveau physique sont très variés voire changeants. Pour ce faire, nous avons tout d’abord produit une série de recommandations sur le matériel à utilisé, puis proposé un modèle d’architecture (désigné par *WiNo*) que nous avons instancié à 4 reprises (*WiNoRF22*, *TeensyWiNo*, *WiNoLoRa* et *DecaWiNo*), montrant sa pertinence et, jusqu’ici du moins, sa bonne généralité. Nous avons également présenté notre architecture logicielle (désignée par *OpenWiNo*), ses caractéristiques, justifié son intérêt mais aussi montré ses limites, notamment son monolithisme qui l’affaiblit dans son interaction avec l’infrastructure *testbed*. Dans la dernière partie, nous avons présenté nos travaux de le cadre du projet Ophelia (en cours), notamment l’étude énergétique réalisée sur les différents matériels impliqués dans le modèle *WiNo* et la caractérisation de la couche PHY LoRa, en temps et en énergie.

La première perspective est bien entendu la thèse de M. Nicolas Gonzalez, avec un travail très riche à venir sur l’hybridation des technologies de communication et protocoles réseaux pour l’Internet des Objets. Dans ce domaine, nous vivons actuellement une époque de « bataille des technologies » semblable à celle vécue à la fin des années 90, qui allait être gagnée par WiFi et Bluetooth. Aujourd’hui, les moyens électroniques sont tels qu’il est peu probable qu’une seule technologie remporte la mise. Nous voyons en l’hybridation une approche intéressante, surtout compte-tenu de la place tenue par une entreprise comme Snootlab dans le contexte de l’IoT.

Une autre perspective concerne la standardisation des infrastructures *testbed*. L’organisation de nœuds, leur interfaçage puis l’interfaçage des *testbeds* entre eux sera très prochainement un sujet d’intérêt général pour la communauté scientifique en Réseaux et Protocoles. Les équipes impliquées sur FiT/IoT-lab ont d’ailleurs entamé ce travail.

Une dernière perspective concerne aussi la standardisation des *testbeds*, mais cette fois sur l’usage et les bonnes pratiques à mettre en oeuvre, par rapport à un logiciel de simulation réseau par exemple. Avec l’expérimentation réelle, le médium n’est pas maîtrisé et sa pré-évaluation est nécessaire pour identifier les portées des nœuds ou quantifier le bruit, par exemple. La reproductibilité des expériences est également un facteur clé de la pertinence des résultats obtenus.

1.3.5.5 Publications marquantes

Revue : Nicolas Fourty, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. An advanced study of energy consumption in an IEEE 802.15.4 based network: everything but the truth on 802.15.4 node lifetime. *Elsevier Computer Communications*, juin 2012

Conférence : Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. OpenWiNo: An Open Hardware and Software Framework for Fast-Prototyping in the IoT. In *International Conference on Telecommunications, Thessaloniki, greece, 16/05/2016-18/05/2016*, mai 2016

Revue : Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. Plateforme de prototypage rapide d'objets connectés avec la famille WiNo* - Enabling Fast-prototyping of Connected Things using the WiNo* family. *ISTE OpenScience - Internet des objets*, mars 2017

1.4 Conclusion et perspectives

Comme nous avons pu l'introduire au début de ce premier chapitre, les travaux présentés ici s'inscrivent dans une thématique MAC classique pour la discipline Réseaux et Protocoles : les protocoles d'accès au médium à *rendez-vous*, en vue de satisfaire des contraintes temporelles et/ou énergétiques pour le nœud de communication. Dans cet objectif, nous avons eu l'opportunité de diriger plusieurs activités de recherche et goûter à différentes approches, qui avaient été présentées et discutées en début de chapitre. Le tableau 1.6 met en lien ces approches avec les cinq activités de recherche présentées dans ce chapitre.

	OCARI	ADCF	SiSP	MAC-NWK	WiNo
Contraintes topologiques	oui	non	non	-	-
Respect de la norme	rupture	rupture	-	oui	rupture
PHY en rupture	non	non	non	oui	oui
Synchronisation	oui	oui	oui	non	-
Basé interférence à n sauts	oui	non	non	oui	-
Évaluation par <i>testbed</i>	oui	oui	oui	oui	oui

TABLE 1.6 – Synthèse des différentes approches

Nous avons discuté des différentes conclusions et perspectives de chacune de ces activités plus haut dans le document, nous n'allons pas les évoquer à nouveau ici. Cependant, il nous semble opportun de discuter de leurs points communs et envisager des perspectives communes à ces travaux.

Tout d'abord, la thématique annoncée dans ce chapitre, « *Problématiques MAC dans le contexte multi-saut des réseaux sans fil* » est bien le premier dénominateur commun de ces différentes activités. La thématique a surtout été traitée dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, ce qui implique une énergie limitée, de faibles débits et une limitation de la capacité de traitement des nœuds. Dans les derniers temps, ces travaux s'inscrivent plutôt dans le champ des protocoles d'accès de l'Internet des Objets : les aspects *mesh* et multi-sauts auraient tendance à disparaître dans un IoT avec infrastructure (avec un réseau d'opérateur, par exemple), mais les problématiques MAC demeurent car le réseau de collecte en est très dépendant sur le volet énergétique et le passage à l'échelle, notamment. On notera cependant que certains travaux [52] [53] visent à utiliser des technologies en bandes étroites typiquement IoT (LoRa par exemple) pour déployer temporairement des petits réseaux autonomes d'objets sur une étendue plutôt

large ; si l'approche *infrastructurée* de l'IoT est très répandue, elle n'est donc pas la seule et il perdure un intérêt à considérer les approches *mesh* et multi-saut pour l'IoT, avec sans doute, des topologies *mesh* à densité plus élevées, de par la portée importante envisageable avec ces technologies de transmission.

Nous avons contribué sur les MAC à rendez-vous en proposant des protocoles permettant des modes variés d'accès au canal, en vue de satisfaire plusieurs niveaux de Qualité de Service et une économie d'énergie. Les travaux réalisés dans le projet OCARI et les thèses de Mlle Juan Lu (ADCF) et M. Sabri Khssibi (CANet) s'inscrivent tout à fait dans cette approche et permettent une prise en charge efficace de trafics hétérogènes sur un unique réseau, en vue de satisfaire une différenciation de service. En jouant sur la fréquence de ces modes d'accès et des rendez-vous, on ajuste la dépense énergétique et affecte l'autonomie des nœuds.

De plus, la plupart des travaux proposent des protocoles d'auto-organisation du réseau qui tentent de limiter la centralité de cette organisation. L'absence de coordinateur central augmente la fiabilité du réseau en cas de panne, nous l'avons notamment vu avec les travaux sur ADCF et les travaux sur SiSP. Nous avons évoqué, en introduction de ce chapitre, notre objectif qui consiste à utiliser des modes de *diffusion* (*broadcast*), pour que cette auto-organisation puisse s'exécuter de manière décentralisée. Nous avons évoqué le fait que le canal utilisé en diffusion présente de nombreux avantages : pour une MAC dans le contexte multi-saut, la diffusion permet d'atteindre l'ensemble des voisins à un saut avec un unique message. Sa non fiabilité, par l'absence d'acquittement, fait que les algorithmes de traitement doivent être tolérants à la perte de messages. C'est là encore ce qui a été fait avec ADCF, SiSP et LARM, qui sont des protocoles qui parviennent chacun dans leur champ propre, à organiser le réseau sans hiérarchie et au moyen de messages diffusés. Ces protocoles y parviennent sans coordinateur central, et atteignent des performances équivalentes à leurs équivalents centralisés. Nous avons vu, par exemple, que SiSP permet d'atteindre des justesses de synchronisation équivalentes à RBS ou FTSP.

Nous l'avons vu plus haut, la décennie a vu une forte évolution des modes de transmission utilisés dans les WSN et l'IoT et cette phase transitoire n'est probablement pas terminée. Nous assistons à une bataille des standards semblable à celle des années 90 qui avait été gagnée par l'IEEE avec WiFi et Bluetooth ; ZigBee avait également fini par s'imposer au début des années 2000 comme technologie de référence pour les réseaux de capteurs, mais surtout, il faut bien le dire, dans le monde académique : peu de produits ZigBee ont été disponibles sur le marché et le standard IEEE 802.15.4, s'il est relativement utilisé au niveau de sa couche physique grâce au faible coût des *transceivers*, l'est beaucoup moins sur sa MAC (peut-on trouver une seule pile protocolaire implémentant les GTS ?) et sur les couches supérieures. Les autonomies énergétiques promises ne sont pas non plus atteintes [6]. Les évolutions de 802.15.4 avec TSCH, 6LoWPAN et 6TiSCH sont néanmoins à observer. Au delà de 802.15.4, la bataille actuelle est très riche sur le plan scientifique car elle introduit de nouvelles problématiques. Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés à ces modes de transmission *en rupture* en proposant la plate-forme matérielle et logicielle WiNo/OpenWiNo, qui permet de *changer facilement de transceiver* et donc, de mode de transmission ; cet outil permet de comparer ces différentes technologies au niveau Réseaux et Protocoles, comme nous le faisons dans un logiciel de simulation réseau.

Suite à ces activités de recherche, nous disposons donc de différents travaux et réalisations permettant, de manière décentralisée, **l'auto-organisation MAC** (ADCF) et **la synchronisation** (SiSP), d'un réseau de capteurs sans fil, basées uniquement sur des messages de type *beacons*, **implémenté sur un prototype réel** (WiNo) à l'aide d'un environnement logiciel (OpenWiNo) permettant **le prototypage rapide d'applications réelles**⁹. Bien qu'ils n'aient pas été intégrés dans l'environnement OpenWiNo, les travaux menés sur **le routage** avec LARM (1.3.4.2.2) s'inscrivent eux aussi dans cette approche ; les travaux pourraient être transférés au champ des WSN et les messages de gestion inclus eux aussi dans les messages diffusés, ce qui permettrait **d'auto-organiser le réseau complet (Synchronisation, MAC**

9. Nous verrons au chapitre 3 comment ceci a été utilisé dans un contexte réel au sein de la Maison Intelligente de Blagnac.

et Routage) de manière complètement décentralisée et uniquement par l'envoi et la réception de *beacons*. Un travail sur la concaténation des informations communes à ces protocoles (table de voisinage, etc.) conforterait définitivement notre approche en quantifiant la réduction de ressource apportée par cette fusion. Si la caractéristique fortement collaborative de ces protocoles est un avantage, elle peut aussi en être une faiblesse car elle les rend vulnérable. Dans cette hypothèse, l'étude menée sur la *confiance des protocoles* en collaboration avec Dr. Nicolas Fourty et Dr. Jean-Paul Jamont, limitée au protocole SiSP, pourrait être étendue à **un empilement protocolaire complet hautement collaboratif**.

Un dernier point commun à ces activités de recherche concerne l'évaluation des performances des protocoles proposés. Systématiquement, nous avons cherché à évaluer les performances en utilisant un dispositif de prototypage réel en complément des logiciels de simulation réseau. Dans les premiers travaux, nous nous sommes heurtés à la difficulté induite par le développement embarqué sur microcontrôleurs. Les ressources mémoire et processeur étant très limitées, les langages de bas niveaux doivent être utilisés, ce qui ajoute une difficulté à la difficulté! Nous avons également observé que les ressources limitées (CPU, mémoire) introduisent des biais dans l'évaluation des performances (messages transmis mais perdus à la remontée de l'empilement protocolaire à cause d'un buffer saturé côté récepteur...). Plus tard, nous avons proposé notre solution matérielle et logicielle permettant de faciliter l'évaluation des performances par *testbed*. Cette proposition fut un pas et plusieurs protocoles ont pu être évalués dans de meilleures conditions, mais cette solution a également montré ses limites. La question reste ouverte car, en l'état et de notre point de vue, le travail d'un ingénieur reste nécessaire pour implémenter correctement des protocoles sur un environnement réel. L'outil idéal de prototypage rapide de protocoles serait basé sur un langage interprété simple mais suffisamment riche pour simplifier et accélérer les développements¹⁰. Cet outil permettrait d'implémenter des protocoles et algorithmes complexes sans se heurter aux difficultés de l'environnement embarqué. Ces briques logicielles sont disponibles depuis des années sur architectures MIPS ou ARM Cortex-A supportant un Linux embarqué; pour atteindre pleinement notre objectif, il faudrait qu'elles le soient sur des MCU plus petits, consommant moins de 100 mW au travail, et supportant des temps de mise en veille très réactifs.

10. Python, par exemple, inclut des outils puissants pour traiter des problèmes de graphes complexes très courants dans les protocoles de routage.

Chapitre 2

Protocoles pour le *ranging* et la localisation

Dans ce chapitre, nous présentons nos encadrements dans la thématique de recherche proposée dans notre projet d'intégration, lors de notre recrutement comme Maître de Conférences au LATTIS, à l'IUT de Blagnac, thématique qui a pu être poursuivie lors de notre intégration à l'IRIT. Cette thématique consiste à intégrer la localisation (outils de ranging, algorithmes de localisation 2D ou 3D) directement dans l'empilement protocolaire, pour localiser de façon indolore, c'est-à-dire en minimisant les conséquences en termes d'overhead et de consommation énergétique.

Sommaire

2.1	Cadre général des travaux menés	68
2.1.1	Contexte général et objectifs	68
2.1.2	Modèle et structure dans l'empilement protocolaire	69
2.2	Synthèse des directions, projets et encadrements	70
2.2.1	Projets	70
2.2.2	Encadrements	71
2.2.3	Publications	71
2.3	Détail des travaux	72
2.3.1	Localisation <i>range-based</i> par temps de vol sur nœud capteur à ressources limitées	72
2.3.2	IAL-RCSF et DecaDuino	83
2.3.3	Service de localisation indolore intégré dans la MAC	93
2.3.4	Synchronisation fine sur UWB	100
2.4	Conclusion et perspectives	111

2.1 Cadre général des travaux menés

2.1.1 Contexte général et objectifs

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons les travaux de recherche centrés sur l'auto-localisation¹ des nœuds communicants sans fil, auto-localisation réalisée par le nœud lui-même (*auto*), et uniquement par l'usage de fonctions issues du système de communication, sans faire appel à des composants électronique ou sous-systèmes dédiés tels que des capteurs inertiels, ou un système de positionnement sans fil dédié tel qu'un *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Dans notre approche, le nœud peut utiliser les propriétés du signal radio telles que la force du signal reçu [54] ou l'instant d'émission ou de réception d'une trame [55] - on parle ici de l'approche *range-based*, c'est-à-dire basée sur une mesure de distance - ainsi que les différentes tables en mémoire telles que les tables de voisinage ou les tables de routage - on parle ici de l'approche, dite *range-free*, sans mesure de distance, basée uniquement sur la connectivité [56] [57]. Le nœud peut bien entendu utiliser un ou plusieurs protocoles dédiés à la localisation, éventuellement associé à un algorithme, pour arriver à déterminer sa position ou celle de ses voisins, mais dans ce cas, il faudra en minimiser l'empreinte. *In fine*, ces travaux visent à intégrer des fonctions de localisation des nœuds sans fil directement dans l'empilement protocolaire, pour localiser ou aider à localiser les nœuds de façon collaborative et *indolore* - nous entendons par là, en minimisant l'impact de cette localisation en termes d'*overhead* et de consommation énergétique pour le nœud. Le but ultime de ces travaux est de parvenir à la fourniture d'un *service de localisation* (cf. §2.1.2) directement par l'empilement protocolaire, au même titre que le *service données*, qui lui, est présent dans tout empilement protocolaire, par définition.

Nous avons proposé cette thématique de recherche dans notre projet d'intégration lors de notre recrutement comme Maître de Conférences au LATTIS et à l'IUT de Blagnac. Dès notre affectation, nous avons eu la chance d'obtenir une bourse de thèse sur ce sujet par l'École Doctorale Systèmes de Toulouse. Cette problématique a d'abord été abordée avec une approche très collaborative entre les couches protocolaires [58] [59] puis, dans un second temps, nous nous sommes rapproché du signal physique, avec les approches par temps de vol (*Time-of-Flight*) [60]. Sans avoir à « toucher » au signal, cette dernière approche est très intéressante car d'une part elle donne d'excellents résultats, et d'autre part, sur le plan scientifique, permet de ramener des problématiques de la communauté Traitement du Signal vers la communauté Réseaux et Protocoles.

Pour mener à bien cette activité de recherche, nous avons adopté une stratégie identique à celle présentée dans le chapitre précédent : mener tout d'abord une série d'études théoriques pour identifier le contexte et, avec précision, les performances des solutions proposées dans la communauté académique ; rechercher parallèlement les solutions technologiques ouvertes et disponibles sur étagère ou dans une approche modulaire, par la communauté industrielle pour aller rapidement vers l'expérimentation sur *testbed*, quitte à passer par plusieurs phases de conception et de développement matériel et logiciel en créant nos propres outils. Dans cette activité de recherche, nous avons ainsi développé les outils *NanoLoc*, *DecaWiNo* [61] et *DecaDuino* [62], comme nous le verrons par la suite. Les deux derniers sont actuellement diffusés sous licence *Open Source*.

Très concrètement, après huit années de travail sur le sujet, nos travaux permettent la fourniture d'un service de localisation, validé et évalué sur *testbed* et en déploiement réel, avec une précision d'une vingtaine de centimètres en 2D et de la dizaine de centimètres en 1D (*ranging*, mesure de distance point à point entre deux voisins), à l'aide de plusieurs protocoles dédiés ou intégrés dans l'empilement protocolaire.

1. certains parlent de positionnement, vocabulaire proche du terme anglo-saxon *positionning*

2.1.2 Modèle et structure dans l'empilement protocolaire

Pour atteindre l'objectif visé, nous avons proposé dans ces travaux plusieurs protocoles et algorithmes, ainsi qu'un modèle général comprenant un objet d'abstraction de localisation, ou *Abstracted Localisation Object* (ALO). Cet objet est placé aux côtés de l'empilement protocolaire, comme on peut le voir sur la figure 2.1, ainsi que ces principaux composants internes. Dans cette idée, ALO collecte des informations issues des différents niveaux de la pile protocolaire et, à partir de ces informations, fournit le service de localisation. Ce service est rendu à l'utilisateur et à l'application, mais aussi aux différents niveaux protocolaires eux-mêmes qui ont besoin de l'information de localisation à des fins d'optimisation, comme par exemple dans le cadre d'un routage géographique au niveau 3. ALO fournit le service de localisation au travers de son point d'accès de service LOC-SAP (*LOCalisation-Service Access Point*).

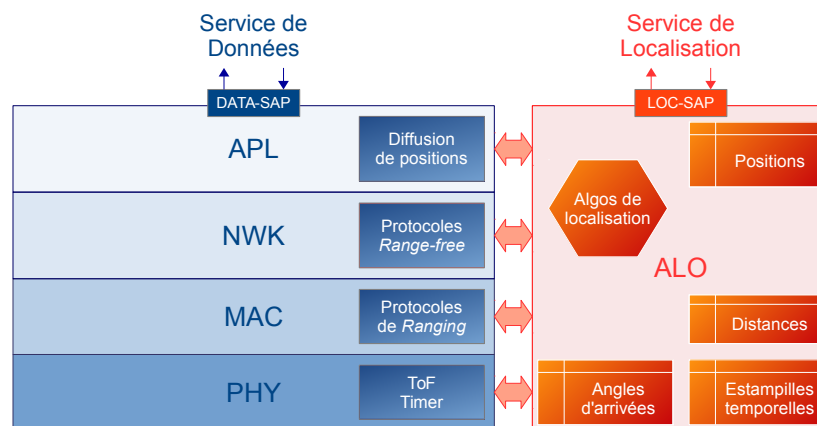


FIGURE 2.1 – ALO : *Abstract Localisation Object*

Comme on peut le voir sur la figure 2.1, ALO :

- est en lien direct avec chaque couche de l'empilement protocolaire, de façon transversale. Il peut, à ce titre :
 - récupérer des informations propres à ces niveaux protocolaires, comme des informations issues d'une analyse du signal radio (force du signal reçu, instant d'émission ou de réception) ou des informations stockées pour le fonctionnement des protocoles (tables de voisinage, tables de routage, etc.),
 - déclencher l'exécution de protocoles variés, de type *range-based* ou *range-free* pour parvenir à une nouvelle localisation ou confirmer une localisation déjà en mémoire. Ces protocoles peuvent demander la transmission de messages dédiés, ou être inclus dans le trafic existant, dans la charge utile (*payload*) des protocoles classiques.
- mémorise plusieurs informations relatives aux données de localisation, telles que les positions connues (par configuration ou par une détermination antérieure), des distances connues (*rangings*) entre nœuds, des estampilles temporelles ou bien encore des angles d'arrivées. Ces informations sont stockées dans des tables locales à l'objet,
- comprend un ou plusieurs algorithmes de localisation, liés ou décorrélés des protocoles exécutés. Typiquement, l'algorithme de localisation se base sur les informations présentes dans les différentes tables pour parvenir à l'obtention d'une solution.

Utilisé initialement à des fins de recherche pour permettre la comparaison des systèmes de *ranging* et de localisation, ALO est également utilisé comme entité opérationnelle dans un nœud OpenWiNo (cf. §1.3.5.2.1) par exemple. Dans ce contexte, chaque information calculée par ALO est stockée en table en mémorisant la source du calcul. Par exemple, des distances entre nœuds estimées par temps de vol pourront être stockées au même titre que des distances estimées par force du signal, à condition que la source utilisée dans l'estimation (temps de vol ou force du signal) soit mémorisée avec la distance. Différents protocoles doivent pouvoir nourrir différents algorithmes de localisation ; la solution la plus convenable sera utilisée, selon des critères comme la précision ou la consommation d'énergie induite par la recherche de la solution.

Les travaux présentés dans la suite de ce chapitre s'intègrent dans le modèle ALO.

2.2 Synthèse des directions, projets et encadrements

2.2.1 Projets

La figure 2.2 illustre la chronologie des différents projets réalisés sur la période. Là encore, une distinction est faite entre les projets sous contrat en direction (2), ainsi que les projets sans contrat (financement sur le budget récurrent de l'équipe, reliquats, etc.) (2).



FIGURE 2.2 – Projets sur la thématique Localisation

- **2010-2012 (20 mois) : NanoLoc** (*Localisation avec Nanotron*). Évaluation de *transceivers Chirp Spread Spectrum* (CSS) Nanotron, conception et fabrication d'un nœud et évaluation ; démonstrateur des travaux de thèse de Réjane Dalcé.
- **2012-2014 (20 mois) : Intégration d'Algorithmes de Localisation dans un Réseau de Capteurs Sans Fil (IAL-RCSF)**. Évaluation de *transceivers UWB DecaWave* (accès aux premiers échantillons du constructeur sous NDA) et production d'un démonstrateur. Projet co-financé par la commission valorisation de l'Université Toulouse 2 Jean Jaurès.
- **2014-2016 (18 mois) : DecaDuino** (*DecaWave sous Arduino*). Développement d'un framework matériel et logiciel pour l'implémentation et l'évaluation des performances de protocoles de *ranging* sur couche PHY UWB basée sur le *transceiver* DecaWave DW1000. Publication de DecaDuino sous licence GPL et conception et fabrication du DecaWiNo, un nœud capteur sur couche PHY UWB.
- **2015-2016 (14 mois) : GUINNESS** (Projet financé par la région MPY et le FEDER). Méthodes de synchronisation fine sur UWB. Prototypage réalisé avec DecaDuino.

Ces encadrements sont détaillés dans les sections suivantes.

2.2.2 Encadrements

Dans la catégorie des travaux présentés dans ce chapitre, nous comptons cinq encadrements distincts : 1 encadrement de niveau Master, 2 co-encadrements de thèse à 50% et 2 co-encadrements post-doctoraux. La figure 2.3 illustre la chronologie des différents encadrements et co-encadrements réalisés sur la période.

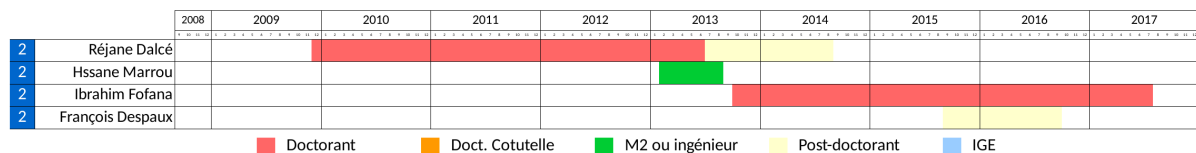


FIGURE 2.3 – Encadrements sur la thématique Localisation

Les travaux sont énumérés ici chronologiquement :

- **2009-2013 (42 mois) : co-encadrement (50%) de la thèse de Mlle Réjane Dalcé.** Méthodes et systèmes de localisation combinant plusieurs technologies de transmission et de positionnement.
- **2013 (6 mois) : encadrement de M. Hassane Marrou dans son stage de Master Recherche.** Étude et caractérisation d'une PHY/MAC 802.15.4a UWB et implémentation d'algorithmes de localisation sur un réseau de capteurs sans fil. Production d'un démonstrateur. Stage dans le cadre du projet IAL-RCSEF.
- **2013-2014 (12 mois) : encadrement du post-doctorat de Mlle Réjane Dalcé.** Localisation 2D et 3D dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil UWB : du protocole de *ranging* par temps de vol à l'algorithme de localisation.
- **2014-2017 (44 mois) : co-encadrement (50%) de la thèse de M. Ibrahim Fofana.** Contribution aux architectures protocolaires pour systèmes de localisation des nœuds dans un réseau de capteurs sans fil.
- **2015-2016 (12 mois) : co-encadrement (33%) du post-doctorat de M. François Despaux.** Synchronisation fine sur couche PHY UWB.

Ces travaux sont détaillés dans les sections suivantes.

2.2.3 Publications

Les travaux présentés dans ce chapitre ont donné suite à :

- deux publications dans des revues internationales dont une en navette (Elsevier Adhoc Networks, Irvine WET),
- treize publications dans des conférences internationales avec comité de lecture et actes publiés (PIMRC, VTC, Ad-Hoc Now, Wireless Days, IPIN, CFIP...).

2.3 Détail des travaux

2.3.1 Localisation *range-based* par temps de vol sur nœud capteur à ressources limitées

Co-encadrement de la thèse de Mlle Réjane Dalcé

« Méthodes et systèmes de localisation combinant plusieurs technologies de transmission et de positionnement »

Directeur de thèse : Pr. Thierry Val

Période : septembre 2009 - juin 2013

Financement : bourse MESR

2.3.1.1 Contexte des recherches menées

Lors de notre candidature comme Maître de Conférences au LATTIS EA4155, nous avons proposé une thématique de recherche visant à proposer des méthodes de localisation de nœuds mobiles tirant partie des informations relatives au réseau sans fil de communication. La thématique était large et le Pr. Thierry Val nous avait proposé de la restreindre en s'intéressant en priorité aux approches combinant plusieurs technologies de transmission (typiquement la communication sans fil radio) et de positionnement (typiquement des balises infrarouges ou des capteurs inertiels). C'est dans ce contexte que nous avons candidaté à la bourse MESR de l'École Doctorale Systèmes de Toulouse à laquelle nous étions alors rattachés, avec la candidate, Mlle Réjane Dalcé, qui était alors en stage de M2 dans notre équipe sur le projet ANR OCARI (§1.3.1). La bourse obtenue et le travail de thèse démarré, nous nous sommes assez rapidement focalisés sur les approches *Range-based*, c'est-à-dire basées sur une évaluation de la distance des nœuds voisins à un saut, en vue de collecter des mesures de distances à combiner par les méthodes de *n*-latération pour obtenir une position en deux ou trois dimensions. Une autre thèse de l'équipe se focalisait alors sur les méthodes *range-free* [59].

Ce premier travail dans la thématique présentée dans ce chapitre, a dû commencer par un état de l'art complet [63] des travaux réalisés dans ce domaine, incluant :

- les techniques et les algorithmes de localisation 2D et 3D : triangulation, *n*-latération, par reconnaissance d'empreinte,
- les caractéristiques physiques du signal influencées par la distance ou la position d'un voisin : force du signal reçu (RSSI) [64], temps de vol (*Time of Flight* (ToF)), angle d'arrivée du signal (*Angle of Arrival* (AoA)) [65] ou bien encore la phase du signal reçu [66],
- les protocoles de communication, de tout niveau protocolaire, permettant la mesure ou la collecte des informations relatives à la distance avec un voisin ou à la position d'un nœud du réseau :
 - o Les méthodes *range-based*, basées sur des protocoles typiquement situés juste au dessus de la couche physique, tels que *Time of Arrival* (ToA) (fig. 2.4a), *Two-Way Ranging* (TWR) (fig. 2.4b), *Symmetrical Double Sided Two-Way Ranging* (SDS-TWR) (fig. 2.4c) et *Time Difference of Arrival* (TDoA),
 - o Les méthodes *range-free*, basées sur des protocoles typiquement situés au niveau routage, tels que DV-Hop et Centroid,

o Les méthodes hybrides.

Le tableau 2.1 présente une synthèse des moyens de localisation identifiés au début de la thèse de Mlle Réjane Dalcé, en 2010.

Moyen	Catégorie	Précision	Coût	Effet de l'environnement
Temps de vol UWB	Range-based	centimétrique	Matériel spécifique	Atténuation dues aux hautes fréquences
Temps de vol bande étroite	Range-based	métrique	Synchronisation, accès au matériel	Multi-trajet
Phase du signal	Range-based	< longueur d'onde	Matériel spécifique	Ligne de vue
RSSI brut	Range-based	decamétrique	Aucun	Ligne de vue
RSSI fingerprinting	Range-based	métrique	Base de données, apprentissage	Ligne de vue
Angle d'incidence	Range-based	métrique	Matériel	Multi-trajet
Nombre de sauts	Range-free	portée radio	Inondation réseau, placement régulier	Portée changeante, non-omnidirectivité antenne

TABLE 2.1 – Moyens de localisation, précision, coût et sensibilité à l'environnement

Comme on peut le voir sur la figure 2.4, les protocoles de *ranging* utilisent plusieurs estampilles temporelles t_i pour marquer les instants d'émission et de réception des messages servant à identifier le temps de vol. Sur les trois principaux protocoles présentés, on retiendra que :

- **ToA** (fig. 2.4a) est le plus simple, mais nécessite une synchronisation très précise entre les deux nœuds pour calculer le temps de vol (équation 2.1) : les estampilles t_1 et t_2 doivent en effet être exprimées dans le même référentiel. Pour atteindre une précision centimétrique sur le *ranging*, la synchronisation doit être précise à la dizaine de picoseconde, ce qui constitue un challenge compte tenu des technologies actuelles.

$$ToF_{ToA} = t_2 - t_1 \quad (2.1)$$

- **TWR** (fig. 2.4b) est plus complexe que ToA, mais grâce à l'aller-retour, ne nécessite pas de synchronisation pour calculer le temps de vol (équation 2.2) ; les fréquences des deux horloges présentes sur les deux nœuds doivent être très proches, afin que les différences d'estampilles $t_4 - t_1$ et $t_3 - t_2$ demeurent comparables. Les fréquences étant toujours différentes - ce qui est inévitable, électroniquement, puisque les deux nœuds sont pilotés par des quartz distants - la mesure du temps de vol est en réalité entachée d'une erreur. Soit δ le rapport des fréquences des deux horloges f_1 et f_2 ; le temps de vol ToF'_{TWR} tenant compte de cette différence de fréquence peut alors être calculé par l'équation 2.3.

$$ToF_{TWR} = \frac{t_4 - t_1 - (t_3 - t_2)}{2} \quad (2.2)$$

$$ToF'_{TWR} = \frac{t_4 - t_1 - \delta(t_3 - t_2)}{2} \quad (2.3)$$

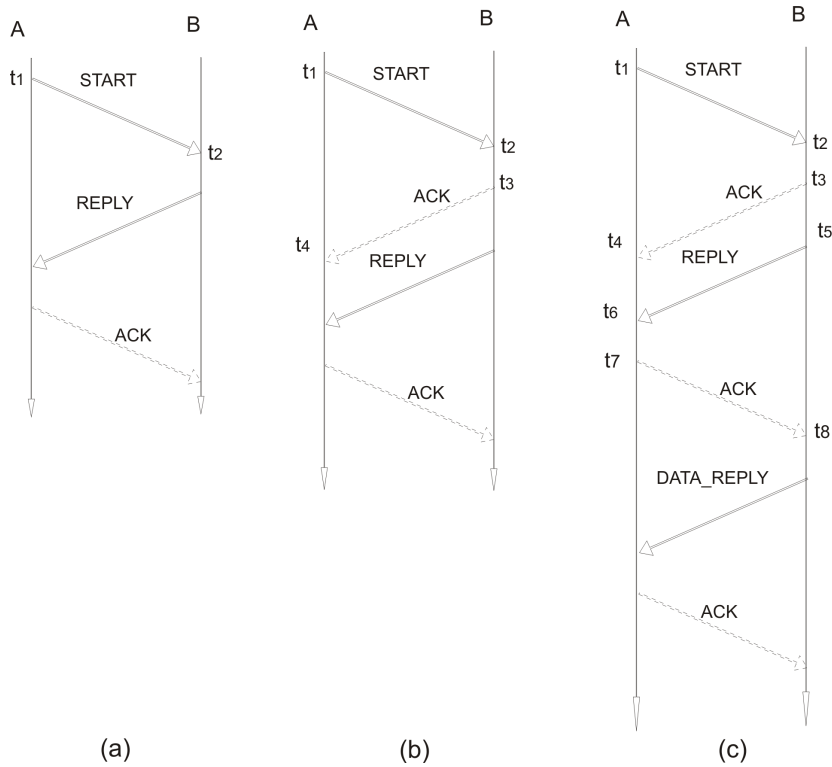


FIGURE 2.4 – Différents protocoles de *ranging* par temps de vol

- **SDS-TWR** (fig. 2.4c) est le plus complexe des trois protocoles, mais présente l'avantage d'être très peu sensible à la différence des fréquences d'horloges, grâce à la symétrisation de deux séquences TWR successives $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ et $\{t_5, t_6, t_7, t_8\}$. L'équation 2.4 permet de calculer le temps de vol avec ce protocole.

$$ToF_{SDS-TWR} = \frac{t_4 - t_1 - (t_3 - t_2) + (t_8 - t_5) - (t_7 - t_6)}{4} \quad (2.4)$$

À noter la présence d'acquittements (les messages **ACK** sur les figures 2.4b et 2.4c) qui participent à l'estampillage temporel.

2.3.1.2 Axes de recherche et principales contributions

Au début de la thèse de Mlle Réjane Dalcé, nous avons noté que les méthodes de localisation *range-based* permettaient les meilleures précisions en terme de *ranging*, c'est-à-dire permettant une mesure précise, par les nœuds eux-mêmes, de la distance séparant deux voisins à un saut. Le *ranging* constitue une localisation sur une dimension (1D), dont l'axe est la droite imaginaire passant par les deux nœuds pratiquant le *ranging*.

La problématique principale de la thèse était donc la suivante : comment, en utilisant les méthodes *range-based*, passer du *ranging* (1D) à une auto-localisation 2D ou, mieux, 3D, tout en minimisant l'impact sur la charge protocolaire et l'énergie consommée par l'exécution des protocoles et algorithmes associés, tout en restant dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil où les contraintes mémoire/processeur sont fortes ?

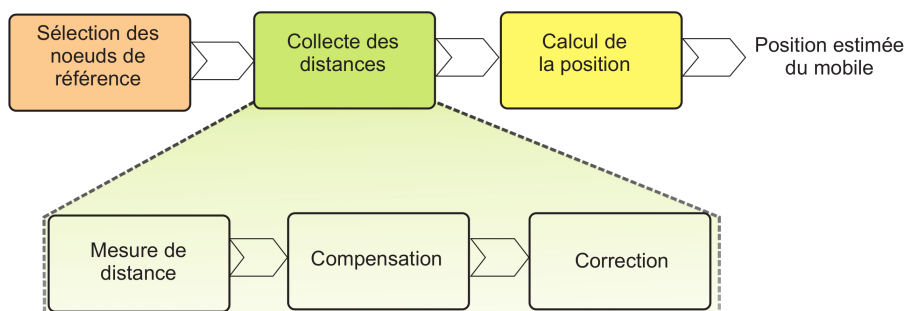


FIGURE 2.5 – Démarche générale (source : thèse Réjane Dalcé)

Pour ce faire, ont été proposés dans le cadre des travaux de la thèse de Mlle Réjane Dalcé, différentes solutions permettant d'aboutir à un système de localisation complet, du protocole de *ranging* à l'algorithme de localisation, en passant par une méthode d'accès au médium et un environnement de test et d'évaluation des performances incluant simulation et *testbed*. La démarche suivie est illustrée par la figure 2.5 :

1. dans un premier temps, les noeuds de référence (ancres) vont être sélectionnées et annoncées par le protocole *Star Interval*,
2. ensuite, les différentes distances entre le noeud à localiser et les ancres de référence sont mesurées par le protocole de *ranging*,
3. enfin, la position du noeud est calculée par l'algorithme de localisation.

Nous allons détailler les différentes propositions faites dans les sections suivantes.

2.3.1.2.1 Protocoles de *ranging* SSDS-TWR et PDS-TWR

Nous l'avons vu plus haut, si l'approche *range-based* donne des résultats intéressants en mesure de distance (1D), ces protocoles sont cependant générateurs de trafic s'ils sont utilisés en 2D ou 3D. En effet, plusieurs *rangings* successifs sont alors nécessaires, ce qui d'une part, augmente sensiblement la charge protocolaire, et, d'autre part, sur des technologies bas débit comme celles utilisées sur les WSN, allonge la durée d'échange. De plus, l'état de l'art a montré que les protocoles de *ranging* basés sur la mesure du temps de vol sont sensibles à la durée d'exécution ; le protocole TWR, par exemple, perd en précision si la durée entre les message *START* et *ACK* augmente, à cause de la dérive des horloges locales à chaque noeud.

Tout en gardant l'approche TWR qui ne nécessite pas de synchronisation entre les noeuds, réduire le nombre de messages nécessaires au *ranging* sans augmenter de manière significative le temps entre les deux messages du TWR était donc une problématique intéressante dans notre étude. Pour ce faire, nous avons proposé deux protocoles de *ranging* :

- *Sequential Symmetric Double Sided Two-Way Ranging* (SSDS-TWR) (cf. figure 2.6 gauche), qui est une séquence de plusieurs SDS-TWR (la version standardisée par IEEE 802.15.4 [34]). Avec SSDS-TWR, les messages sont échangés avec n ancres séquentiellement : SSDS-TWR constitue donc une référence pour comparer nos travaux,
- *Parallel Double Sided Two-Way Ranging* (PDS-TWR) (cf. figure 2.6 droite), un protocole de *ranging* original, qui réduit le nombre de messages échangés grâce à deux messages diffusés (*broadcasts* de niveau 2), au prix d'une augmentation de la durée du TWR et d'une perte de la symétrie des TWR. PDS-TWR constitue une contribution originale de la thèse de Mlle Réjane Dalcé.

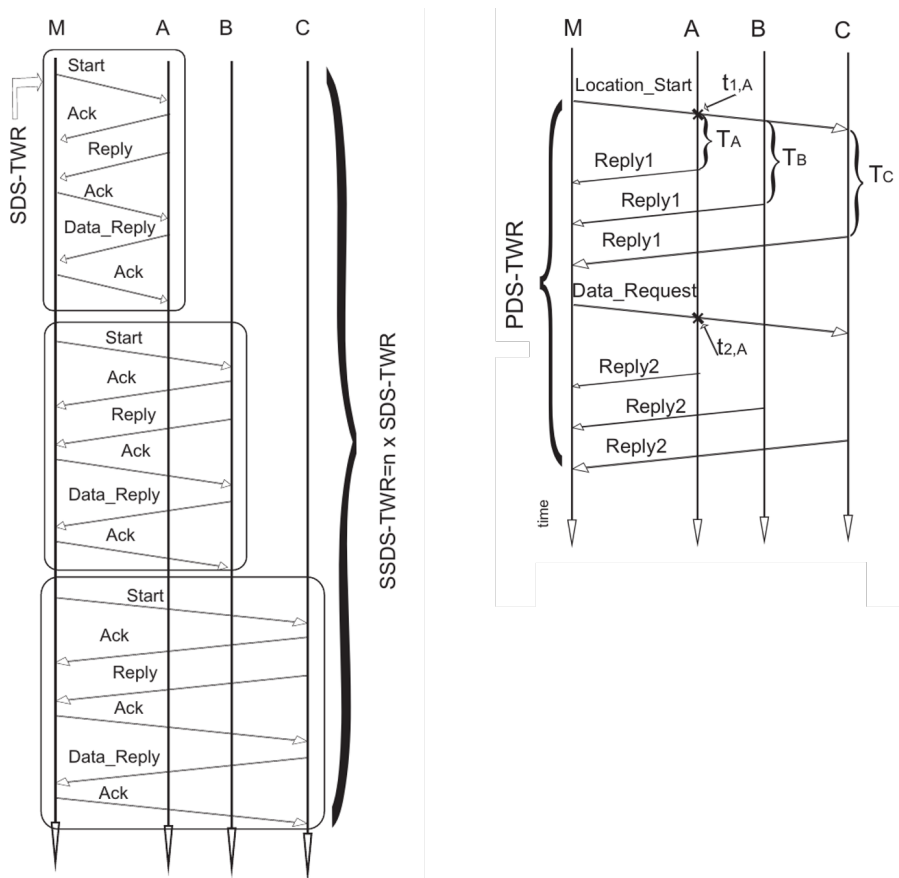


FIGURE 2.6 – Diagramme de séquence des protocoles SSDS-TWR et PDS-TWR (source : thèse Réjane Dalcé)

Comme on peut le voir sur la figure 2.6 droite, la diffusion des messages `LOCATION_START` et `DATA_REQUEST` permet de réduire le nombre de messages échangés : PDS-TWR propose donc un seul TWR où les réponses arrivent les unes après les autres sans émission de messages intermédiaires par le mobile. Par rapport à SSDS-TWR, la durée globale de l'exécution du protocole est donc réduite, ce qui permet de gagner en énergie pour un nœud mobile contraint en énergie. Les équations 2.5 et 2.5 indiquent le nombre de messages nécessaire à l'exécution des deux protocoles.

$$n = 6 * nbancres \quad (2.5)$$

$$n = 2 + 2 * nbancres \quad (2.6)$$

La section 2.3.1.3 présente une comparaison des principaux résultats obtenus.

2.3.1.2.2 Protocole MAC *Star Interval* pour la localisation

D'une manière générale, les protocoles de *ranging* sont très contraints temporellement. En effet, non seulement les messages sont estampillés, à l'émission et à la réception, par des horloges à très haute fréquence - il s'agit de détecter des différences à la centaine de picosecondes dans des distances typiques à un environnement indoor - mais, de plus, d'un point de vue matériel, ces horloges étant situées sur des nœuds différents, elles ne sont pas nécessairement égales en fréquence et, par conséquent, sont soumises à une dérive électroniquement inévitable. Le protocole SDS-TWR, par exemple, donne de meilleurs résultats que le protocole TWR grâce à la symétrisation des échanges, ce qui le rend encore plus contraint temporellement. De ce fait, dans une première approche, les échanges protocolaires liés au *ranging* doivent être exécutés sur une durée la plus réduite possible, ce qui les rend incompatibles avec une méthode d'accès au médium de type CSMA, par exemple. Une méthode d'accès au médium spécifique est donc nécessaire.

Star Interval est la seconde contribution de la thèse de Mlle Réjane Dalcé. Il s'agit d'un protocole permettant de dégager un court intervalle temporel pendant lequel les protocoles de *ranging* vont pouvoir être exécutés sans risque de collision avec les autres nœuds du voisinage. Le *Star Interval* ne fait aucune hypothèse du point de vue de la topologie; la seule hypothèse est que l'ensemble des nœuds diffuse régulièrement des *beacons*, y compris le nœud à localiser². Comme son nom l'indique, le *Star Interval* va permettre au nœud souhaitant se localiser de négocier avec son voisinage un intervalle de temps qu'il pourra lui-même maîtriser, se retrouvant temporairement au centre d'une topologie en étoile. La figure 2.7 illustre la topologie du réseau et l'étoile centrée sur le mobile. Pendant le *Star Interval*, le nœud est libre d'exécuter n'importe quel protocole de *ranging*, SSDS-TWR ou PDS-TWR, sans que les messages de *ranging* n'entrent en collision avec d'autres trames ou autres messages de *ranging*.

Se basant sur l'hypothèse d'une période régulière pour la diffusion de *beacons*, comme la *Beacon-Only Period* d'ADCF ou MACARI, la négociation du *star interval* prend place dans ces messages, comme l'illustre la figure 2.8. Ce protocole permet également la diffusion de la position du nœud, si celui-ci la connaît. Par une simple écoute des *beacons* dans le voisinage à un saut, les nœuds peuvent donc maintenir une table des positions des voisins à un saut, comme recommandé dans le modèle ALO (cf. 2.1.2).

Le protocole de négociation a complètement été spécifié dans la thèse de Mlle Réjane Dalcé [58] : le nœud souhaitant se localiser fait la demande du *star interval* dans la charge utile d'un premier *beacon*, en indiquant la liste des nœuds voisins qu'il a sélectionné. Les nœuds concernés utilisent leur prochain *beacon* pour répondre, toujours dans la charge utile. Notons que si l'un des nœuds voisins sait que le prochain slot possible pour le *star interval* est déjà pris, il l'annoncera au nœud effectuant la requête. En fonction des réponses obtenues, le nœud initial confirme ou abandonne le *star interval*, à la fin de la prochaine période active.

Un résumé du format du message de localisation encapsulé dans la charge utile des *beacons* est rappelé en figure 2.9. Comme on peut le voir sur la figure, un message unique `Localization_Field` avait été

2. Bien que contestable car dans un contexte IEEE 802.15.4, le nœud à localiser serait certainement un capteur, donc un nœud RFD, qui n'émettrait pas de *beacon*, dans la thèse de Réjane Dalcé, cette hypothèse se voulait rapprochant des autres travaux en cours sous notre direction, en particulier ADCF et SiSP, eux aussi basés sur des *beacons*.

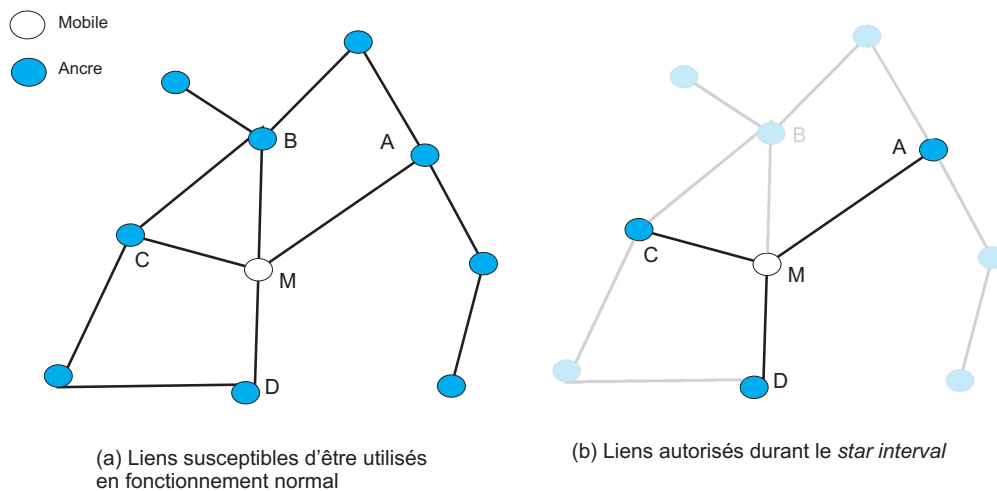


FIGURE 2.7 – Topologie pour le protocole *star interval*

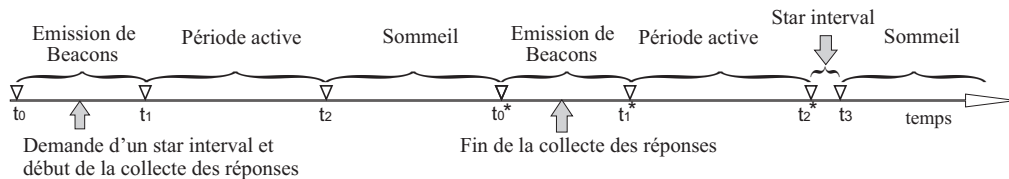


FIGURE 2.8 – Séquence pour la négociation du *star interval* (source : thèse Réjane Dalcé)

proposé, indiquant éventuellement la position du nœud si elle est connue, ainsi que les différentes demandes ou réponses relatives au protocole *star interval*.

La figure 2.10 illustre deux exemples du protocole : un premier message (a) où, d'après le premier octet, de droite à gauche :

- la position du nœud n'est pas annoncée (0),
- le message contient une requête de localisation (01),
- le protocole demandé est PDS-TWR (01),
- la requête concerne 4 ancres (100).

La figure 2.10 (b) illustre un second message où, toujours d'après le premier octet, de droite à gauche :

- la position du nœud est annoncée (1) et sera présente sur les 4 octets suivants,
- le message contient une ou plusieurs réponses de localisation (10),
- puisque le message est une réponse, le champ protocole est donc ignoré (il est positionné ici à 00),

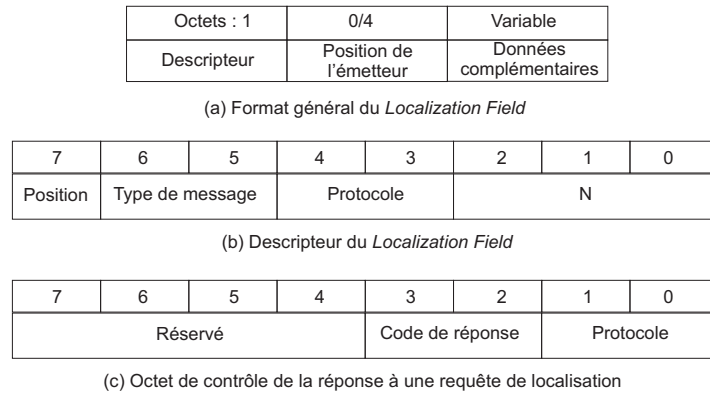


FIGURE 2.9 – Format du message de localisation dans le protocole *star interval*

- on trouvera par la suite deux réponses (010).

La suite du message comprend les réponses, avec les adresses correspondantes aux nœuds demandeurs. L'avantage de ce format est de pouvoir inclure tout le protocole dans les *beacons*, sans nécessité de transmettre des messages supplémentaires.

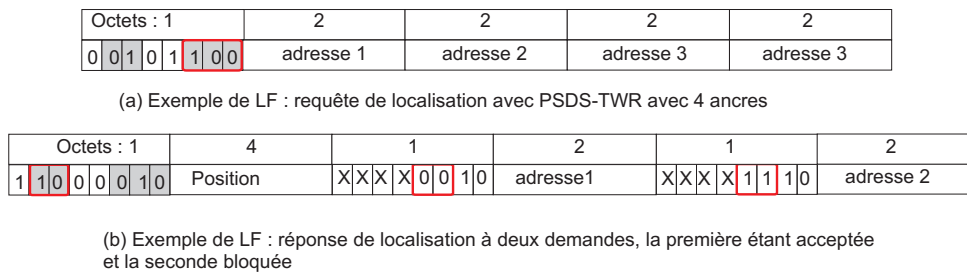


FIGURE 2.10 – Format de message pour le protocole *star interval* : exemples

Le *star interval* ainsi négocié permet l'exécution du protocole de *ranging* par les nœuds concernés sans risque de collision avec le voisinage à un saut de chaque nœud concerné.

2.3.1.2.3 iRingLA

Le sujet de la thèse concernant l'auto-localisation des nœuds capteurs, il était nécessaire de permettre une localisation par le nœud lui-même, sans faire appel à un calculateur puissant comme un serveur ; un algorithme de localisation suffisamment léger devait pouvoir être exécuté par le processeur du nœud capteur, processeur généralement considéré dans la littérature comme très peu dotées en ressources processeur et mémoire vive. En 2010, les nœuds WSN étaient encore souvent équipés d'un processeur 8 bits et d'une RAM de quelques kilo-octets.

Après un état de l'art sur les différentes méthodes de localisation réalisés à partir de n mesures de distances, nous en sommes venus à proposer un algorithme léger, désigné par *inter Ring Localization*

Algorithm (iRingLA), qui calcule l'intersection des anneaux retournés par le protocole de *ranging*. Il est effectivement question ici *d'anneau et non de cercle*, dans la mesure où le processus de *ranging* ne fournit pas, en pratique, une mesure de distance juste, mais une mesure entachée d'une erreur variable qui doit être quantifiée, en fonction de la méthode de *ranging* utilisée. Le centre de l'anneau est l'ancre réalisant le *ranging*, et l'épaisseur de l'anneau représente l'incertitude sur l'évaluation de la distance. L'objectif d'iRingLA est l'identification des intersections entre les anneaux, intersections ayant le plus de chances de contenir la position réelle du mobile.

Pour ce faire, une matrice de points est construite et placée sur les intersections pour déterminer des points (positions) appelés *candidats*. Ensuite, à partir des positions candidates retenues, une estimation de la position du nœud à localiser est réalisée. Passer par une matrice de points a plusieurs avantages comme permettre un dimensionnement de cette matrice en fonction des ressources mémoire et CPU disponibles sur le nœud (éventuellement de façon dynamique), ou bien encore la possible simplicité de l'algorithme de recherche d'une solution par tests successifs, sur les éléments de la matrice. La figure 2.11 illustre le placement de la matrice sur les intersections de deux anneaux.

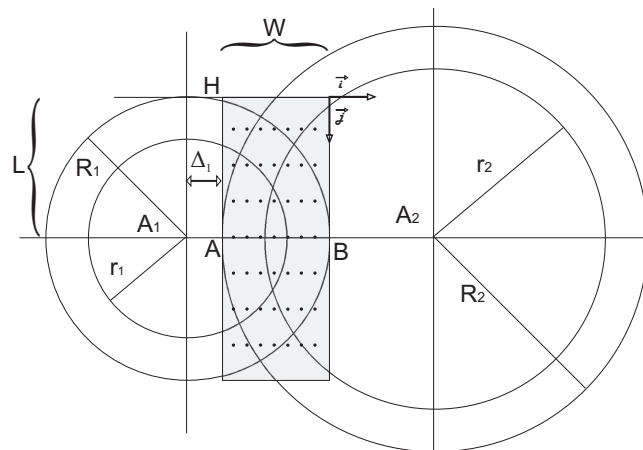


FIGURE 2.11 – Placement de la matrice de calcul dans iRingLA (source : thèse Réjane Dalcé)

iRingLA est donc la troisième contribution de la thèse de Mlle Réjane Dalcé ; son mémoire détaille plusieurs questions relatives à cette contribution telles que l'ordonnancement des paires d'anneaux ou la problématique de la complexité de la recherche linéaire due aux multiples parcours de la matrice. Nous ne détaillerons pas ici ces points relativement extérieurs à la thématique traitée dans ce présent mémoire.

2.3.1.2.4 NanoLoc et DokoSim

Plusieurs outils ont été développés en vue de tester les contributions de la thèse et en évaluer les performances, par simulation mais aussi dans un environnement réel :

- fidèle à notre volonté d'aller jusqu'au prototypage, une plate-forme matérielle basée sur une couche physique IEEE 802.15.4a-CSS a également été développée en vue d'exécuter l'ensemble des contributions dans un environnement réel,
- en l'absence de logiciel de simulation dédié à la localisation *range-based*, un simulateur, nommé DokoSim, avait également été proposé.

2.3.1.3 Résultats

Les travaux de Mlle Réjane Dalcé ont permis d'obtenir de nombreux résultats. Quelques-uns, qui concernent spécifiquement la partie protocolaire, sont cités ici.

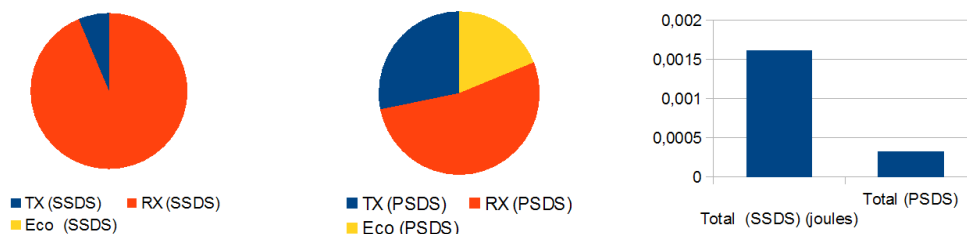


FIGURE 2.12 – Consommation énergétique engendrée par SSDS-TWR et PDS-TWR pour 3 ancrés

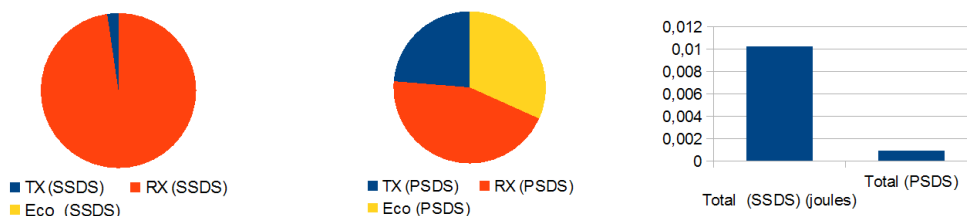


FIGURE 2.13 – Consommation énergétique engendrée par SSDS-TWR et PDS-TWR pour 7 ancrés

Les figures 2.12 et 2.13 représentent l'impact énergétique, en joules, au niveau des ancrés, des protocoles SSDS-TWR (à gauche) et PDS-TWR (à droite). Deux cas sont considérés : 3 ancrés (fig. 2.12) et 7 ancrés (2.13). Les figures donnent également la répartition énergétique, i.e. le passage dans chaque état du *transceiver* pour chacun des deux protocoles. Comme on peut le voir, PDS-TWR permet de réaliser une économie substantielle grâce à la diffusion de deux messages `LOCATION_START` et `DATA_REQUEST`, mais également un passage en mode économie d'énergie au lieu de rester en réception, une fois les réponses envoyées.

La figure 2.14 illustre quant à elle le volume de données nécessaire pour chacun des deux protocoles, en fonction du nombre d'ancrės sollicitées. Comme on peut le voir, là encore, PDS-TWR permet de réaliser une économie importante, là encore grâce à la diffusion qui économise quatre messages par ancre contactée.

2.3.1.4 Conclusions et perspectives sur l'encadrement de l'activité de recherche

Cette première activité sur le sujet de l'auto-localisation des nœuds dans le contexte WSN nous a d'abord permis de prendre pleinement connaissance de ce domaine. Alors que les protocoles *range-based* s'annonçaient comme prometteurs en terme de précision de *ranging*, nous sommes parvenus à proposer une première solution complète, c'est-à-dire des protocoles à l'algorithme de *n*-latération en passant par une méthode d'accès au médium et un environnement de test et d'évaluation des performances incluant simulation et *testbed*. Les protocoles proposés permettent une réduction de la charge protocolaire par rapport à l'existant, voire du nombre de messages pour PDS-TWR.

À la suite de ce premier travail sur cette thématique, nous étions surtout convaincus de son intérêt et de son originalité dans la communauté Réseaux et Protocoles. Les premiers résultats étaient encourageants et

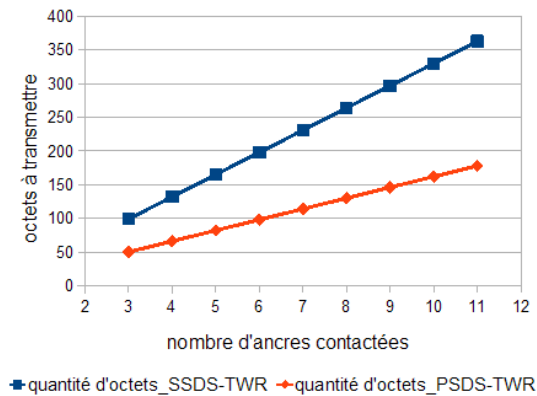


FIGURE 2.14 – Charge protocolaire de SSDS-TWR et PDS-TWR en fonction du nombre d’ancres

les performances obtenues nous permettaient d’imaginer des travaux à venir forts intéressants. Sur le plan protocolaire, nous avons la sensation d’être au tout début d’un travail conséquent, visant à minimiser les contraintes temporelles des protocoles, mais aussi leur empreinte (nombre de messages, *overhead*) ; l’acquiescement nécessaire avec CSS, par exemple, devait disparaître, mais pour cela, il fallait pouvoir disposer d’autres couches physiques, ce qui allait tout à fait dans le sens de nos travaux sur OpenWiNo (cf. §1.3.5.2.1). Enfin, et pour confirmer ce dernier point, bien que nous étions parvenus à mener une étude de performances dans un environnement réel, nous étions également convaincus de l’intérêt de proposer une plate-forme matérielle et logicielle totalement ouverte.

2.3.1.5 Publications marquantes

Revue : Rejane Dalce, Thierry Val, and Adrien Van den Bossche. Comparison of Indoor Localization Systems based on Wireless Communications. *Wireless Engineering and Technology*, 2 No 4, octobre 2011

Conférence : Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Une plateforme de prototype évolutive pour la localisation dans un réseau IEEE 802.15.4a CSS. In *Conférence Internationale Francophone d’Automatique (CIFA), Grenoble, 04/07/2012-06/07/2012*, page (support électronique), <http://www.ieee.org/>, juillet 2012. IEEE

Conférence : Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Towards a new range-based localization method for WSNs: Challenges, Constraints and Correction. In *IEEE International Conference on Wireless Communications in Unusual and Confined Areas (ICWCUCA), Clermont-Ferrand, France, 28/08/2012-30/08/2012*, 2012. (distinction décernée : Best Paper)

Conférence : Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Indoor Self-Localization in a WSN, based on Time Of Flight: Propositions and Demonstrator. In *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Montbelliard, 28/10/2013-31/10/2013*, 2013

2.3.2 IAL-RCSF et DecaDuino

Co-encadrement de M. Hssane Marrou dans son stage de M2R

« Étude et caractérisation d'une PHY/MAC 802.15.4a UWB et implémentation d'algorithmes de localisation sur un réseau de capteurs sans fil »

Période : février - août 2013

Financement : projet commission valorisation UT2J

Co-encadrement de Mlle Réjane Dalcé, post-doctorante

« Localisation par temps de vol sur couche PHY UWB »

Période : septembre 2013 - août 2014

Financement : ATER IUT de Blagnac

2.3.2.1 Contexte des recherches menées

Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Mlle Réjane Dalcé ont montré que si la localisation par les méthodes *range-based* en temps de vol donnait des résultats forts intéressants, les performances des protocoles de *ranging* étaient intimement liées à la technologie de communication. Nous étions donc alors en recherche d'autres technologies de communication pour confronter les résultats obtenus dans le cadre de la thèse. C'est alors qu'en 2011, à l'occasion d'une expertise scientifique commandée par le groupe *Gemalto*, nous avons rencontré l'entreprise *DecaWave* et avons eu accès, sous NDA, à des kit de développement et des échantillons (*samples*) de *transceivers* répondant au standard IEEE 802.15.4a-2007 et implémentant une couche physique UWB (*Ultra-Wide Band*). L'accès à cette technologie fut très intéressant pour nos travaux, ouvrant de nouvelles perspectives, et bénéficiant d'une certaine originalité vis-à-vis du reste de la communauté scientifique où, si les *testbeds* commençaient alors à fleurir, aucun n'annonçait alors un support de cette couche physique prometteuse pour notre sujet de recherche.

2.3.2.2 Axes de recherche

L'accès à cette nouvelle technologie compatible avec l'approche *range-based* ouvrait donc de nouvelles opportunités dans le cadre de nos travaux. Alors que nous avons soumis un projet sur l'appel ANR « Jeune Chercheuse-Jeune Chercheur » qui n'a pas été financé, nous avons alors sollicité la commission valorisation de l'Université Toulouse 2 Jean Jaurès pour le financement d'un stagiaire et l'achat de petits matériels, Mlle Réjane Dalcé restant dans l'équipe grâce à un poste d'ATER à l'IUT. L'équipe montée, le projet intitulé IAL-RCSF, *Intégration d'Algorithmes de Localisation dans un Réseau de Capteurs Sans Fil*, devait alors permettre :

- d'évaluer les capacités de *ranging* de cette nouvelle technologie, par la pratique, avec les échantillons obtenus auprès de DecaWave,
- de voir comment les travaux de la thèse de Mlle Réjane Dalcé pouvaient être transposés sur cette technologie,
- d'identifier de nouveaux verrous compte tenu des caractéristiques propres à cette couche physique - y compris au delà des aspects *ranging* : peut-être au niveau MAC³.

3. ... un peu comme nous l'avons fait dix années auparavant dans notre thèse de doctorat, avec ZigBee!

Étant financé par la commission valorisation de l'Université, ce projet a abouti à une démonstration opérationnelle [70].

2.3.2.3 Principales contributions et résultats associés

2.3.2.3.1 Découverte de la couche PHY UWB IEEE 802.15.4a-2007

Bien qu'inclue dans le standard IEEE 802.15.4 bien connu dans les réseaux de capteurs sans fil, la couche physique UWB IEEE 802.15.4a-2007 constitue une certaine rupture pour les LP-WPAN en proposant :

- plusieurs débits : 110 kbit/s, 850 kbit/s, 6.8 Mbit/s et même 27.2 Mbit/s,
- de nombreux paramétrages possibles au niveau de la transmission (PRF, *Pulse Repetition Frequency*) comme au niveau de l'en-tête physique (longueur du mot de synchronisation et longueur du délimiteur de début de trame (SFD, *Start of Frame*),
- l'exploitation de diverses bandes de fréquence : entre 3 GHz et 5 GHz d'une part, et entre 6 GHz et 10 GHz d'autre part,
- et bien entendu, une largeur de spectre importante : 499,2 MHz et 1331,2 MHz avec une puissance d'émission très faible.

Sans plus rentrer dans le détail de cette couche physique, on notera que celle-ci présente de nombreux avantages pour la mesure du temps de vol, notamment grâce à la précision temporelle envisageable avec la transmission impulsionnelle d'une part; d'autre part, l'introduction du bit RMARKER dans l'en-tête PHY (PHY-HDR), dédié à l'estampillage temporel, permet d'indiquer l'instant précis où émetteur et récepteur(s) horodateront le message.

2.3.2.3.2 Performances du *ranging* avec les kits DecaWave

Matériellement, les nœuds issus du kit DecaWave (EVK, *EValuation Kit*) sont constitués d'un *transceiver* DW1000 et d'un microcontrôleur ARM Cortex M3 de type STM32F105RCT6. L'évaluation du temps de vol utilise des estampilles temporelles basées sur un *timer* cadencé à 64 GHz, c'est-à-dire avec une unité temporelle à 15.625 picosecondes.

Comme pressenti, le *ranging* par une couche PHY UWB donne des résultats forts intéressants. Nous avons constaté dans la littérature que les *transceivers* DecaWave avaient été évalués [71] dans diverses situations *Line Of Sight* (LOS) (à vue directe) et *Non-Line Of Sight* (NLOS) (avec obstacle) [72]. En intérieur et LOS, l'erreur dépasse rarement les 20 centimètres sur des distances inférieures à 10 mètres. En NLOS, les erreurs peuvent être plus importantes, en fonction des matériaux constituant les obstacles traversés. Le stage de M. Hssane Marrou a permis de vérifier ces performances en diverses situations, par utilisation du protocole SDS-TWR, avec l'implémentation fournie avec le matériel DecaWave. Une paire de nœuds a été positionnée à diverses hauteurs, au niveau du sol ou sur trépid (figure 2.15), en intérieur et extérieur, en LOS et NLOS.

Les résultats obtenus sont représentés sur plusieurs figures :

- Sur la figure 2.16, on peut voir l'erreur de *ranging* avec les nœuds utilisés en intérieur, sans obstacles, sur une distance comprise entre 1 et 8 mètres, au ras du sol et à 1 mètre de haut. On peut voir que



FIGURE 2.15 – Expérimentation SDS-TWR en LOS indoor avec EVK DecaWave

l'erreur excède que très rarement les vingt centimètres. Nous avons également considéré qu'il était intéressant de garder le signe de l'erreur, celle-ci étant tantôt positive, tantôt négative.

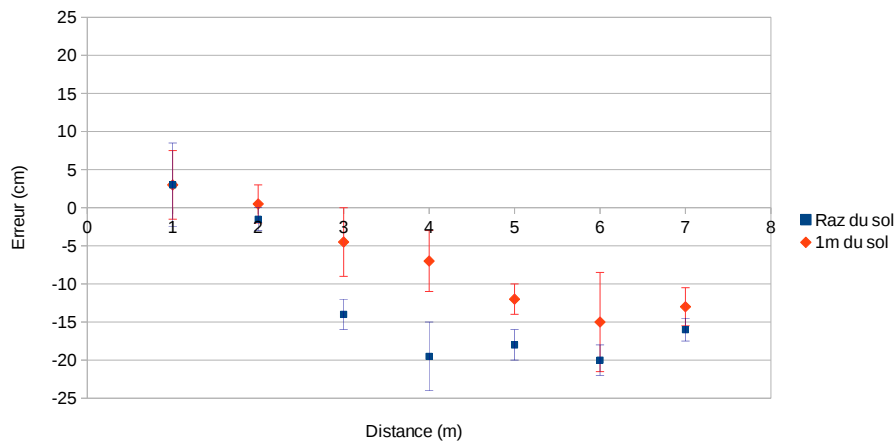


FIGURE 2.16 – Résultats SDS-TWR en LOS indoor avec EVK DecaWave

- Sur la figure 2.17, on peut voir l'erreur de *ranging* avec les nœuds utilisés en extérieur, toujours sans obstacle. Dans cette expérimentation, nous avons atteint la portée maximale de la paire de nœuds, ceux-ci étant positionnés à une hauteur de 1 mètre du sol. Nous pouvons observer que l'erreur est légèrement plus importante qu'en intérieur, surtout lorsque nous atteignons la portée maximale.
- La figure 2.18 illustre une expérimentation réalisée avec obstacle (NLOS) ; ici, nous avons positionné la paire de nœuds à une distance d , derrière un mur en L, fait de briques en terre cuite typiquement toulousaines. Le premier nœud est positionné à une distance fixe $L1$ de 3 mètres du coin du mur, alors que le second nœud est positionné à une distance variable $L2$ de ce même coin. Trois distances sont testées. Le graphe représente la distance réelle (d), la distance estimée par les nœuds (d_e) ainsi que la distance si contournement ($L1 + L2$). On observe que d_e est systématiquement plus élevée

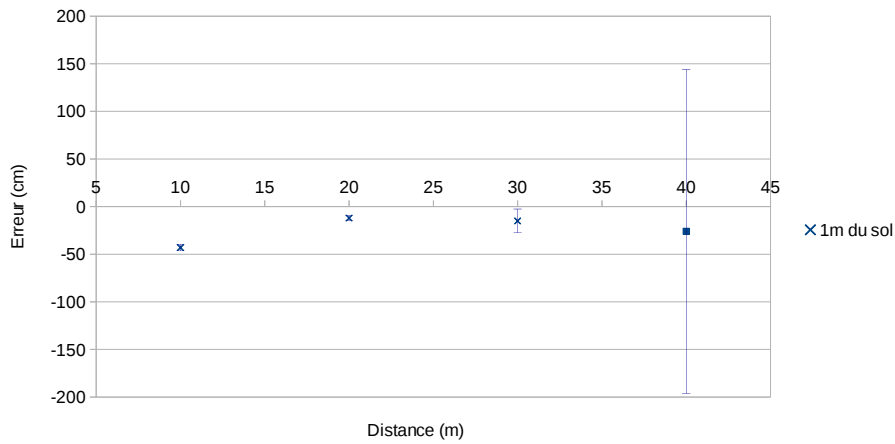


FIGURE 2.17 – Résultats SDS-TWR en LOS outdoor avec EVK DecaWave

que d , mais cependant toujours inférieure à $L1 + L2$, ce qui signifie que l'onde se propage bien à travers le mur et ne contourne pas l'obstacle.

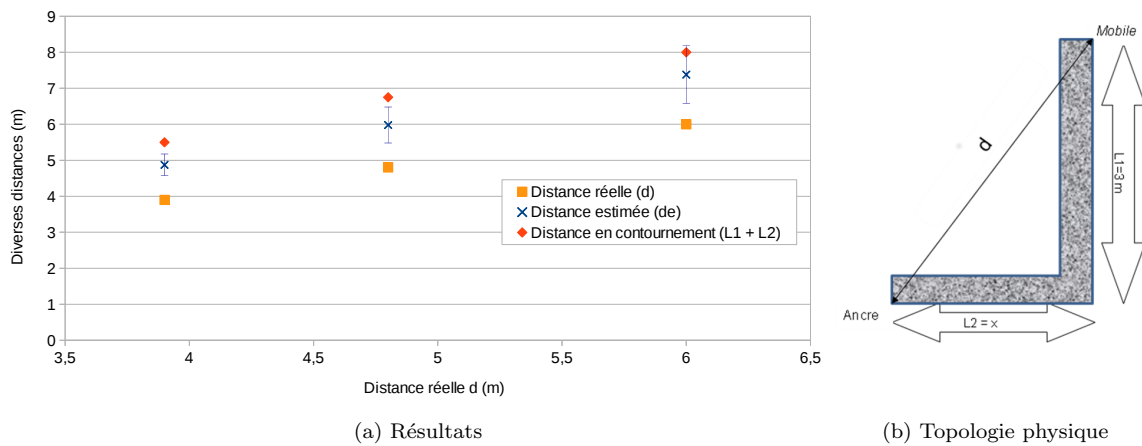


FIGURE 2.18 – Expérience conduite en NLOS

- En chambre anéchoïque où il n'y a pas de réflexion (chambre de l'IUT de Blagnac), une expérimentation avec des distances réelles de 1, 2, 3 et 4 mètres, nous obtenons une erreur moyenne comprise entre 5 et 11 centimètres, avec un écart de moins de 5 cm.

Ces résultats expérimentaux ont ensuite été considérés comme une base pour la comparaison des travaux qui allaient venir. Cependant, si l'EVK DecaWave était livré avec une base de code accessible et modifiable, implémentant le protocole SDS-TWR, ces expérimentations préliminaires nous avaient permis d'en entrevoir la forte complexité. Le développement d'un framework plus simple à utiliser et sous licence libre constituerait une brique essentielle pour notre équipe, ce que nous avons ensuite développé avec DecaDuino (cf. section 2.3.2.3.4).

2.3.2.3.3 Extensions des travaux de thèse de Mlle Réjane Dalcé

La thèse de Mlle Réjane Dalcé étant soutenue, le projet IAL-RCSF a également permis de poursuivre la collaboration, alors que Réjane était ATER à l'IUT. Disposant de *transceivers Ultra-Wide Band* caractérisés, nous avons pu étendre ses travaux, alors seulement évalués avec NanoLoc, le prototype implémentant un *transceiver* CSS. Nous avons pu alors proposer deux contributions complémentaires :

- une version améliorée de l'algorithme de localisation *iRingLA*, se basant sur des anneaux de taille paramétrables. En effet, avec une couche physique de type UWB, les *rangings* étant d'une bien meilleure précision qu'avec une couche CSS, l'épaisseur des anneaux était trop faible pour pouvoir positionner correctement la matrice de points candidats.
- dans la mesure où la couche UWB permet la réalisation de *rangings* sans acquittement, une implémentation du protocole PDS-TWR et une étude de performances en conditions réelles, expérience que nous n'avions pas pu conduire pendant la thèse en l'absence de matériel compatible.

Cette dernière observation allait ouvrir un sujet très intéressant concernant la dérive des horloges utilisées par les protocoles de *ranging* ; en effet, comme nous avons eu l'occasion de le présenter plus haut (cf. §2.3.1.1), les *rangings* sont calculés à partir d'estampilles temporelles réalisées par des horloges différentes, parce que réparties sur des nœuds différents ; or ces horloges ne peuvent être rigoureusement identiques, compte tenu de l'usage de quartz différents.

$$ToF'_{TWR} = \frac{t_4 - t_1 - \delta(t_3 - t_2)}{2} \quad (\text{équation 2.3 en rappel})$$

Pour rappel, dans l'équation 2.3 permettant le calcul du temps de vol dans le cas du protocole TWR, nous faisons apparaître un coefficient δ comme étant le rapport des deux fréquences d'horloge. Ce coefficient permet de corriger le temps de vol calculé en tenant compte de cet écart inévitable. Le *transceiver* DecaWave produisant une évaluation de cet écart mais sans que cette information soit accessible avec l'EVK, une implémentation du protocole incluant le coefficient δ allait devenir possible avec le développement de l'environnement DecaDuino.

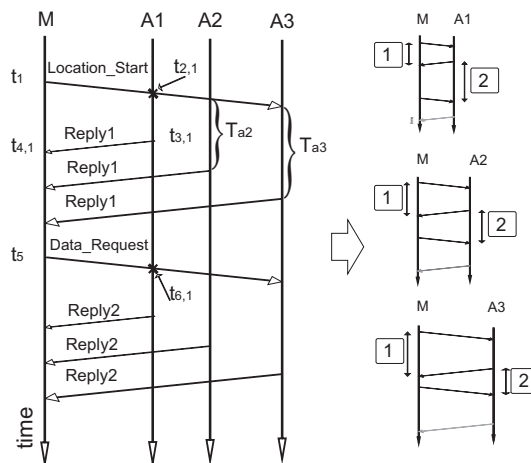


FIGURE 2.19 – Mise en évidence de l'asymétrie du protocole PDS-TWR

Nous avons alors observé que la non symétrie du protocole PDS-TWR impacte fortement les performances du *ranging* ; plus précisément, l'ordre des réponses des ancres, indiqué dans le *beacon*, impacte l'erreur de *ranging* compte tenu des durées variables dans les échanges de messages [LOCATION_START et REPLY1_i] d'une part, et [DATA_REQUEST et REPLY2_i] d'autre part, comme on peut le voir sur la figure 2.19. Expérimentalement, cette hypothèse est confirmée : comme on peut le voir très nettement sur la figure 2.20, sur une expérience à trois ancres, c'est la seconde ancre qui présente la meilleure symétrie dans le protocole, qui a l'erreur la plus faible. Nous constatons également que l'erreur peut être très élevée, jusqu'à 5 mètres pour la troisième ancre, sur une distance pourtant très faible.

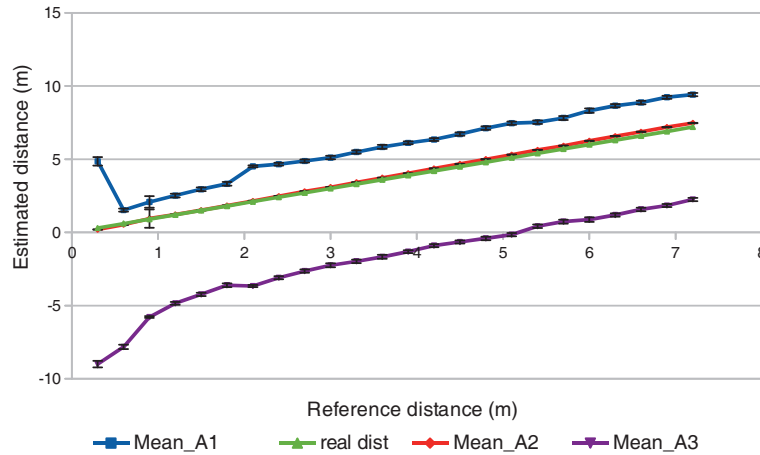


FIGURE 2.20 – *Ranging* avec PDS-TWR, pour 3 ancres

Nous avons alors cherché à modéliser l'erreur du *ranging*, en partant du principe de l'équation 2.3, mais en généralisant le problème aux n nœuds de notre réseau. Ici, il ne s'agit plus de considérer un unique coefficient δ exprimant l'écart fréquentiel calculé par le récepteur par rapport à un émetteur, mais n coefficients notés $(1 + e_k)$ définissant la dérive fréquentielle entre l'horloge idéale - qui n'existe pas - et chaque horloge embarquée dans chaque nœud k du réseau.

Soit $t_{f,i}$ l'expression théorique du temps de vol entre le mobile et la i ème ancre selon le protocole PDS-TWR, donné par l'équation 2.7, et $\hat{t}_{f,i}$ le temps de vol estimé associé, donné par l'équation 2.8. Dans l'équation 2.8, chaque différence d'estampilles, qui est exprimée par une horloge inévitablement imparfaite, est pondérée par le coefficient de correction $(1 + e_k)$, où k vaut M pour le mobile, A_i pour la i ème ancre, etc. Grâce à DecaDuino présenté plus bas, ce coefficient peut être déterminé et injecté pour déterminer des *rangings* largement améliorés. La figure 2.21 illustre cette amélioration, dans le même scénario que précédemment. La figure 2.22 se focalise sur la troisième ancre, avant et après la correction.

$$t_{f,i} = \frac{(t_{4,i} - t_1) - (t_{3,i} - t_{2,i}) + (t_{6,i} - t_{3,i}) - (t_5 - t_{4,i})}{4} \quad (2.7)$$

$$\hat{t}_{f,i} = \frac{(t_{4,i} - t_1)(1 + e_M) - (t_{3,i} - t_{2,i})(1 + e_{A_i}) + (t_{6,i} - t_{3,i})(1 + e_{A_i}) - (t_5 - t_{4,i})(1 + e_M)}{4} \quad (2.8)$$

Ce dernier sujet est une contribution majeure de cette activité de recherche.

A la fin du projet IAL-RCSF, nous avons mis en place une démonstration de localisation *indoor* à la Maison Intelligente de Blagnac (cf. section 3.1). Dans cette démonstration, il est possible de localiser une

personne portant un nœud UWB et évoluant dans son environnement de vie (domicile) en vue de déclencher des interactions avec cet environnement (interconnexion avec le bus domotique). Cette démonstration est disponible en vidéo [70].

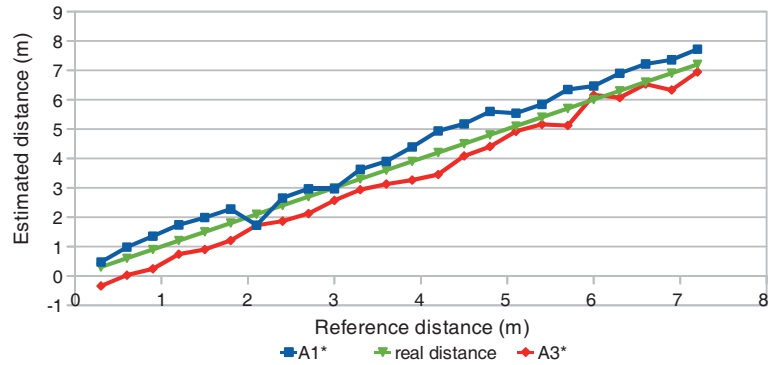


FIGURE 2.21 – *Ranging* avec PDS-TWR, pour 3 ancres, avec correction

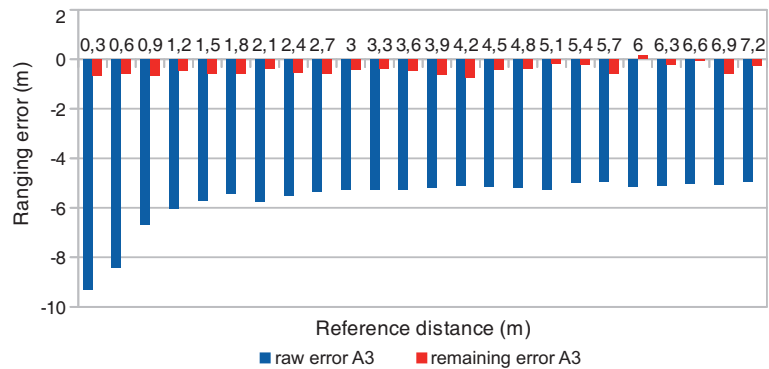


FIGURE 2.22 – Représentation de l'erreur de *Ranging* avec PDS-TWR, sur la troisième ancre, avant et après correction

2.3.2.3.4 Élaboration de DecaDuino

Les travaux réalisés jusqu'ici avaient permis de constater qu'il nous manquait un environnement de développement pour prototyper rapidement des protocoles de *ranging*. Idéalement, cet environnement devait avoir les caractéristiques suivantes :

- être situé *juste au dessus de la couche physique UWB* et être indépendant de tout algorithme et protocole d'accès au médium, pour s'affranchir des temps potentiellement perturbateurs pour le *ranging* (notamment les temps de traitement ou les délais de l'accès au médium),
- permettre l'accès aux estampilles temporelles du RMARKER à l'émission comme à la réception, produites par le matériel, ainsi qu'aux différentes données accessibles via le *transceiver* DecaWave, telles que l'évaluation de la différence d'horloges et la réponse du canal,

- être simple à prendre en main et sous licence libre, de manière à pouvoir le diffuser et permettre à d'autres équipes de reproduire nos expérimentations. Ce dernier point était également important sur le plan stratégique, dans la mesure où aucun *mote* ni *testbed* public n'annonçait alors la disponibilité de nœuds UWB.

Sur la fin du projet IAL-RCSF, nous avons donc jeté les bases d'un framework répondant à ces attentes ; ce framework, appelé *DecaDuino*, permet l'implémentation simple et rapide de protocoles de *ranging* et de protocoles MAC au dessus de la couche physique UWB. A titre d'exemple, nous proposons, avec *DecaDuino*, une implémentation relativement compacte des protocoles TWR et SDS-TWR : moins de 200 lignes de code en Langage C chacune. Comme on peut le voir sur la figure 2.23, *DecaDuino* reprend la structure classique des empilements protocolaires normalisés par l'IEEE, avec un premier Point d'Accès de Service (SAP) pour les données (*Physical Data-Service Access Point*, PD-SAP) et un second pour le management de la couche physique (*Physical Layer Management Entity-Service Access Point*, PLME-SAP). C'est par ce second point d'accès qu'une couche adjacente peut récupérer l'estampille temporelle à l'émission (t_{TX}) ou à la réception (t_{RX}), pour implémenter un protocole de *ranging*, par exemple.

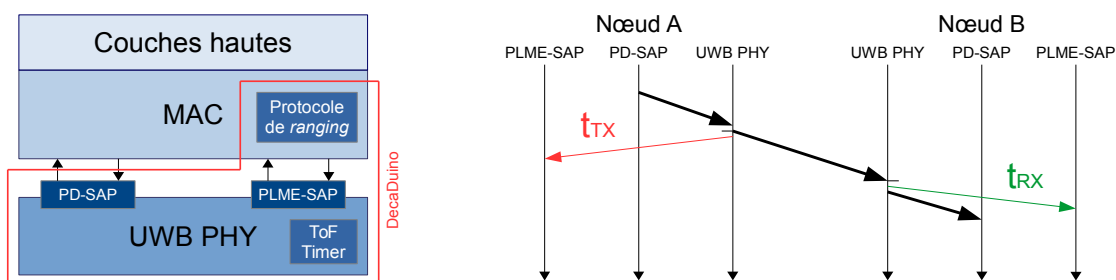


FIGURE 2.23 – *DecaDuino* dans l'empilement protocolaire

Le framework est basé sur le *transceiver* DecaWave DW1000 et en implémente les principales fonctionnalités, notamment deux sur lesquelles nous nous arrêtons ici :

- **La transmission retardée**, qui permet à la couche supérieure d'envoyer une trame à un instant prédéfini, sur la base du *timer* 64 GHz utilisé pour l'estimation du temps de vol. Grâce à cette fonctionnalité, la couche supérieure peut prendre le temps de finir la préparation de la trame, notamment en y plaçant l'estampille d'émission prévue. Cette fonctionnalité nous a permis de proposer un protocole de *ranging* à deux messages seulement, *Two-Messages Two-Way Ranging* (2M-TWR), comme nous pouvons le voir sur la figure 2.24. Alors que dans la version classique de TWR, un troisième message **REPLY** porte les deux estampilles t_2 et t_3 , grâce à la transmission retardée, t_3 peut-être déterminé à l'avance et placé dans le second message **ACK_REPLY** avant son émission. La figure 2.25 représente l'erreur de *ranging* obtenue avec 2M-TWR comparée à la version classique de TWR dans une situation LOS. Comme on peut le voir, l'erreur moyenne reste dans les 20 cm ; cependant, la fonctionnalité de transmission retardée entraîne des écarts importants entre les mesures [?, Va2016.1]
- **L'évaluation de la différence d'horloge** par le récepteur, à chaque trame reçue. Cette fonctionnalité permet au récepteur d'évaluer grossièrement la différence de fréquence entre sa propre horloge et celle de l'émetteur du message reçu, pour corriger le temps de vol calculé. Cette fonctionnalité permet de calculer les coefficients δ (dans l'équation 2.3) et $(1 + e_k)$ (dans l'équation 2.8) présentés plus haut. Une valeur instantanée étant remontée à chaque trame par le composant, *DecaDuino*

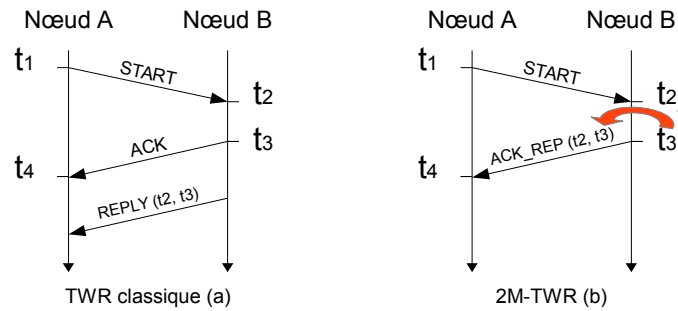


FIGURE 2.24 – Diagrammes de séquence des protocoles TWR et 2M-TWR

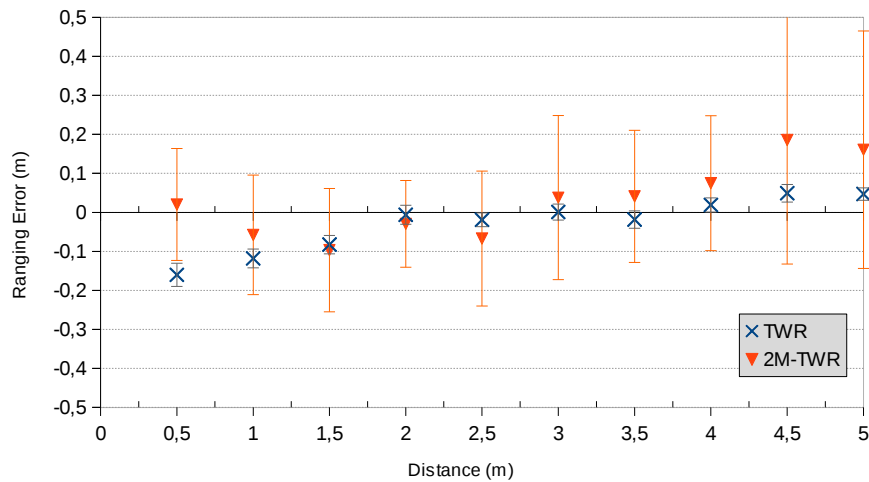


FIGURE 2.25 – Performances du protocole 2M-TWR comparé à la version classique de TWR

implémente une moyenne glissante sur les n dernières différences d'horloges reçues et enregistre cette information dans la table de voisinage, ce qui permet d'entrevoir des possibilités de corrections réparties, y compris sur une topologie ad hoc, comme nous le verrons plus loin dans les travaux de M. Ibrahim Fofana (§2.3.3) et ceux de M. François Despaux (§2.3.4).

DecaDuino a été publié fin 2015 dans [73] et est disponible sous licence GPL [62]. Comme son nom le laisse entendre, DecaDuino est une librairie Arduino. Bien entendu, elle est compatible avec OpenWiNo présenté dans le chapitre précédent. Un prototype de nœud UWB, appelé *DecaWiNo* a également été proposé dans le sillage des WiNos présentés au chapitre 1. Il est basé sur le même *transceiver*, couplé au microcontrôleur Freescale MK20DX256VLH7 monté sur l'Arduino Teensy 3.2 (ARM Cortex M4 32 bits, 72 MHz, 64 ko de RAM et 256 ko de mémoire programme). Son design est diffusé [61] sous licence Open Hardware *CERN Open Hardware Licence v1.2*.

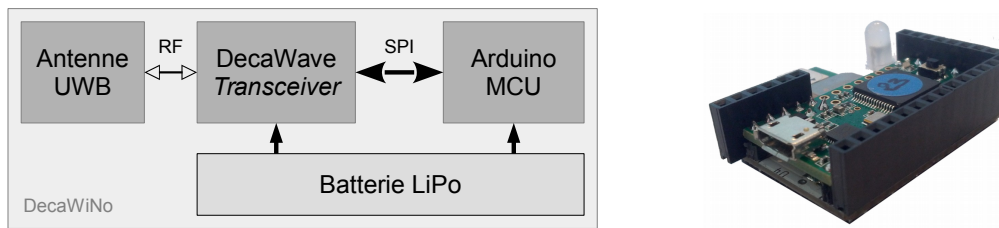


FIGURE 2.26 – Architecture typique d’un nœud DecaDuino et Prototype DecaWiNo

2.3.2.4 Conclusions et perspectives sur l’encadrement de l’activité de recherche

Le projet IAL-RCSF a permis d’étudier l’intégration des capacités d’auto-localisation dans les nœuds d’un réseau de capteurs sans fil. Les contributions de ce travail sont essentiellement d’ordre protocolaire : le nombre de messages nécessaire au *ranging* à été fortement réduit - par rapport aux travaux de la thèse de Mlle Réjane Dalcé (par la suppression de l’acquiescement) puis avec 2M-TWR, grâce à l’estampille temporelle intégrée dès le second message. Nous avons également mis en évidence la nécessité d’introduire des corrections compte tenu de la dérive des horloges de part et d’autre de la liaison sans fil, pour maintenir un *ranging* de bonne qualité, notamment en situation de protocole asymétrique. Une correction a été proposée et testée avec PDS-TWR, et a été publiée dans [74]. Une version améliorée de l’algorithme iRingLA a également été proposée, même si nous n’avons pas développé ce point dans ce mémoire.

En termes d’outil, cette activité de recherche a vu le développement et la diffusion, sous licence GPL, de *DecaDuino*, notre environnement de prototypage rapide pour les protocoles de *ranging*. Cet outil sera ensuite utilisé dans les deux dernières activités présentées dans ce chapitre : les travaux de thèse de M. Ibrahim Fofana (cf. §2.3.3) et le projet GUINNESS (cf. §2.3.4).

Les travaux réalisés dans cette activité de recherche ont également permis de lever une nouvelle problématique : serait-il possible d’intégrer des protocoles de *ranging*, de localisation ou d’auto-localisation directement dans le trafic usuel du réseau, c’est-à-dire dans les messages déjà véhiculés entre les nœuds, tels que les trame de données et les acquiescements, voire même les *beacons* ? Si l’*overhead* restait supportable, cette intégration permettrait la fourniture du service de localisation parallèlement au service de données, tel que proposé par le modèle ALO évoqué en section 2.1.2. La thèse de M. Ibrahim Fofana, présentée dans la section suivante, aborde cette question.

2.3.2.5 Publications marquantes

Conférence : Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Reducing localisation overhead: a ranging protocol and an enhanced algorithm for UWB-based WSNs. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Glasgow, Scotland, 11/05/2015-14/05/2015*, 2015

Conférence : 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), Toulouse, 23/03/2016-25/03/2016*, mars 2016

Conférence : Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. A study of the ranging error for Parallel Double Sided-Two Way Ranging protocol. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Montréal, Canada, 18/09/2016-21/09/2016*, 2016

2.3.3 Service de localisation indolore intégré dans la MAC

Co-encadrement de la thèse de M. Ibrahim Fofana

« Contribution aux architectures protocolaires pour systèmes de localisation des nœuds dans un réseau de capteurs sans fil »

Directeur de thèse : Pr. Thierry Val

Période : octobre 2013 - juillet 2017

Financement : bourse du gouvernement de la Côte d'Ivoire

2.3.3.1 Contexte des recherches menées

Sortant du projet IAL-RCSF, fin 2013, nous disposions donc :

- d'une certaine maturité sur les protocoles de *ranging*, tant théorique qu'expérimentale. Nous avons une bonne connaissance des protocoles de *rangings* classiques ainsi que ceux proposés par la communauté scientifique [76]. Nous avons nous même contribué par la proposition de SSDS-TWR et PDS-TWR [68] [69] [77]. Nous avons également une implémentation locale, sur *testbed*, des protocoles de référence, dans deux environnements matériels et logiciels distincts : NanoLoc (PHY IEEE 802.15.4-2011 CSS, Nanotron) [67] et EVK1000 (PHY IEEE 802.15.4-2011 UWB, DecaWave).
- d'un outil de prototypage rapide alors encore en développement, *DecaDuino* [73], implémentant la couche physique UWB de l'IEEE, indépendant de toute couche MAC et dont nous maîtrisons complètement les sources puisqu'il avait été entièrement développé en interne. Nous souhaitons cependant en assurer la diffusion et la promotion, de manière à proposer un tel outil pour la communauté scientifique, alors que les *testbeds* publics ne proposaient pas encore l'usage de la PHY UWB.

Dans la continuité des travaux de la thèse de Mlle Réjane Dalcé et dans l'idée de parvenir à la fourniture d'un service de localisation tel que celui défini par le modèle ALO évoqué en section 2.1.2, nous avons donc proposé un second sujet de thèse dans cette thématique ; dans ce travail, nous souhaitons rester dans le domaine des protocoles de localisation *range-based* en temps de vol, mais en nous focalisant sur la question des protocoles (protocoles de *ranging*, protocoles de localisation).

La partie algorithmique de localisation à partir des données de *ranging*, telle que nous l'avons traitée dans la thèse de Mlle Réjane Dalcé, ne nous semblait pas prioritaire. De plus, nous souhaitons également quitter le contexte applicatif des réseaux de capteurs sans fil pour repositionner ce travail dans le contexte plus général du réseau de collecte de l'Internet des Objets (*Device-Layer of the Internet of Things*), tel qu'il a été défini dans le chapitre précédent. La partie algorithmique n'avait alors pas nécessairement la contrainte de l'économie en ressource CPU.

2.3.3.2 Axes de recherche et principales contributions

Afin de parvenir à une intégration du service de localisation dans l'empilement protocolaire aux côtés du service de transport de données, il fallait commencer par disposer de protocoles de *ranging* très peu contraints temporellement. Or, nous avons conclu, grâce aux travaux précédents, que d'une part les performances des protocoles de type TWR souffraient considérablement en cas de non-symétrie du protocole,

et, d'autre part, qu'avec l'augmentation des temps inter-messages, les effets de la dérive des horloges devenaient non négligeables et entachaient clairement les performances du protocole.

Cependant, les protocoles de type TWR continuaient de présenter un avantage considérable à nos yeux : ils ne nécessitent pas le maintien d'une synchronisation à la dizaine de picosecondes comme le demandent les protocoles de type TDoA. Non seulement une telle synchronisation est complexe à mettre en œuvre en l'absence de réseau filaire, mais en plus, dans un contexte embarqué contraint énergétiquement, le maintien de cette synchronisation est extrêmement coûteux en énergie, puisqu'elle nécessite le maintien en activité d'un *timer* à très haute fréquence (typiquement 64 GHz/30 mA sur l'architecture DecaWave) y compris lorsque le nœud est en veille. De plus, TWR ne présente aucune contrainte topologique ou hiérarchique, ce qui est favorable à une approche ad hoc, ce qui n'est pas le cas d'une approche par TDoA où, nécessairement, les nœuds de type *ancres* sont nécessairement alimentés par une source énergétique pas ou peu limitée. Enfin, TWR est simple sur le plan protocolaire, notamment dans sa version à deux messages (2M-TWR), ce qui laisse présager un possible passage à l'échelle, là encore si on se place dans un contexte ad hoc.

A ce stade, une problématique intéressante émergeait : afin de faciliter l'intégration des protocoles de *ranging* dans l'empilement protocolaire, une solution pouvait permettre l'intégration des messages de ces protocoles dans d'autres messages déjà véhiculés par le réseau. Considérons deux exemples :

1. sur un scénario classique à deux messages tel que DATA et ACK, serait-il possible d'encapsuler les deux messages START et ACK_REPLY de 2M-TWR ? Dans cette hypothèse, tout échange de données acquitté permettrait de réaliser du même coup un *ranging* entre les deux nœuds, sans transmission de message supplémentaire.
2. dans l'hypothèse d'une *Beacon-Only Period* telle que celle définie par Mlle Juan Lu (cf. 1.3.2), est ce qu'un protocole de *ranging* peut être encapsulé dans ces *beacons* ? Dans cette hypothèse, à chaque nouvelle période, tout nœud du réseau serait capable de maintenir une table de voisinage contenant la distance qui le sépare de chacun de ces voisins.

Dans les deux cas, nous sommes exactement dans le cas de la table de *ranging* proposée dans le modèle ALO ; il suffit donc d'alimenter en continu ou par événement, avec cette table, un algorithme de localisation tel que iRingLA et déduire une table des positions, pour chaque nœud du réseau.

Pour permettre la réalisation concrète de ces deux mises en situations, il faut que le protocole de *ranging* soit tolérant aux délais, les messages DATA et ACK et les *beacons* subiront alors les retards imposés par la couche MAC, comme un CSMA/CA ou un simple temps inter-trame pour DATA et ACK, ou un TDMA dans le cas des *beacons*.

La problématique principale de cette thèse était donc la suivante : quelles sont les contraintes à respecter pour enfouir les protocoles de *ranging de façon indolore* dans le trafic usuel du réseau ? Nous entendons par « *de façon indolore* », avec un coût protocolaire (*overhead*) négligeable, avec une empreinte protocolaire minimale, afin que cette intégration soit supportable, voire négligeable, sur le plan énergétique. Puisque les protocoles de *ranging* sont sensibles aux délais, quels sont les délais acceptables pour maintenir une précision de *ranging* acceptable ? Enfin, est-il possible de mettre en place un protocole de *ranging* uniquement basé sur des messages diffusés ?

Une première contribution de la thèse de M. Ibrahim Fofana a consisté à proposer un formalisme de notation des estampilles temporelles (*timestamps*) ; en effet, pour pouvoir envisager sereinement une proposition de protocole de *ranging* basé sur des messages diffusés, la notation habituelle (t_1 , t_2 , etc.) utilisée avec les protocoles de la famille TWR ne pouvait convenir. Pour les travaux à venir, les estampilles temporelles pouvaient être notées ainsi :

$$T_{dir\ src, dst}^{Nseq(src)} \quad (2.9)$$

avec :

- T : la valeur numérique de l'estampille temporelle elle-même (en secondes),
- dir : la direction de l'estampille marquée; T pour l'estampille d'un message émis (*transmit*) ou R pour l'estampille d'un message reçu (*receive*),
- src : l'adresse du nœud émetteur de ce message (*source*),
- dst : l'adresse du nœud récepteur de ce message (*destination*); si le message est diffusé, dst sera placé à la valeur *,
- $Nseq(src)$: le numéro de séquence (numéro de message) du présent message, géré par l'émetteur.

Afin de déterminer un temps de vol, il faut parvenir à faire correspondre une estampille de type T_R avec la bonne estampille T_T , c'est-à-dire celle qui correspond au même message. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de noter l'adresse du nœud émetteur, ainsi que numérotter les messages. L'adresse du nœud récepteur sera utilisée plus tard, pour la diffusion des estampilles.

La contribution la plus notable de la thèse de M. Ibrahim Fofana est la proposition, spécification et implémentation du protocole *Broadcast Based-Two-Way Ranging* (BB-TWR), qui permet l'évaluation de la distance entre nœuds voisins uniquement à partir de messages diffusés. Le principe de BB-TWR est le suivant :

1. chaque message reçu par le nœud n est estampillé par n pour former un T_R . Une fois l'adresse source src décodée et le numéro de séquence $Nseq(src)$ extrait du message, ces informations sont attachées à l'estampille pour former $T_R\ src, n^{Nseq(src)}$ et l'ensemble est mémorisé par n ,
2. chaque nœud m souhaitant diffuser un message anticipe l'instant d'émission T_T et place cette estampille dans le message en préparation, ainsi que le numéro de séquence $Nseq(m)$. Comme le message est diffusé, la destination dst est *. L'estampille $T_T\ m, *^{Nseq(m)}$ ainsi formée est mémorisée et sera envoyée dans ce message, ainsi que l'ensemble des estampilles T_R en mémoire car reçus précédemment,
3. à chaque message reçu, tout nœud peut effectuer une tentative de *ranging* par TWR : pour cela, il doit retrouver dans sa mémoire deux T_T et les deux T_R correspondants. Si ces quatre estampilles sont disponibles, il peut calculer le *ranging* sans diffusion de message supplémentaire.

Le diagramme de séquence de la figure 2.27 illustre une séquence de trois messages pour trois nœuds (topologie en triangle) et les neuf estampilles correspondantes (trois T_T , six T_R).

Concernant le nombre de messages, on notera que BB-TWR permet théoriquement le *ranging* de n nœuds avec seulement n messages. Plus précisément, à l'échelle d'un unique round, ceci est vrai pour le premier nœud seulement, qui est le seul, à la fin du round, à disposer de l'ensemble des estampilles pour calculer son *ranging* avec les $n - 1$ autres nœuds. Cependant, si on considère un autre round, l'ensemble des nœuds dispose alors de l'ensemble des estampilles; la seule condition est de ne pas stopper le *timer* entre deux rounds, ce qui exclue une mise en veille par exemple.

La figure 2.28 gauche représente le format général d'une estampille temporelle T ; c'est ce format qui est ensuite utilisé pour le stockage en mémoire et le transport dans les messages. En terme de contenu

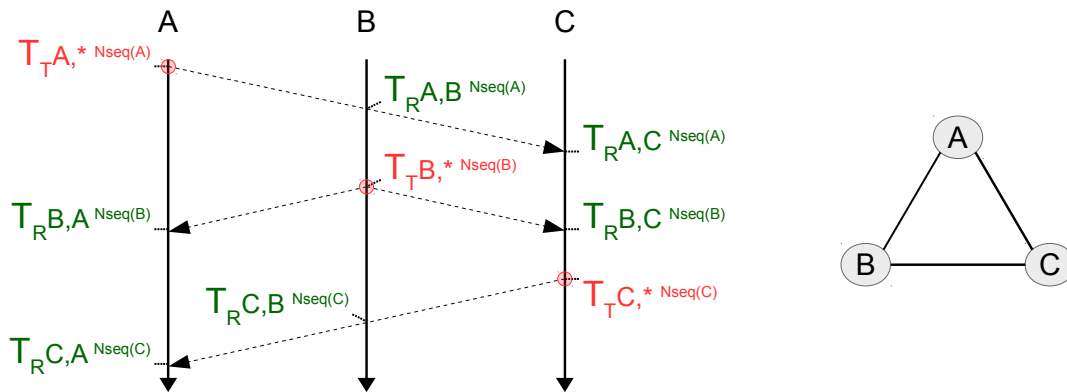


FIGURE 2.27 – Diagramme de séquence de BB-TWR à trois nœuds

de message, BB-TWR spécifie un seul message diffusé : `RANGING_BEACON`. Ce message contient l'estampille T_T correspondante à son émission, suivi d'une éventuelle liste de T_R . le format du message est représenté figure 2.28 droite. A noter qu'au cours de la thèse de M. Ibrahim Fofana, aucune stratégie de choix des T_R en mémoire n'avait été proposée. Le dernier T_R en mémoire, pour chaque voisin, était placé dans le message.

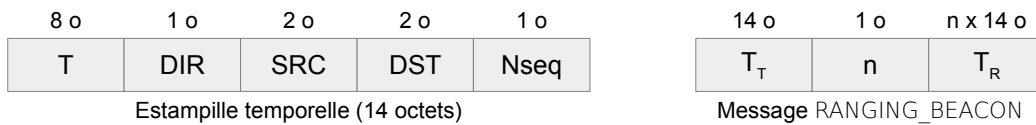


FIGURE 2.28 – Codage de l'estampille temporelle et format du message `RANGING_BEACON` de BB-TWR

Notons que le format de codage d'une estampille, sous 14 octets, n'est pas optimal, ce qui consomme inutilement de la mémoire et de la charge protocolaire. En effet, avec le matériel utilisé (DecaWiNo), le codage des *timestamps* est réalisé sur 40 bits. De plus, pour l'estampille d'émission, le champ `DST` est susceptible d'être optionnel (c'est le cas avec BB-TWR). De même, le champ `DIR` peut être codé sur 1 bit. Enfin, les champs d'adresses peuvent être implicites, par exemple si les adresses sont identiques à celles du message lui-même (adresses MAC). Par la suite, un nouveau format, plus optimal, a été proposé (figure 2.29) : il réduit la taille d'une estampille à 6, 8 ou 10 octets, en fonction de la présence ou non des champs d'adressage. Le numéro de séquence a également été réduit à 5 bits. Notons que ce format est générique et peut servir à tout protocole de *ranging*. Le format du message `RANGING_BEACON` reste inchangé.



FIGURE 2.29 – Codage optimal de l'estampille temporelle pour BB-TWR, voire tout autre protocole de *ranging*

Grâce à ce second format d'estampille, l'emprunte de BB-TWR est plus faible, dans la mesure où d'une part le champ `dst` est toujours implicite dans BB-TWR (le message ne porte que des estampilles générées par le nœud local) et d'autre part l'adresse source du message permet d'en déterminer l'émetteur pour le T_T . Le T_T ne porte pas d'adresse, et les T_R ne porte que l'adresse `src`. Soit L la charge protocolaire et n le nombre de voisins : l'équation 2.10 permet de déterminer la charge protocolaire en fonction du nombre d'estampilles T_R , c'est-à-dire du nombre de voisins. Pour 12 voisins, la charge est de 102 octets, ce qui reste raisonnable comme *payload* d'un *beacon* IEEE 802.15.4 par exemple.

$$L = 6 + n \times 8 \quad (2.10)$$

Sur 2M-TWR, dans un scénario DATA puis ACK, seul le message d'acquiescement porte un unique couple $\{T_T, T_R\}$, avec toutes les adresses implicites, en retour au nœud source, qui est à l'initiative du TWR. La charge est donc fixe et égale à 12 octets.

2.3.3.3 Résultats

Dans un premier temps, et avant de passer à BB-TWR et ses n nœuds, une nouvelle implémentation de 2M-TWR a été réalisée, après un patch de DecaDuino, où les calibrations des `ANTENNA_DELAY` ont été améliorées ; comme nous pouvons le constater sur la figure 2.30, l'erreur moyenne a été réduite et ne dépasse pas les 7 cm pour des distances comprises entre 50 cm et 5 m.

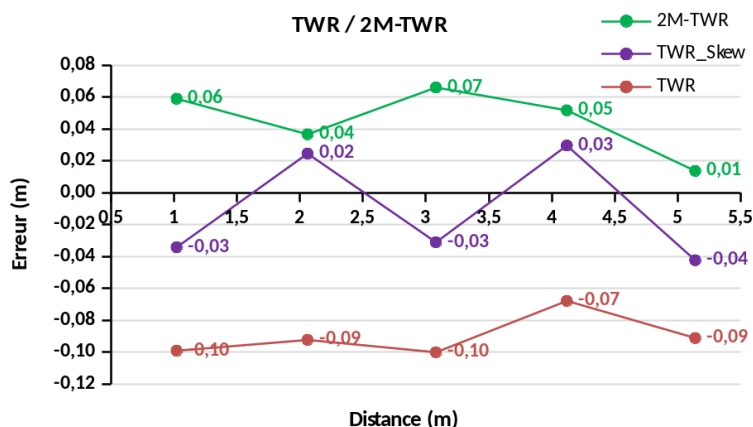


FIGURE 2.30 – Erreur de *ranging* avec TWR, TWR avec correction par le *skew* et 2M-TWR

Une implémentation de BB-TWR a ensuite été réalisée dans le cadre de la thèse de M. Ibrahim Fofana, avec l'aide de M. Farid Jammal son stagiaire. Les nœuds utilisés étaient les DecaWiNos, par utilisation du *framework* DecaDuino. Deux versions de BB-TWR ont été proposées ; une première version dite « séquencée », où les messages sont diffusés selon une méthode d'accès au médium de type TDMA, puis une seconde version dite « non-séquencée », où les messages sont envoyés avec un délai inter-message aléatoire.

Bien que les deux versions présentent chacune un intérêt vis-à-vis de situations réelles - la version séquencée pouvant être intégrée dans une *Beacon-Only Period* (cf. 1.3.2) alors que la version non-séquencée peut être intégrée dans n'importe quel protocole basé sur des *beacons* envoyés aléatoirement - la version

séquentée présente un intérêt majeur dans notre approche d'évaluation des performances des protocoles par *testbed*. En effet, dans la mesure où nous ne maîtrisons pas pleinement l'environnement physique et radioélectrique, il est fondamental, pour pouvoir analyser les performances du protocole, de réaliser l'étude dans des conditions les plus maîtrisées possibles. Le passage par un protocole de type TDMA est une bonne solution pour éviter tout risque de collision de trame ; ainsi, il est raisonnable de considérer que les messages perdus le seront par erreur de transmission.

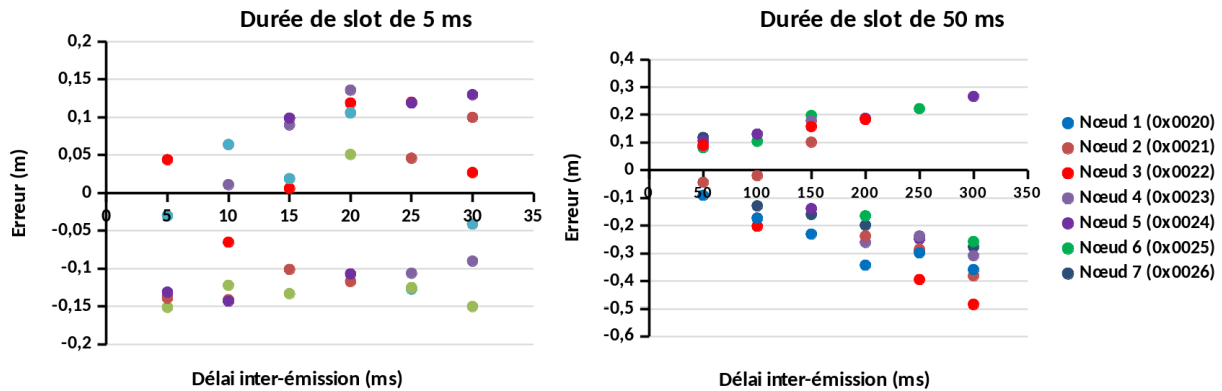


FIGURE 2.31 – Erreur de *ranging* avec BB-TWR en version séquentée, slots de 5ms et 50ms

Comme nous pouvons l'observer sur les résultats de la figure 2.31, la précision de *ranging* de BB-TWR dépend clairement de la durée entre deux messages diffusés. Si cette erreur de *ranging* reste inférieure à 15 cm pour des durées inférieures à 50 ms, on voit clairement une augmentation linéaire de cette erreur avec l'augmentation de la durée inter-message. À 300 ms, et sur cette expérience, l'erreur moyenne est de 26 cm et peut aller, dans les cas les plus défavorables, jusqu'à 50 cm. L'étude de la version non-séquentée (figure 2.32) permet de conclure de la même manière.

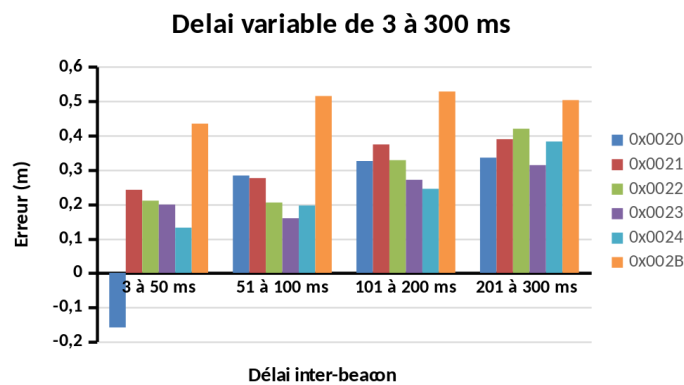


FIGURE 2.32 – Erreur de *ranging* avec BB-TWR en version non-séquentée

2.3.3.4 Conclusions et perspectives sur l'encadrement de l'activité de recherche

La première conclusion de cette activité de recherche est la réponse positive à la question : « *est-il possible d'intégrer des protocoles de ranging dans le trafic natif du réseau ?* ». Nous avons prouvé, par ce travail, que cette intégration est non seulement possible avec 2M-TWR dans un scénario point-à-point de type DATA-ACK, mais aussi, sous certaines conditions, dans un scénario impliquant une suite de messages diffusés comme une cascade de *beacons*. Dans ce dernier cas, la précision de *ranging* est intimement liée à l'intervalle inter-beacon : plus les *beacons* sont éloignés dans le temps, plus l'erreur augmente, y compris avec la correction basée sur la dérive, explicitée en §2.3.2.3.3. En complément de 2M-TWR, BB-TWR permet d'incorporer le trafic de *ranging* dans n'importe quel type de message de niveau MAC (*Unicast* de type DATA-ACK avec 2M-TWR ou *Broadcast* avec BB-TWR).

La seconde conclusion est que le coût protocolaire lié à cette possibilité est raisonnable : il n'est pas nécessaire de prévoir des messages supplémentaires, et seuls quelques octets doivent être ajoutés aux messages existants pour parvenir à évaluer la distance entre les nœuds. De plus, les deux processus de *rangings* proposés n'imposent aucune contrainte temporelle à ces messages, qui pourront être envoyés avec pour seules contraintes celles du protocole MAC utilisé.

Cependant, plusieurs problématiques demeurent ouvertes dans cette activité de recherche :

- D'abord, la question fondamentale de l'énergie devra être traitée. En effet, dans le cas de BB-TWR, il est impossible, dans l'état actuel du protocole, de prévoir une quelconque mise en sommeil des nœuds, y compris entre deux cycles sur la version séquentielle, car le protocole ne prévoit pas d'annonce explicite de la mise en veille du *timer* sur lequel se basent les estampilles. En effet, si le nœud est mis en veille, son *timer* est stoppé, ce qui rend obsolètes toutes les estampilles préalablement mémorisées. Sur le nœud local, ceci peut être réglé par un nettoyage complet de la table ; mais cette action doit également être faite sur les nœuds voisins, d'où l'annonce nécessaire et la modification du protocole qui en découle.
- La question de la perte de message devra être traitée avec la profondeur qu'elle mérite : en effet, si un message RANGING_BEACON est perdu, le T_R correspondant ne pourra être matérialisé par le récepteur et va manquer. Cependant, si d'autres estampilles, plus ancienne, ont pu être conservées dans la table, il peut être possible de calculer un temps de vol, mais de moins bonne qualité. Dans la mesure où nous avons clairement vu (figure 2.31) que l'erreur est proportionnelle à la durée entre deux messages, une telle valeur qualitative devrait être simple à évaluer. Cette information qualitative devrait être ajoutée au *ranging* ainsi calculé, comme paramètre supplémentaire pour un algorithme de localisation par exemple.
- Enfin, sans un algorithme de sélection des voisins annoncés, le protocole BB-TWR ne passe pas à l'échelle : actuellement, tous les voisins sont annoncés, ce qui, compte tenu du MTU de 128 octets défini par IEEE 802.15.4 [34], limite BB-TWR à 14 voisins (118 octets). Il conviendrait donc d'imaginer une stratégie de sélection des voisins à annoncer, ce qui n'est pas totalement trivial, dans la mesure où les voisins devront faire le choix identique, sous peine d'annoncer des T_R pour rien.

Au delà du sujet de la thèse de M. Ibrahim Fofana, la spécification de l'intégration des protocoles de *ranging* dans les protocoles existants doit également être pensée.

2.3.3.5 Publications marquantes

Conférence : Nezo Ibrahim Fofana, Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. Prototypage et analyse de performances d'un système de ranging pour une localisation par UWB. In *Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP), Paris, 22/07/2015-24/07/2015*, juillet 2015

Conférence : Nezo Ibrahim Fofana, Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. An Original Correction Method for Indoor Ultra Wide Band Ranging-based Localisation System. In *International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless (AdHoc-Now), Lille (France), 04/07/2016-06/07/2016*, juillet 2016

2.3.4 Synchronisation fine sur UWB

Co-encadrement de M. François Despaux, post-doctorant

« *Synchronisation fine sur UWB* »

Période : septembre 2015 - août 2016

Financement : projet Région/FEDER GUINNESS

2.3.4.1 Contexte des recherches menées

Suite à la thèse de Mlle Réjane Dalcé et son embauche chez Maple High Tech (MapleHT), nous avons été sollicité par l'entreprise pour déposer un projet de recherche sur la thématique des protocoles MAC sur UWB (appel FEDER/Région Midi-Pyrénées). MapleHT mettait alors au point une solution de localisation UWB *indoor* à destination du secteur agro-alimentaire, pour la surveillance de la chaîne du froid. Les capteurs mobiles devaient être localisés pour ajouter une information de position à la grandeur physique mesurée (comme la température) : nous sommes ici exactement dans le contexte *de la fourniture d'un service de localisation en parallèle* du service de transport de données.

MapleHT ayant une bonne expérience sur le *ranging*, notre contribution dans ce projet a consisté à proposer une méthode de synchronisation MAC extrêmement précise dans le contexte UWB, en vue de localiser précisément un capteur remontant une information physique, sans ajout de matériel dédié à la localisation.

2.3.4.2 Axes de recherche et principales contributions

L'énergie consommée par un système de *ranging* demeure l'un des aspects peu étudiés jusqu'ici dans nos travaux. Pourtant, cette problématique est identifiée comme majeure dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil. Comme nous l'avons largement évoqué jusqu'ici, pour minimiser l'énergie consommée par un nœud capteur, l'une des méthodes les plus répandues consiste à minimiser les périodes d'émission mais surtout de réception et d'écoute passive de messages ; dans la mesure où, avec les technologies utilisées, le circuit de réception exécute en continu un traitement du signal élaboré, celui-ci consomme une énergie importante même si aucun message n'est reçu.

De plus, nous avons vu jusqu'ici que les protocoles de *ranging* peuvent être largement corrigés en tenant compte de l'écart de fréquence des horloges des nœuds. Nous avons vu dans la section §2.3.2.3.4 que cette mesure est rendue possible par une fonctionnalité matérielle du *transceiver* DecaWave. Cependant, dans

l'objectif de permettre la généralisation de nos travaux en dehors de ce matériel, il serait intéressant de trouver un moyen d'obtenir les mêmes résultats sans utiliser cette fonctionnalité particulière du *hardware*.

La problématique de ce travail était donc la suivante : comment parvenir à mettre en place un protocole de synchronisation destiné à faire du *ranging* extrêmement économe en énergie, et, par rapport aux protocoles étudiés jusqu'ici, quels pouvaient être les ordres de grandeur de l'économie d'énergie d'un tel protocole. De plus, ce protocole peut-il faire l'objet d'une intégration complète dans les messages transmis par les nœuds capteurs à localiser ? Enfin, est ce que les mécanismes de correction d'horloge développés jusqu'ici peuvent être mis en œuvre sans utiliser la fonctionnalité matérielle propre au *transceiver* DecaWave ?

Dans le cadre applicatif de ce projet de recherche avec MapleHT, il était admis que le réseau de capteurs était pré-déployé dans son environnement opérationnel ; de manière très classique pour un WSN, l'infrastructure de ce réseau était constituée de nœuds fixes dont la position connue, leur permet d'être considérés comme des ancres (*anchors*), du point de vue du système de localisation. Nous désignerons par la suite ces nœuds par A_i . Cependant, à la différence des WSN classiques, ces ancres étaient reliées par un réseau filaire de type Ethernet pour la remontée des données vers des serveurs et application métiers : il n'y a donc pas de problématique de routage *mesh* ici, par exemple. De plus, il a été considéré que le réseau Ethernet ne devait pas servir à la synchronisation ; pour ce faire, c'est le réseau sans fil UWB qui devait être utilisé. La présence de ce réseau câblé fait que les ancres ne sont pas contraintes en énergie : seuls les nœuds mobiles à localiser (*tags*) le sont. C'est dans ce cadre que nous avons proposé le protocole de synchronisation *On-Demand Synchronisation Protocol for UWB-based WSNs* (ODS-UWB), qui a été implémenté et évalué sur le *testbed*. D'autres contributions ont également été proposées : Skew-Aware TWR, en amont d'ODS-UWB, qui permet de s'affranchir de la fonctionnalité du matériel, et N-TWR, ainsi qu'un algorithme de n -latération pour parvenir à une solution de localisation 2D complète et ainsi évaluer la précision de localisation obtenue grâce à notre proposition de synchronisation ODS-UWB. Ces contributions sont également détaillées dans les sections suivantes.

2.3.4.2.1 Skew-Aware TWR

Comme nous l'avons vu précédemment, avec le protocole TWR, les différences d'estampilles $t_4 - t_1$ et $t_3 - t_2$ ne sont pas exprimées dans la même base de temps, puisque ces *timestamps* sont produits respectivement par les nœuds A et B. Il est possible de corriger cet écart par la fonctionnalité matérielle du *transceiver* utilisé dans nos travaux, le DecaWave DW1000, qui fournit cette information à chaque réception de message. En amont de la proposition d'ODS-UWB, nous avons cherché à estimer cet écart sans utiliser la fonctionnalité matérielle du *transceiver*.

Pour ce faire, nous avons proposé une technique utilisant une méthode de régression linéaire. La figure (2.33a) rappelle la séquence du protocole TWR et les estampilles temporelles t_1 , t_2 , t_3 et t_4 . Si nous négligeons le temps de vol, alors nous pouvons considérer que t_2 et t_1 matérialisent le même instant (ainsi que t_3 et t_4), respectivement). Cette supposition est raisonnable pour des distances courtes étant donné que le temps de propagation est environ de 3 nanosecondes par mètre, tandis que les durées ($t_4 - t_1$) et ($t_3 - t_2$) sont supérieures à 300 microsecondes. De ce fait, il est possible d'estimer la différence des fréquences d'horloge, comme le représente la figure 2.33b, où la pente de la ligne représente le décalage de la fréquence des nœuds A et B. Avec une première itération de TWR, le nœud A obtient une estimation grossière de cette désynchronisation entre lui-même et le nœud B, par rapport à la ligne passant par les points (t_2, t_1) , et (t_3, t_4) . Des échanges de messages successifs permettront au nœud A d'estimer plus précisément ce skew au moyen d'une régression linéaire qui prendra en considération, non seulement le points courant (t_2, t_1) et (t_3, t_4) , mais aussi ceux calculés précédemment. Une étude comparative de TWR, TWR corrigé par la fonctionnalité matérielle et Skew-Aware TWR sera présenté dans la section Résultats

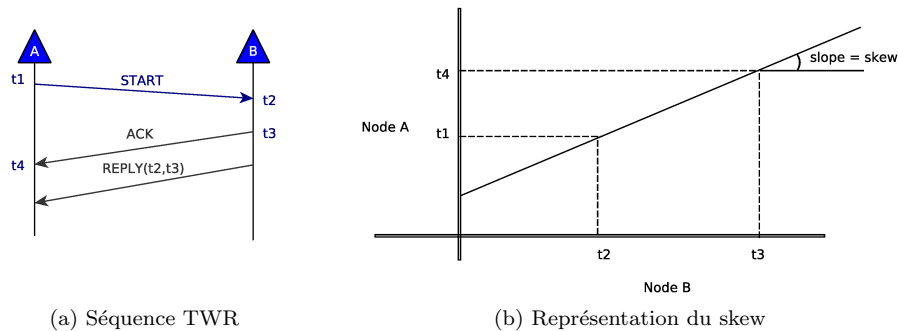


FIGURE 2.33 – Représentation du Skew-Aware TWR

de cette partie.

2.3.4.2.2 ODS-UWB

Dans la mesure où seul le mobile à localiser, le tag T , est contraint énergétiquement, le protocole doit être particulièrement efficace vis-à-vis de ce dernier et, par conséquent, minimiser les échanges de messages entre T et l'ensemble des ancres A_i . De plus, T est un nœud intégrant plusieurs capteurs physiques, en fonction de l'application déployée : dans le cadre du projet GUINNESS, MapleHT déployait un réseau de capteurs sans fil pour la surveillance de la chaîne de froid ; T était donc susceptible d'embarquer un capteur de température et d'humidité et donc, de remonter cette information physique par l'envoi d'un message. L'idée d'ODS-UWB est de profiter de ce message pour localiser du même coup le nœud pour ajouter une information de localisation aux grandeurs physiques mesurées.

ODS-UWB est un protocole de synchronisation de type *post-facto* [80], c'est-à-dire que la détermination de la synchronisation est réalisée *après* l'événement qui nécessite la synchronisation. Dans notre cas, la synchronisation doit permettre aux ancres de se coordonner pour déterminer la position de tag. Il ne s'agit pas simplement d'obtenir des *rangings*, mais aussi de synchroniser les accès au médium pour prévenir les collisions de trame.

L'objectif du protocole ODS-UWB est de parvenir à une synchronisation de l'ensemble de nœuds ancres A_i à portée pour localiser, à un instant donné, un tag T . Pour ce faire, nous considérons :

- à un instant donné, un unique tag T , qui est associé à une ancre particulière parmi les A_i , son *ancre de référence* notée A_R , par un processus de pré-association par exemple, qui ne sera pas détaillé ici, qui résulte d'une fonctionnalité développée par l'entreprise,
- un sous-ensemble d'ancres A_i à la fois dans la zone de portée de A_R et celle de T , mais pas nécessairement à portée les unes des autres. Là encore, on considérera que les domaines de portée ont été identifiés et remontés à T au préalable, dans la phase d'association développée par l'entreprise.

Voici la description de la séquence protocolaire du protocole ODS-UWB :

1. Lorsqu'un tag souhaite être localisé, il diffuse un message de synchronisation **START** contenant l'adresse de son ancre de référence A_R . Ce message est reçu par l'ensemble des ancres à portée

du tag, A_R comme le sous-ensemble des A_i . Toutes les ancrs à portée sont alors informées du commencement d'un nouveau round ODS-UWB. Il est à noter que le message **START** est transmis sans précaution particulière quant à l'accès au médium, en *broadcast* et donc, sans attendre d'acquiescement. Ces deux particularités font que l'emprunte énergétique d'ODS-UWB, côté tag, est *absolument minimaliste* : il est impossible de faire plus économe en énergie sur le round ; le nœud ne nécessite aucune écoute du médium, énergivore et préalable, pour se synchroniser, ni aucune fenêtre de réception après l'émission : le tag peut passer son temps en sommeil, sauf aux très rares instants où il diffuse ce court message radio. Cependant, cette absence de méthode d'accès au médium est non-fiable et peut engendrer des collisions de trames,

2. Lorsqu'une ancre reçoit le message **START**, elle estampille l'heure d'arrivée du message selon son horloge locale, que nous noterons respectivement t_1^R pour l'ancre de référence et t_1^i pour une ancre A_i .
3. Après avoir reçu **START**, A_R diffuse un message **REQUEST** dont elle mémorise l'estampille d'émission t_2^R . A leur tour, les A_i estampillent leur réception de **REQUEST** par l'instant que nous noterons t_2^i . **REQUEST** contient la liste des ancrs A_i que A_R a enrôlé pour ce round de synchronisation.
4. Chaque A_i répond en décalé par sa trame **RESPONSE** portant les estampilles mémorisées t_1^i et t_2^i , ainsi que l'estampille d'émission t_3^i . Chaque message **RESPONSE** est estampillé t_4^i par A_R . Afin d'éviter les collisions entre les messages **RESPONSE**, le décalage est provoqué par un retard d_i , entre l'arrivée de **REQUEST** et **RESPONSE**. Ce retard est différent pour chaque A_i enrôlée et précisé par A_R dans **REQUEST**.

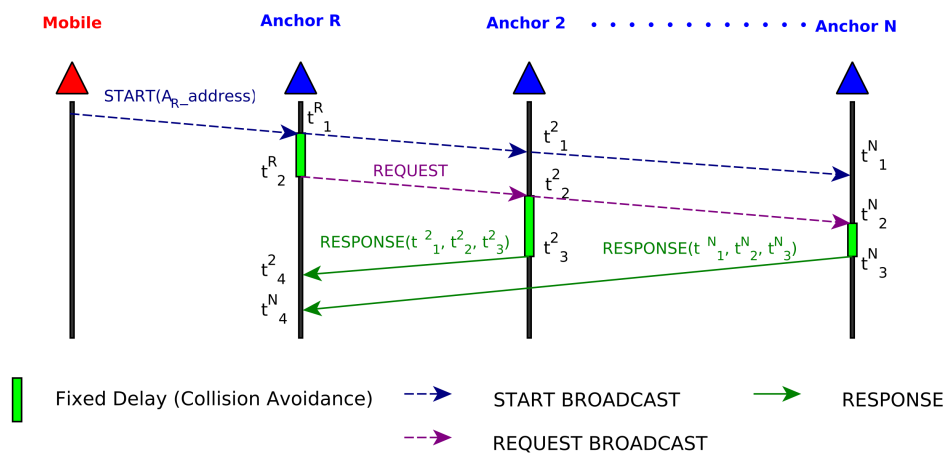


FIGURE 2.34 – Diagramme de séquence du protocole ODS-UWB

Le diagramme de séquence du protocole ODS-UWB est représenté par la figure 2.34. Après avoir reçu l'ensemble des messages **RESPONSE** des ancres A_i enrôlées, A_R dispose donc des informations suivantes :

- t_1^R : instant d'arrivée de **START** à A_R ,
- t_1^i : instant d'arrivée de **START** pour chaque A_i ,
- t_2^R : instant de départ de **REQUEST** à A_R ,

- t_2^i : instant d'arrivée de REQUEST pour chaque A_i ,
- t_3^i : instant de départ de RESPONSE pour chaque A_i ,
- t_4^i : instant d'arrivée de RESPONSE pour chaque A_i à l'ancre de référence,

Avec ces informations, l'ancre de référence est en mesure de calculer le temps de vol $ToF_{R,i}$ entre lui-même et chaque ancre A_i au moyen de l'équation classique 2.11, où $k_{R,i}$ est la différence de fréquence des horloges locales de A_R et A_i .

$$ToF_{R,i} = \frac{t_4^i - t_2^R - k_{R,i}(t_3^i - t_2^i)}{2} \quad (2.11)$$

En outre, les informations concernant les horodatages permettront à A_R de mettre à jour les différences de fréquences d'horloges $k_{R,i}$ entre lui-même et chaque ancre A_i . Calculer $ToF_{R,i}$ va permettre à A_R de connaître l'instant local d'arrivée de REQUEST à chaque A_i dans sa propre horloge. En d'autres termes, ces informations donnent à A_R un point $(x, y) = (t_2^R + ToF_{R,i}, t_2^i)$. Ce point, ainsi que la différence de fréquence d'horloges (pente de la courbe), permettra à A_R de trouver la droite représentant la relation entre les horloges comme le montre la figure 2.35.

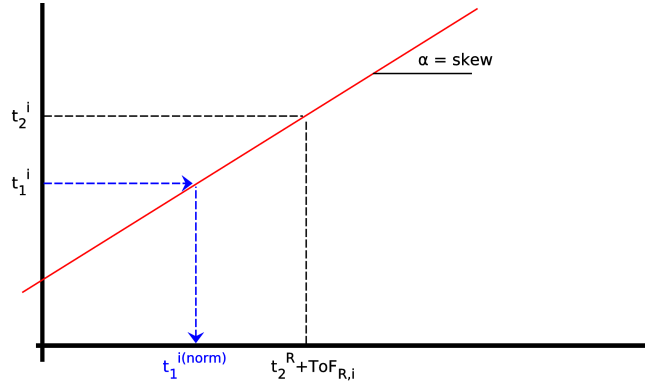


FIGURE 2.35 – Méthode de normalisation des estampillages temporelles de ODS-UWB

En effet, compte tenu du fait que :

$$k_{R,i} = \tan \alpha = \frac{\textit{opposite_side}}{\textit{adjacent_side}} \quad (2.12)$$

les valeurs de t_1^i , t_2^i , $t_2^R + ToF_{R,i}$, ainsi que la valeur normalisée de t_1^i que nous cherchons ($t_1^{i(norm)}$), vont nous donner :

$$\tan \alpha = k_{R,i} = \frac{t_2^i - t_1^i}{(t_2^R + ToF_{R,i}) - t_1^{i(norm)}} \quad (2.13)$$

Par conséquent, la valeur normalisée de $t_1^{i(norm)}$ peut être calculée comme suit :

$$t_1^{i(norm)} = t_2^R + ToF_{R,i} - \frac{t_2^i - t_1^i}{k_{R,i}} \quad (2.14)$$

Grâce à ce traitement, nous pouvons déterminer la valeur de chaque estampille temporelle *du point de vue de l'horloge de A_R* . Le principe de cette normalisation $t_1^i \rightarrow t_1^{i(norm)}$, appliquée pour chaque estampille et pour chaque ancre A_i enrôlée, permet de ramener toute estampille temporelle dans la base d' A_R , sans solliciter le tag T et, par la même, minimiser totalement sa consommation énergétique. A partir de là, on se retrouve en présence du cas classique de TDoA. Il est alors facile, par un algorithme de localisation classique de connaître la position du tag. Quelques résultats de l'analyse de performances d'ODS-UWB sont donnés dans la section 2.3.4.3. L'ensemble est disponible dans le document [81].

2.3.4.2.3 N-TWR

Parallèlement à la spécification du protocole ODS-UWB, nous avons proposé un nouveau protocole de *ranging*, désigné par N-TWR, et un algorithme de n -latération associé. Notre objectif était de ne pas focaliser uniquement nos travaux sur une version de type TDoA, mais aussi de type TWR.

La figure 2.36 présente le diagramme de séquence du protocole N-TWR, qui comporte deux types de messages : **START**, qui est diffusé par le nœud souhaitant se localiser, et **ACK**, en réponse, émis par chaque ancre. N-TWR peut être considéré comme une version à deux messages de PDS-TWR présenté en section 2.3.1.2.1. N-TWR est donc un protocole de *ranging* multiple entre n nœuds (1 tag et $n - 1$ ancres) nécessitant l'envoi et la réception de n trames uniquement, ce qui est aussi réduit que BB-TWR, sauf qu'ici, le *ranging* est uniquement obtenu entre le nœud mobile et les ancres.

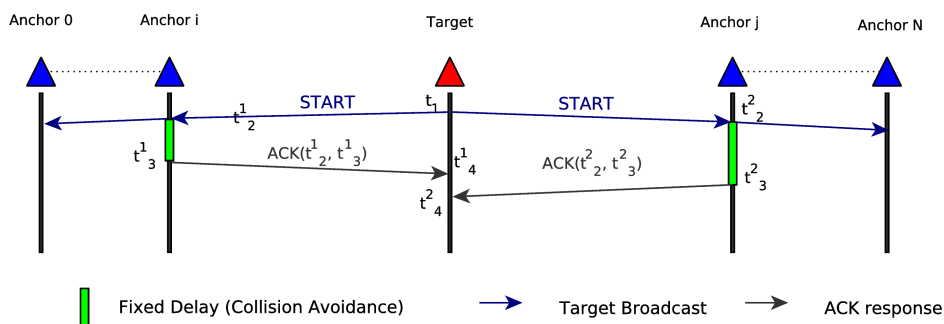


FIGURE 2.36 – Diagramme de séquence du protocole N-TWR

2.3.4.3 Résultats

Dans cette section, nous détaillons les résultats les plus significatifs de cette activité de recherche. Pour les résultats complets, se référer à [81] ou [82].

Dans un premier temps, nous avons cherché à évaluer la précision de l'évaluation de différence de fréquences d'horloge par la régression linéaire (LR) en la comparant avec une version non corrigée de TWR, puis TWR corrigé par la fonctionnalité matérielle (DW skew) de DecaWave. Plusieurs expériences ont été conduites, en faisant varier la distance entre les nœuds. La figure 2.37 représente les résultats obtenus ; comme nous pouvons le voir, la correction par régression linéaire permet d'atteindre des performances aussi nettes qu'avec la fonctionnalité matérielle du *transceiver*.

Dans un second temps, nous présentons les expérimentations et les résultats concernant le protocole ODS-UWB. La figure 2.38 présente les quatre scénarios prévus pour évaluer le protocole de synchronisa-

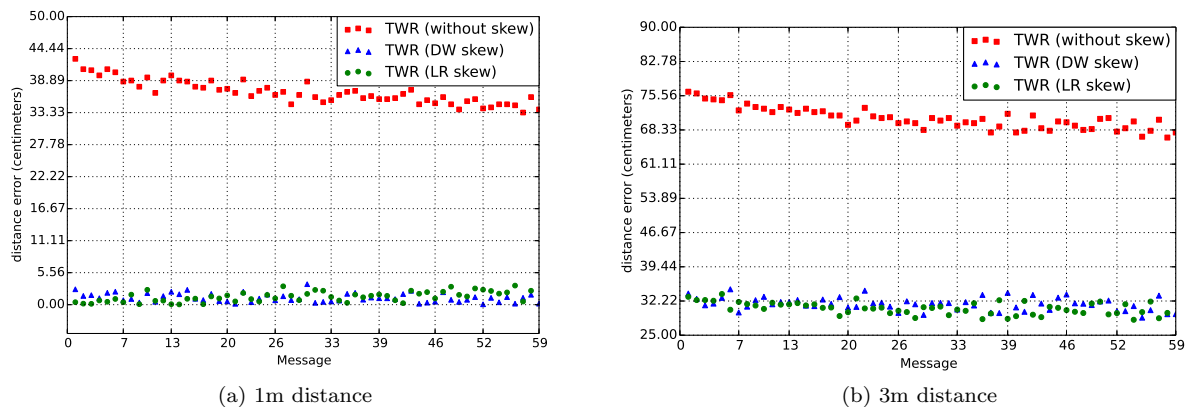


FIGURE 2.37 – Précision de l'évaluation de différence de fréquences d'horloge avec Skew-Aware TWR

tion. Dans tous les cas, les nœuds ont été placés en ligne pour minimiser l'impact des antennes non-alignées. Nous avons en effet mis en évidence l'influence de la rotation des antennes par une étude en chambre anacoïque et table tournante présentée dans [82]. Dans ces scénarios, le nœud T est situé à 1 mètre de A_R et la distance entre A_R et A_1 ($d_{1,R}$) est également d'un mètre. En revanche, la distance entre T et l'ancre A_2 ($d_{T,R}$) varie en fonction du scénario, comme l'on peut voir dans la figure 2.38.

Une fois le message **START** reçu par A_R , et étant donné la vitesse de propagation connue, A_R est en mesure de calculer l'instant de départ des messages **START**. Comme A_R connaît aussi les distances entre la cible T et les ancres A_i (dans le cas de cette expérience en laboratoire), A_R est en mesure d'estimer l'instant d'arrivée théorique $t_1^{i(theo)}$ du **START** à chaque ancre A_i . Après avoir reçu le message de réponse de chacune des ancres, il est aussi capable de calculer $t_1^{i(norm)}$ au moyen de l'approche présentée plus haut. Enfin, $t_1^{i(theo)}$ et $t_1^{i(norm)}$ sont comparés par rapport à l'erreur de synchronisation. Le retard d entre l'arrivée de **REQUEST** et le départ de **RESPONSE** a été fixé à 500 microsecondes. Le temps d'exécution total du test a été fixé à 60 secondes. La synchronisation *post-facto* est calculée, $t_1^{i(theo)}$ est estimée puis comparée à $t_1^{i(norm)}$ obtenue. L'erreur de synchronisation, c'est-à-dire la différence entre $t_1^{i(norm)}$ et $t_1^{i(theo)}$ pour chacun des messages échangés, est représentée par la figure 2.39. Nous pouvons observer que, pour chaque scénario, le protocole permet d'obtenir des erreurs moyennes de synchronisation comprises entre 0.058 ps et 281 ps. Utilisées en *ranging*, ces erreurs de synchronisation permettraient d'aboutir à une erreur maximale de 79 mm, pour un coût énergétique réduit à sa plus stricte valeur côté tag.

Scenario	Error (cm)	Standard Deviation (cm)	Best Distance (cm)	Worst Distance (cm)
Scenario 1	10.32	1.77	6.08	16.47
Scenario 2	21.33	1.69	16.32	26.58

TABLE 2.2 – Moyenne des erreurs entre les positions réelles et estimées

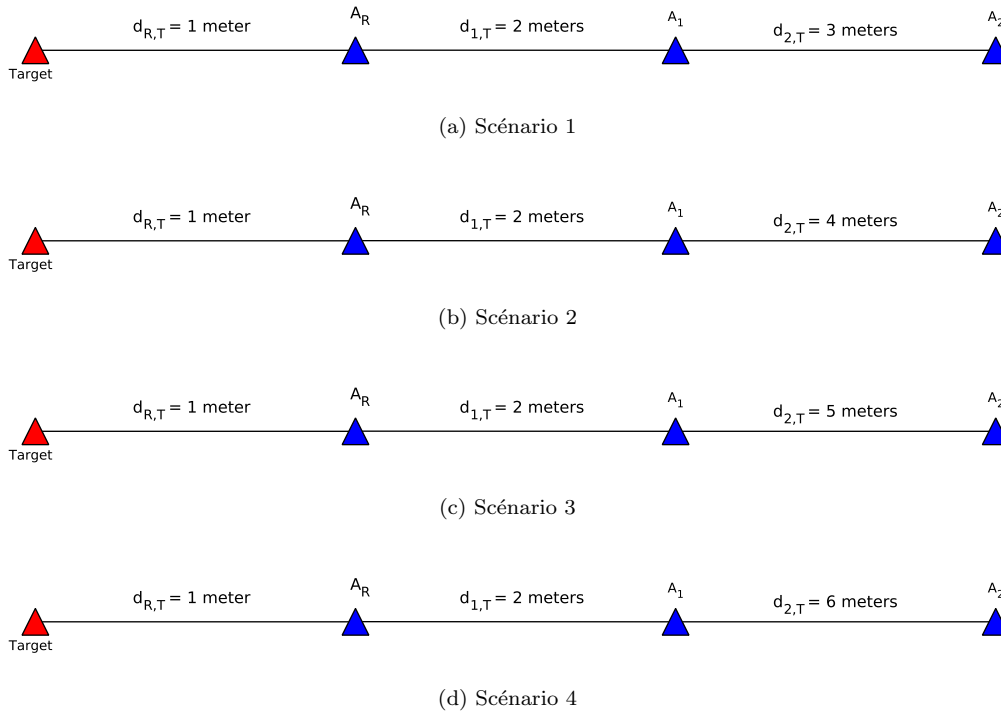
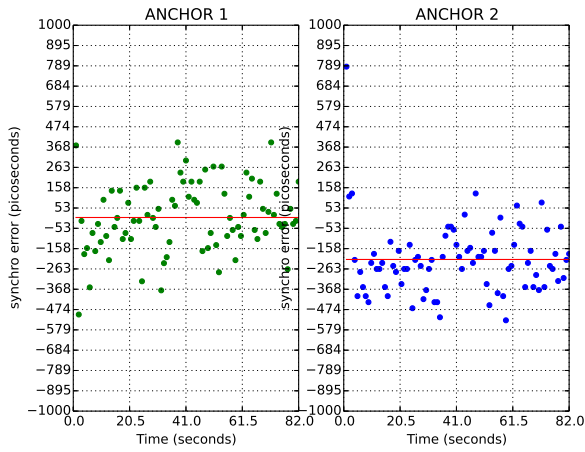


FIGURE 2.38 – Placement des nœuds utilisés pour évaluer l’erreur de synchronisation avec ODS-UWB

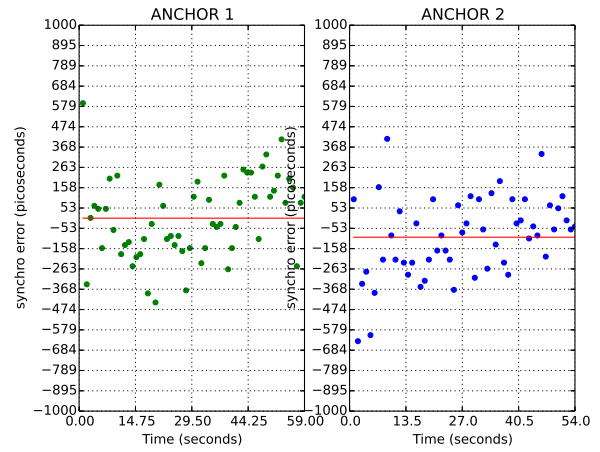
Enfin, nous avons cherché à évaluer les performances du protocole N-TWR sur le *testbed* sur deux scénarios de déploiements représentés par la figure 2.40. Les résultats sont indiqués dans le tableau 2.2. Comme nous pouvons le constater, les performances de N-TWR sont proches de celles obtenues avec BB-TWR et 2M-TWR présentés précédemment. Ces résultats ont été injectés dans un algorithme de localisation 2D proposé en marge du projet GUINNESS ; celui-ci consiste assez classiquement à considérer des cercles ayant pour centre les coordonnées de chaque ancre et en pour rayon le *ranging* mesuré ; cependant, avec cet algorithme, le problème de la non-unicité du croisement des cercles est solutionné en considérant une série de k rayons pour chaque cercle, afin de déterminer l’ensemble des intersections puis d’en calculer le barycentre. L’algorithme complet est décrit dans [81]. Avec N-TWR et 3 ancres, une précision de localisation 2D de l’ordre de 20 cm a été constatée sur le *testbed*. La figure 2.41 représente les résultats de la localisation 2D dans les scénarios 1 et 2 représentés en figure 2.40, pour de multiples *rangings* pratiqués. Sur cette figure, les pavés sont carrés et de 33,3 cm de côté ; l’erreur de localisation 2D ne dépasse pas les 20 cm sur ces deux expérimentations.

2.3.4.4 Conclusions et perspectives sur l’encadrement de l’activité de recherche

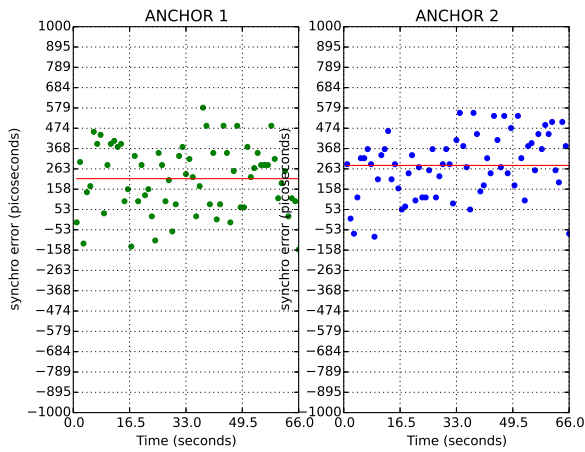
Par l’excellent travail de M. François Despaux dans le cadre de son post-doctorat, les contributions dans le cadre du projet GUINNESS ont été riches et de qualité. La correction basée sur la différence des fréquences d’horloges des nœuds en *ranging*, évoquée depuis le post-doctorat de Mlle Réjane Dalcé, a pu être mise en œuvre sans se baser sur la fonctionnalité matérielle du *transceiver*, ce qui la rend portable sur tout matériel. Le protocole de synchronisation ODS-UWB a été proposé, spécifié, implémenté et évalué sur *testbed* réel ; il permet une synchronisation en centaines de picosecondes, ce qui le rend utilisable pour du



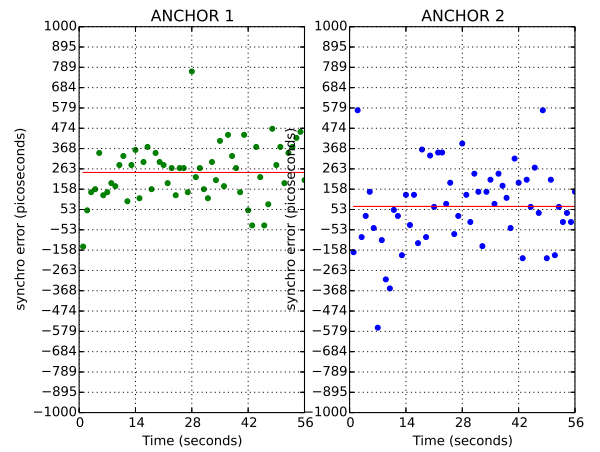
(a) Scénario 1



(b) Scénario 2



(c) Scénario 3



(d) Scénario 4

FIGURE 2.39 – Erreur de synchronisation obtenue avec ODS-UWB

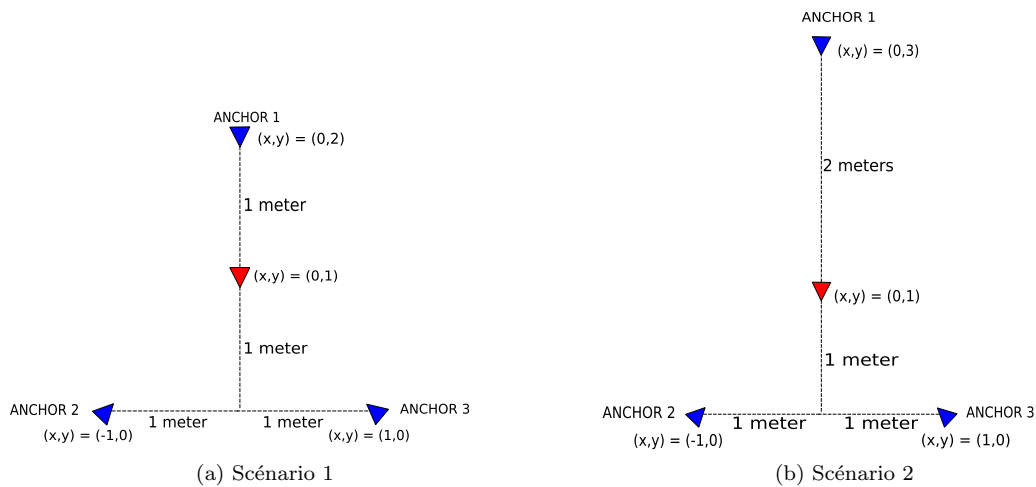


FIGURE 2.40 – Scénarios de test pour N-TWR

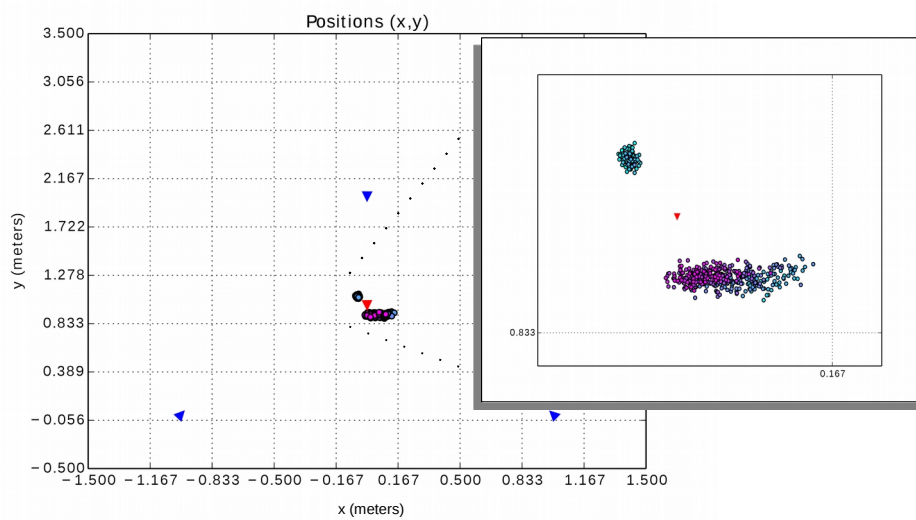
ranging, tout en présentant des caractéristiques énergétiques optimales pour le tag, puisque son activité se limite à l'émission d'un unique message sans n'avoir à ouvrir aucune fenêtre de réception. ODS-UWB a fait l'objet d'un brevet international dont nous sommes l'un des co-auteurs [83]. Un autre protocole de *ranging*, N-TWR, avec son algorithme de localisation associé a pu être proposé. Il permet d'atteindre une précision de localisation de l'ordre de 20 cm en 2D en LOS *indoor*. Enfin, cela a été présenté dans le chapitre 1 (cf. §1.3.3.2.3), la convergence du protocole SiSP a été démontrée et une amélioration, baptisée *PulseSiSP* a été proposée, implémentée et testée via WiNo/DecaDuino. Elle a permis d'obtenir une synchronisation MAC de grande précision avec un passage à l'échelle possible.

En terme de perspectives, il serait tout d'abord intéressant d'étudier le passage à l'échelle d'ODS-UWB, compte-tenu de l'absence de protocole MAC, tant au niveau du tag que des ancres A_i . Une autre perspective consiste à étudier l'impact des obstacles sur la qualité de la synchronisation en situation de NLOS. Il est certain que celle-ci sera dégradée : il conviendra donc de proposer des mécanismes permettant de la rendre plus robuste en de pareilles situations, ou, a minima, de permettre la détection de cette situation pour en tenir compte. Une dernière perspective consisterait à évaluer plus largement la solution complète N-TWR + algorithme de localisation. Ce travail étant mené en marge du projet avec l'entreprise MapleHT, il n'a pas été totalement terminé. Avec la généralisation du *testbed* Ophelia aux nœuds DecaWiNo, ce travail devient tout à fait envisageable.

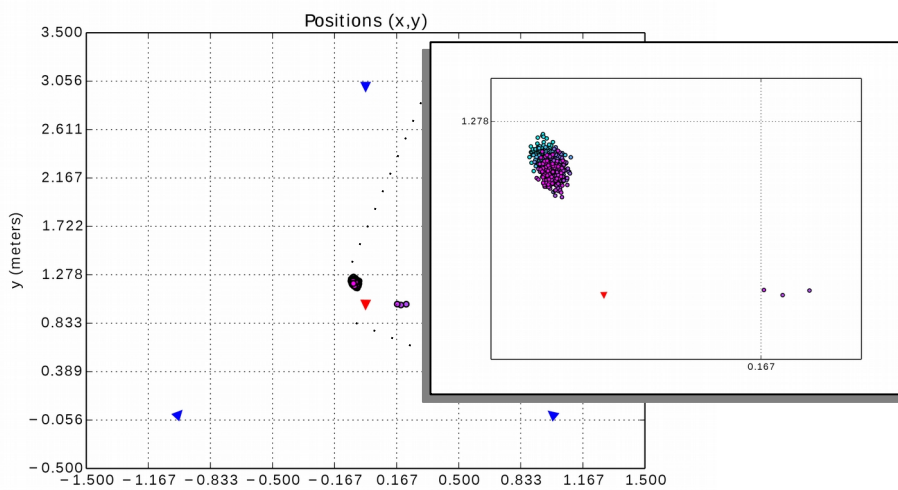
En terme d'ingénierie et de diffusion d'outils, une implémentation de l'algorithme de localisation sera diffusée sous licence *open source*.

2.3.4.5 Publications marquantes

Conférence : François Despaux Rossi, Katia Jaffres-Runser, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Accurate and Platform-agnostic Time-of-flight Estimation in Ultra-Wide Band. In *IEEE International Conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Valencia, Spain, 04/09/2016-07/09/2016, septembre 2016



(a) Scénario 1



(b) Scénario 2

FIGURE 2.41 – Localisation 2D avec N-TWR

Brevet : Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, François Despaux, Katia Jaffres-Runser, Ludovic Tancerel, and Thierry Val. Méthode de synchronisation de noeuds dans un réseau de capteurs sans fil. Diffusion scientifique, juin 2017

Conférence : Oana Andreea Hotescu, Katia Jaffres-Runser, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Synchronizing Tiny Sensors with SISP: a Convergence Study. In *ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Miami Beach, USA, 21/11/2017-25/11/2017*, novembre 2017

Revue : François Despaux, Adrien Van den Bossche, Katia Jaffres-Runser, and Thierry Val. N-TWR: An Accurate Time-of-flight-based N-ary Ranging Protocol for Ultra-Wide Band. En navette 2017

2.4 Conclusion et perspectives

Les travaux de recherche que nous avons présentés dans ce second chapitre sont centrés sur l'auto-localisation des nœuds communicants sans fil par l'usage de fonctions issues du système de communication. L'objectif ici est de proposer des mécanismes visant à localiser ou aider à localiser les nœuds de façon collaborative et le plus *indolore* possible, c'est-à-dire en minimisant l'impact de cette localisation en termes d'*overhead* et de consommation énergétique pour le nœud. Nous avons débuté ce chapitre par la proposition du modèle ALO (*Abstracted Localisation Object*) qui vise à introduire ces fonctions d'auto-localisation dans l'empilement protocolaire, à côté des couches réseaux classiques. Après compilation des informations fournies par chaque couche protocolaire, si une solution (position 2D ou 3D) est trouvée, chaque protocole peut bénéficier de cette information pour renforcer sa robustesse ou proposer un service optimal (optimisation des *ACK-timeout* à la couche MAC, routage géographique à la couche NWK, service de positionnement à la couche APL, etc.). Pour ce faire, nous avons dirigé plusieurs activités de recherche sur les couches basses des protocoles de *ranging*, c'est-à-dire les protocoles permettant d'obtenir la distance qui séparent des nœuds à un saut. Nous avons ainsi proposé plusieurs protocoles, qui ont systématiquement fait l'objet d'une description complète (objets échangés, séquences de messages et algorithmes associés) suivis d'une évaluation de performances en environnement réel. Nous avons également proposé plusieurs outils de prototypage rapide pour ces protocoles. Après huit années de travail sur le sujet, nos travaux fournissent les outils protocolaires et algorithmiques permettant d'envisager ce *service de localisation* ; ces travaux, validés et évalués sur *testbed* et en déploiement réel, parviennent à une précision de la dizaine de centimètres en *ranging* et une vingtaine de centimètres en 2D en situation LOS, c'est-à-dire sans obstacles. Ce service n'est pas encore pleinement spécifié, dans le sens où les primitives des points d'accès de service (*Services Access Point*, SAP) par exemple, n'ont pas été décrites. Cependant, ces travaux peuvent servir de fondation à la spécification de ce service.

Les protocoles proposés reposent tous sur la mesure du temps de vol du signal radio. Nous avons proposé différents protocoles permettant l'évaluation de ce temps, en cherchant :

- à **optimiser la mesure du ToF en luttant contre les phénomènes de dérive des horloges**, notamment en vue de rendre ces protocoles **indépendants de toute contrainte temporelle**. Nous avons observé qu'en l'état actuel de la technologie et avec des *transceivers* accessibles et intégrables dans des nœuds WSN, la précision de *ranging* reste en moyenne inférieure à 10 cm jusqu'à une durée inter-message de 50 ms, voire inférieure à 30 cm sur 300 ms, ce qui est largement supérieur aux délais d'une couche MAC dans le contexte WSN IEEE 802.15.4a UWB, de l'ordre de la centaine de microsecondes à la milliseconde,
- à **minimiser le nombre de messages échangés** en vue de réduire la consommation énergétique

induite par ces protocoles. Nous avons proposé le protocole 2M-TWR réduit à deux messages pour les scénarios en point-à-point, PDS-TWR et N-TWR mêlant un nombre réduit de messages *unicast* et *broadcast* pour les scénarios point-à-multipoint, BB-TWR, avec un unique message par voisin pour les scénarios totalement en diffusion, et enfin ODS-UWB avec un unique message émis et aucune réception par le nœud extrêmement contraint en énergie, suivi de plusieurs messages par l'infrastructure.

- une fois libérés temporellement et leur empreinte minimisée, à **intégrer ces protocoles dans les messages préexistants et déjà échangés par le réseau**, là encore pour ne pas provoquer l'échange de message supplémentaires et, au contraire, dans une approche opportuniste, localiser en profitant de messages déjà échangés.

Bénéficiant depuis de nombreuses années (dont les premières sous NDA) d'un *transceiver* UWB aux fonctionnalités matérielles avancées, mais pas nécessairement répandues sur l'ensemble des *hardwares* UWB à venir, nous avons cherché à contourner ces fonctions avancées dans un objectif *agnostique* : nous y sommes parvenus pour la fonction d'évaluation des différences d'horloges entre nœuds, qui est la base de nos travaux sur la correction de la dérive des horloges.

Les perspectives de ces travaux sont cependant nombreuses : tout d'abord, tous les résultats évoqués dans ce chapitre sont obtenus dans le cadre de liens à *vue* (LOS). Pourtant, les liens comportant des obstacles (NLOS) sont inévitables dans un déploiement réel. Ils sont d'ailleurs largement étudiés [72] par la communauté signal. L'une de nos premières perspectives à court terme consiste à s'intéresser à la problématique des liens NLOS, mais dans notre champ disciplinaire, au niveau protocolaire : les *transceivers* UWB sont capables de remonter une information quantitative quant au caractère LOS/NLOS du lien à chaque message reçu. Il s'agirait dans cette perspective de profiter de cette information pour, par exemple, sélectionner prioritairement des voisins à *ranger* plutôt que d'autres, par exemple dans le cadre du protocole BB-TWR. Un intérêt applicatif peut aussi être identifié à partir de cette information NLOS, pour déduire des informations sur l'environnement des nœuds mobiles à localiser.

Une autre perspective concerne la correction de l'erreur de *ranging* à cause de l'erreur induite par la imprécision de l'horloge utilisée pour l'estampille temporelle des messages à l'émission (T_T) comme à la réception (T_R). En effet, dans tous nos travaux, nous avons considéré la non-égalité des fréquences d'horloge des deux nœuds, mais en corrigeant systématiquement l'une des deux par un *asservissement sur l'autre nœud*, c'est-à-dire en corrigeant sa propre base temporelle pour la ramener dans la base temporelle du voisin. Bien que cette solution soit très performante - notamment lorsque le délai inter-message augmente, nous l'avons vu dans les résultats de ce chapitre - il est possible que l'erreur résiduelle actuellement constatée soit en partie causée par ce choix ; nous pourrions peut-être parvenir à de meilleurs résultats en considérant que les deux horloges sont erronées et devraient toutes deux faire l'objet d'une correction *individuelle*. Cette perspective est actuellement étudiée dans le cadre du projet *Virtual Reference-Aware Synchronization* (ViRAS).

En terme d'outils, si le tandem DecaDuino/DecaWiNo a montré sa puissance dans le prototypage rapide de protocoles de *ranging*, la mise en oeuvre de ces protocoles sur *testbed*, notamment dans la phase de déploiement pour l'évaluation des performances, demeure complexe. Le rapprochement avec les travaux réalisés dans le cadre du projet Ophelia (cf. §1.3.5.2.4) permettant le déploiement simple de *testbeds* mettant l'accent sur la reproductibilité des expériences serait un large bénéfice pour l'évaluation de nos travaux sur la localisation. Ceci sera rendu possible à la fin du projet Ophelia, avec la généralisation du *testbed* à tous les nœuds de la famille WiNo.

Enfin, et pour être complet sur la démarche de modélisation ALO, une spécification du *service de localisation* et de son intégration dans l'empilement protocolaire s'impose ; les points d'accès de service (SAP) et leurs primitives devront être spécifiés, de même que les points d'entrées entre l'objet ALO et

les couches protocolaires. Ce travail demeure original dans la communauté Réseaux et Protocoles, et la publication des contributions n'est pas simple ; un travail de fond est nécessaire pour populariser notre approche auprès de la communauté scientifique. Si ce travail débouche sur des résultats intéressants, il pourrait faire l'objet d'une standardisation.

Chapitre 3

Application des Réseaux de Capteurs à l’Habitat Intelligent

Dans ce chapitre, nous mentionnons nos travaux menés en lien avec la plate-forme Maison Intelligente de Blagnac sur laquelle nous avons été impliqué depuis sa création. Au départ à la manière d’une « charge collective », ces travaux se sont rapidement révélés très riches sur le plan scientifique, notamment grâce aux aspects transdisciplinaires des projets en lien avec la plate-forme.

Sommaire

3.1	Cadre général des travaux menés	116
3.2	Synthèse des directions, projets et encadrements	118
3.2.1	Projets	118
3.2.2	Encadrements	119
3.2.3	Publications	119
3.3	Détail des travaux	120
3.3.1	Déploiement d’ADCF à la MIB	120
3.3.2	SUIPAD	121
3.3.3	ECAMI	122
3.3.4	SENUM/OVIPAD	125
3.3.5	De la Maison Intelligente vers le <i>True Life Lab</i>	128
3.4	Conclusion et perspectives	131

3.1 Cadre général des travaux menés

Les travaux présentés dans ce chapitre sont des travaux en lien avec la plate-forme *Maison Intelligente de Blagnac* (MIB) sur laquelle nous avons été impliqué depuis sa création en 2011. La MIB est une plate-forme d’observation des usages des technologies d’assistance pour le maintien à domicile des personnes âgées et des personnes présentant un handicap [85] [86]. Elle permet la mise à disposition d’un environnement d’étude pour réaliser des tests d’usage en environnement contrôlé [87].

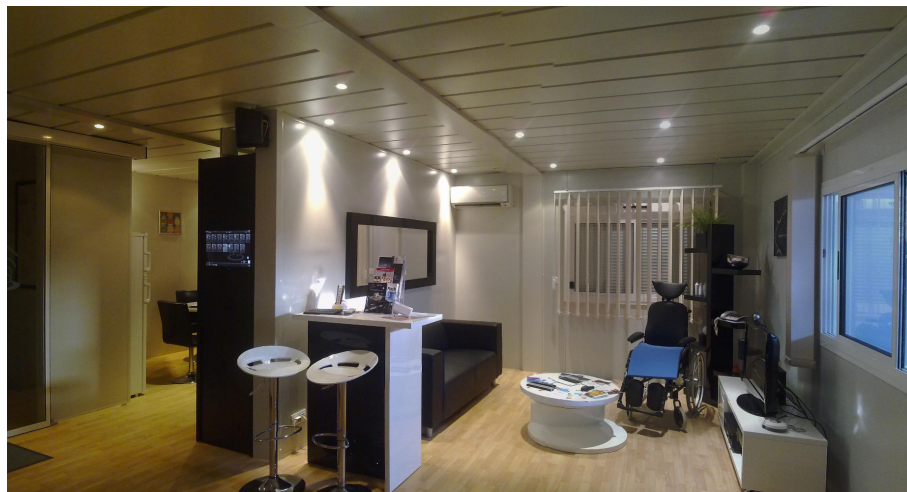


FIGURE 3.1 – Intérieur de la Maison Intelligente de Blagnac

La MIB se présente comme un appartement fonctionnel de 80m², incluant cuisine, salon, chambre, salle de bain et sanitaires (figure 3.1); accolée à l’appartement, une salle de réunion, utilisée également comme salle d’observation, permet de visualiser les activités des habitants (figure 3.2). Sur le plan technique, la MIB utilise un ensemble hétérogène de réseaux domotiques; l’architecture de base repose sur un bus KNX, sur lequel ont été progressivement connectées d’autres technologies variées, telles que WiFi/IP, ZigBee et d’autres technologies propriétaires - y compris celles développées dans les deux chapitres précédents : ADCF (§1.3.2), OpenWiNo (§1.3.5.2.1) et PDS-TWR+iRingLA (§2.3.1.1), qui ont toutes été déployées dans la MIB.

Sur le plan technique et technologique, dans les premiers temps, l’architecture numérique de la MIB était uniquement centrée sur un bus KNX et un logiciel propriétaire *Domovéa* développé par *Hager*. Tous les équipements non KNX installés sur la plate-forme étaient rattachés à ce bus par diverses passerelles ou moyens tels qu’une connexion par contact sec sur un boîtier KNX à n entrées. Un système de diffusion sonore *Sonos* et des caméras *Mobotix*, non liés à KNX, venaient compléter l’installation. Le bus KNX, de par sa structure décentralisée, permet d’une part le transport des données en bas débit (9600 bit/s) sur une simple paire de cuivre avec des moyens de détection d’erreur rudimentaires (bits de parité) mais relativement efficaces, et, d’autre part, une gestion applicative orientée domotique qui ne nécessite pas de serveur central. En effet, les nœuds KNX qui doivent interagir applicativement sont associés par configuration (envoi de commandes, retours par *indication d’état*) ce qui permet de résoudre des cas d’usage domotiques simples (par exemple : on/off, inversion d’état d’un actionneur sans en connaître l’état initial) à semi-élaborés (par exemple : déclenchement d’une action sur un événement d’un capteur, temporisation). Pour outrepasser les limitations de la technologie KNX et réaliser des scénarios plus élaborés (par exemple : scénarios séquentiels déclenchés par de multiples événements capteurs et composés d’itérations),

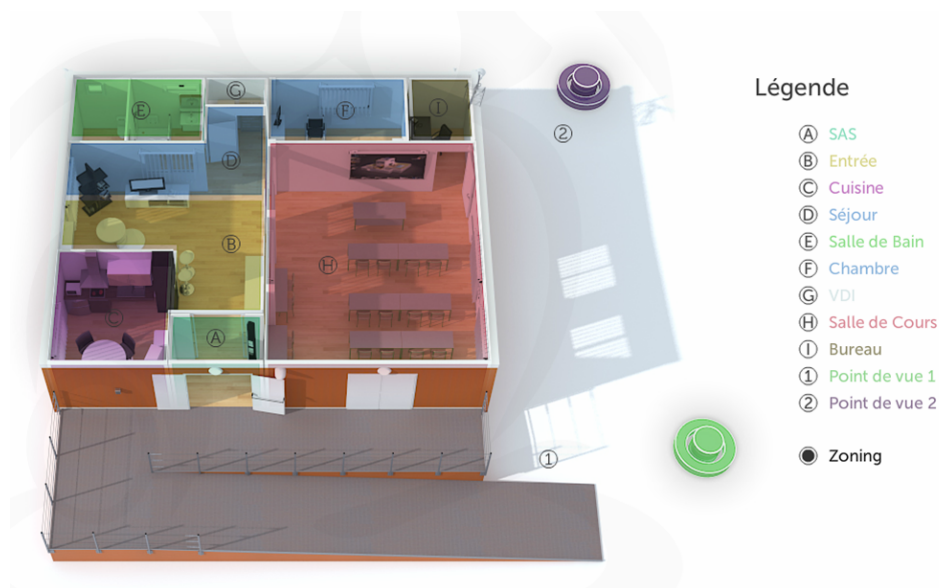


FIGURE 3.2 – Plan de la Maison Intelligente de Blagnac

la gestion décentralisée du bus peut cohabiter avec un serveur central chargé de ces actions trop complexes - voire impossible à réaliser - pour le bus KNX seul. A la création de la MIB, ce service centralisé était réalisé par le logiciel *Domovéa*, malheureusement peu adapté à l'utilisation dynamique requise par l'approche de recherche en laboratoire (absence d'API logicielle, pas de gestion de configuration); c'est la raison pour laquelle nous avons commencé par proposer plusieurs outils numériques ouverts en vue de compléter l'infrastructure de la MIB :

- un *bridge* IP/KNX permettant d'écouter et d'injecter des messages KNX sur le bus via IP,
- un *daemon* Linux incluant une partie serveur, permettant l'interprétation et le log de tous les messages KNX, ainsi qu'une injection de messages au niveau applicatif,
- une ferme de machines virtuelles supportant à la fois des VM Linux et Windows, permettant aux chercheurs de disposer d'un environnement numérique propre pour mener des expérimentations ou implémenter des démonstrations,
- un service de synthèse vocale (TTS, *Text To Speech*) open-source et de qualité, en français, diffusé sur les haut-parleurs Sonos.

Ces différents outils allaient permettre un meilleur accès numérique à la plate-forme et proposer des contributions innovantes.

Sur le plan scientifique, notre travail a d'abord consisté à travailler sur l'interopérabilité des technologies mises en œuvre sur la plate-forme. Nous avons pour cela développé un *middleware* simple pour permettre à des utilisateurs de la plate-forme (chercheurs, étudiants) d'en prendre le contrôle de façon simple et accessible d'un point de vue numérique. Ces travaux ont notamment permis une forte collaboration avec l'équipe IHM de l'IRIT, en vue de proposer des modes d'interaction innovants, fiables et acceptables par l'utilisateur. Plusieurs capteurs ont également été développés en collaboration avec le Pr. Eric Campo du

LAAS/CNRS, responsable scientifique et co-fondateur de la plate-forme; ces travaux ont permis le test et la mise en situation des WiNos et d'OpenWiNo dans une série de déploiements réels. S'en est suivi un retour sur nos recherches disciplinaires, avec de nouvelles voies d'exploration plus proches de contributions scientifiques majeures dans notre discipline, par exemple sur l'impact des contraintes temporelles d'une couche MAC sur l'utilisateur en interaction. Dans un second temps, nous avons alors proposé plusieurs directions scientifiques en vue d'optimiser le *déploiement éphémère* des réseaux sans fil contribuant à l'autonomie de la personne fragilisée, dans un contexte de *True Life Lab*, c'est-à-dire en milieu écologique (naturel), donc dehors d'une plate-forme d'observation comme la MIB. Nos derniers travaux dans cette équipe s'appuient sur le bus *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) (ISO/IEC PRF 20922), déjà utilisé dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil [88], et aujourd'hui très populaire, notamment dans le contexte de la ville intelligente [89], mais aussi dans le domaine des habitats intelligents pour l'aide et l'assistance aux personnes [90] [91].

Enfin, ces travaux ont permis de fédérer une activité de recherche pluridisciplinaire sur le site de l'IUT de Blagnac, dont nous avons été le représentant recherche (responsable du *Comité Recherche Consultatif*) entre 2015 et 2018.

Nous détaillons ces différents travaux dans les sections suivantes.

3.2 Synthèse des directions, projets et encadrements

3.2.1 Projets

La figure 3.3 illustre la chronologie des différents projets réalisés sur la période. Il s'agit de participations à 4 projets financés.

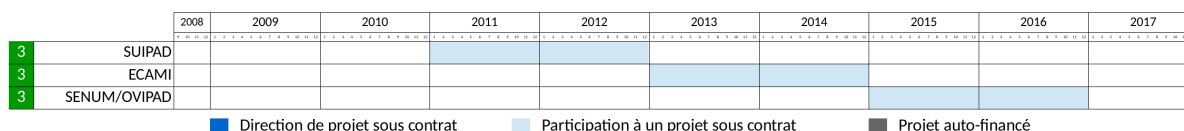


FIGURE 3.3 – Projets sur la thématique MIB

- **2011-2012 (2 ans) SIUPAD** (CNRS-PEPS INS2I-INSHS) *SUIvi comportemental de Personnes A Domicile*. Mise en place et évaluation d'un système de mesures actimétriques pour le suivi du comportement de personnes en perte d'autonomie à domicile sur la Maison Intelligente de Blagnac.
- **2013-2014 (2 ans) ECAMI** (MSHS-T) *Étude de l'ACcessibilité dans une Maison Intelligente*. Projet financé par la *Maison des Sciences de l'Homme de Toulouse*, développement de dispositifs d'interaction Homme-Maison en fonction du contexte remonté par un réseau de capteurs sans fil.
- **2015-2016 (2 ans) SENUM** (AG2R LA MONDIALE) *Séniors et Numérique*. Projet inscrit dans le thème de l'acceptabilité des TIC pour les personnes âgées, proposition d'une adaptation de l'habitat. 150 bénéficiaires AG2R LA MONDIALE sont venus sur la plateforme MIB utiliser les technologies développées et donner un feedback.
- **2015-2016 (2 ans) OVIPAD** (MSHS-T) *Observation et analyse multimodale d'une solution Technologie d'Information et de Communication pour le renforcement de la qualité de vie à domicile des personnes âgées*. Étude financée par la *Maison des Sciences de l'Homme de Toulouse*, menée

parallèlement à SENUM présenté ci-dessus, où une observation des usages des TIC est réalisée, en fonction du profil socio-culturel de la personne âgée, et en fonction de sa propre perception des besoins en autonomie et des valeurs de satisfaction et d’acceptabilité.

Ces travaux sont détaillés dans les sections suivantes.

3.2.2 Encadrements

Dans la catégorie des travaux présentés dans ce chapitre, nous comptons trois co-encadrements : un co-encadrement de niveau Master (PFE ingénieur) et deux co-encadrements d’ingénieurs d’études. La figure 3.4 illustre la chronologie des différents encadrements et co-encadrements réalisés sur la période.

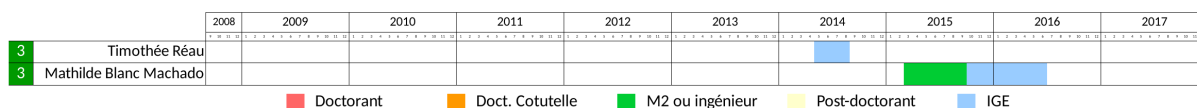


FIGURE 3.4 – Encadrements sur la thématique MIB

Les encadrements sont énumérés ici chronologiquement :

- **2014 (3 mois) : co-encadrement de M. Timothée Réau, ingénieur d’études** sur le projet ECAMI. Développement d’outils pour l’interaction habitant-maison par la modalité vocale, enrichie par l’utilisation d’un réseau de capteur sans fil.
- **2015 (6 mois) : co-encadrement de Mlle Mathilde Blanc Machado dans son stage ingénieur** sur le projet SENUM. Environnement d’étude des activités de la personne en vue de définir des modèles d’habitat.
- **2015-2016 (9 mois) : co-encadrement de Mlle Mathilde Blanc Machado, ingénieur d’études** sur le projet SENUM. Développement et mise en application d’outils pour l’évaluation de dispositifs d’aide au maintien à domicile.

Ces encadrements sont détaillés dans les sections suivantes.

Au delà de ces encadrements officiels, nous avons aidé également, plus ponctuellement, plusieurs étudiants du laboratoire dont M. Lachtar Abdelfetteh (doctorant travaillant sur une version améliorée d’une canne de marche connectée), Mme Asma Ben Hadj Mohamed (doctorante ayant travaillé sur la surveillance des personnes âgées dans la MIB, via un réseau de Kinects), M. Sami Mnasri (doctorant travaillant sur le redéploiement de noeuds WiNo en environnements contrôlés et Mme Ayadi Hayfa (doctorante travaillant sur la prévention des pannes de noeuds capteurs liées à leurs consommations énergétiques).

3.2.3 Publications

Les travaux présentés dans ce chapitre ont donné suite à deux publications dans des conférences internationales avec comité de lecture et actes publiés (ICOST, ICCHP) et huit publications dans des conférences nationales avec comité de lecture et actes publiés comme UbiMob, où nous avons publié successivement trois années.

3.3 Détail des travaux

3.3.1 Déploiement d'ADCF à la MIB

Dans le cadre de la thèse de Mlle Juan Lu dont les travaux ont été présentés au premier chapitre de ce document (§1.3.2.2), nous avons déployé un réseau ADCF à la MIB. Six nœuds ADCF (figure 3.5) ont été déployés sur la plate-forme, chacun ayant un rôle applicatif : un bouton d'appel, un capteur de porte magnétique (*contact Reed*) installé sur la porte du frigo, un capteur de présence intégré dans un tapis au sol, un capteur de mouvement infrarouge passif, et un actionneur sur l'éclairage de la table de nuit. Le dernier nœud implémentait le puits de collecte (*sink*) qui, via un PC et un lien USB, permettait des interactions simples avec la MIB, via le bus KNX et la synthèse vocale. L'objectif de cette expérience était d'une part de déployer à la MIB un premier réseau de capteurs basé sur un protocole totalement original, et, d'autre part, évaluer les travaux de la thèse de Mlle Juan Lu dans un contexte réel.



FIGURE 3.5 – Les nœuds ADCF dans la maison intelligente de Blagnac

Du point de vue applicatif, les communications entre les nœuds ADCF étaient réalisées par slots garantis CFDS. De par ce service d'accès au médium garanti sans collision, cette expérience devait permettre d'évaluer l'intérêt d'un tel mode d'accès au médium en situation réelle : être certain qu'une information détectée par un capteur puisse être acheminée dans un temps borné à deux secondes, selon la configuration des nœuds déployés. Compte tenu de la surface de la maison (80 m^2) et de la portée des nœuds (typiquement une quinzaine de mètres en *indoor*), du point de vue MAC, ces 6 nœuds formaient une topologie maillée complète (*full mesh*) ce qui ne permettait pas de mettre en évidence la réutilisation spatiale des slots proposée par ADCF. Grâce au buzzer disponible sur les nœuds, nous avons programmé le *sink* de manière à bipper à chaque réception des données. Par un simple enregistrement audio, nous avons évalué (manuellement) le temps d'acheminement d'une cinquantaine de messages en situation réelle et observé que l'ensemble des communications a été réalisé en respectant les contraintes temporelles. Un tel mode d'accès au canal est donc intéressant pour ce type d'application qui nécessite un réseau sans fil fiable et réactif. Nous verrons plus loin comment nous avons proposé de traiter dynamiquement cette réactivité.

Cette expérience a été filmée et fait l'objet d'une vidéo en ligne [28].

3.3.2 SUIPAD

Le projet SUIPAD, pour *SUIvi comportemental de Personnes A Domicile* a consisté en la proposition, le développement et l'évaluation d'un système de mesures actimétriques déployables à domicile pour le suivi du comportement de personnes en perte d'autonomie. Dans le cadre de ce premier projet impliquant la plate-forme MIB, plusieurs travaux ont été conduits : la définition des besoins, la spécification de l'infrastructure matérielle et logicielle pour le recueil de données issues des capteurs, l'interopérabilité des technologies réseaux, très hétérogènes, présentes sur la plate-forme, ainsi que la spécification des modes d'interaction usager-habitat. Financé sur PEPS/CNRS, ce premier projet n'a pas permis le recrutement d'une ressource à temps plein sur le projet.

Dans le déploiement des 6 nœuds ADCF présenté plus haut, nous avons réalisé une interconnexion quelque peu « manuelle » avec la MIB, pour permettre au *sink* (puits) ADCF d'interagir avec la plate-forme ; cette expérience nous avait conforté dans l'idée de déployer une solution propre, ouverte et extensible pour interagir avec la plate-forme. Sur les aspects purement réseau, notre contribution sur SUIPAD a essentiellement consisté à spécifier, développer et tester un *middleware* [92] conforme aux besoins de la collaboration. En effet, avec d'une part la présence sur la plate-forme de nombreuses technologies très variées (Réseau : KNX, WiFi et Ethernet ; IHM : écrans tactile, synthèse et commande vocale, caméra 3D (Kinect) ; Capteurs actimétriques : détecteur de chute, médaillon d'alerte, montre avec capteurs physiologiques...) et d'autre part, des besoins importants en terme d'accès à ces différentes ressources, le déploiement d'un *middleware* était absolument nécessaire pour permettre l'avancée des travaux. Enfin, plus spécifiquement à notre domaine de recherche, ce *middleware* devait comporter des fonctionnalités telles que l'estampille temporelle des événements au moins à la milliseconde de manière à pouvoir rapprocher des analyses de performances du réseau avec celles de l'IHM - par exemple pour étudier les conséquences de la latence réseau sur l'acceptation de la technologie par l'utilisateur. Là encore, l'expérience préliminaire réalisée avec ADCF, où nous avons chronométré la latence manuellement par audio, nous avait incité à proposer des moyens plus automatisés, même si, en l'absence d'une synchronisation globale des nœuds, cette brique était encore inopérante de bout en bout.

Un état de l'art des *middlewares* open-source disponibles a été réalisé et a montré qu'aucun *middleware* répondant aux attentes n'était disponible, surtout vis à vis de la dernière exigence de mesure temporelle. C'est ainsi que « MiCom » (*COMmande d'une Maison Intelligente*) a été spécifié, développé et proposé à l'équipe projet. Ce *middleware* permet d'interagir avec la plupart des équipements présents dans la MIB, quelque soit leur mode de raccordement à la plate-forme en mettant à disposition des utilisateurs, via le protocole HTTP, un jeu d'URLs permettant d'interroger et/ou de commander les équipements. Finalement, que ce soit pour allumer une lumière, interroger un capteur, faire bouger un meuble mobile ou faire prononcer une phrase par la synthèse vocale, toute action est faisable par le *middleware* via une URL avec des paramètres GET. En voici quelques exemples :

```
https://mi.lab.iut-blagnac.fr/micom/lamp?source=adrien&room=cuisine&order=on
https://mi.lab.iut-blagnac.fr/micom/door?source=adrien&door=portecoulissante&order=open
https://mi.lab.iut-blagnac.fr/micom/say?source=adrien&voice=pico&text="salut ! comment vas-tu ?"
```

A ce stade, le *middleware* ne proposait pas de sécurité particulière mis à part un chiffrement des données via le protocole HTTPS. Le *middleware* était voué à être utilisé dans un environnement sûr ; le champ *source* par exemple, était libre de choix et permettait d'annoncer la source de l'action dans le log et black-lister simplement une source non désirée, pour permettre un premier niveau de gestion de configuration. MiCom prenait également en charge l'interface avec différentes synthèses vocales, que l'utilisateur pouvait sélectionner parmi plusieurs disponibles : Pico (picoTTS), Virginie ou Hortense (Microsoft). Cette sélection pouvait permettre l'évaluation de leur intelligibilité dans un contexte réel en particulier pour les personnes

âgées. Validé par l'équipe projet, le *middleware* a été déployé sur la plate-forme MIB et était opérationnel fin 2012 [93]. Par la suite, les travaux présentés dans les deux chapitres précédents allaient être appliqués dans la MIB par une utilisation de MiCom.

Sur le plan humain, ce projet allait permettre l'émergence de l'équipe pluridisciplinaire « technique » qui allait ensuite perdurer, comptant des spécialistes de capteurs et d'actimétrie, d'interaction homme-machine et réseaux.

Conférence : Adrien Van den Bossche and Frédéric Vella. Une plateforme d'expérimentation pour les systèmes d'interaction destinés aux personnes en situations de handicap. In *Journées francophones Mobilité et Ubiquité (UbiMob)*, Nancy, France, juin 2013

3.3.3 ECAMI

Co-encadrement de M. Timothée Réau, ingénieur d'études

« *Étude et développement d'un dispositif d'interaction multimodale pour l'aide et assistance à domicile* »

Période : mai - août 2014

Financement : projet MSHS-T ECAMI

Le projet ECAMI, pour *Étude de l'Accessibilité dans une Maison Intelligente* a permis notre première étude, développement et tests de dispositifs d'interaction Homme-Maison. L'axe de recherche de ce projet était de proposer un service d'interaction multimodale (tactile par tablettes, et vocal par une synthèse vocale ambiante et une reconnaissance vocale avec un microphone porté) et contextuellement enrichi par les informations remontées par les capteurs environnementaux de la plate-forme MIB (capteurs de mouvements, sur les portes et les meubles, etc.). La problématique étudiée est donc très large, depuis les problématiques de l'IHM jusqu'aux capteurs et actionneurs de l'habitat intelligent, en passant par les aspects réseaux. Le projet comportait également un volet concernant l'acceptabilité des solutions technologiques. Plus largement, le projet ECAMI a constitué un terrain pratique pour le test des protocoles expérimentaux développés par les chercheurs, test impliquant l'utilisateur réel.

Dans le cadre de ce projet, nous avons essentiellement contribué sur les aspects réseaux : sans fil, sur la partie réseau de capteurs, et filaire, pour le transport des informations vocales (synthèse et reconnaissance vocale). Dans cet objectif et en nous appuyant sur le *middleware* MiCom cité plus haut, nous avons proposé une architecture où l'ensemble des données issues des dispositifs (domotiques, capteurs environnementaux et vocaux) convergeaient sur IP, plus précisément sur un bus logiciel « IVY », alors très populaire dans le domaine de l'IHM. Cette architecture est représentée sur la figure 3.6.

Un réseau de capteurs basé sur WiNo/OpenWiNo présenté au chapitre 1, a été déployé dans la MIB, et grâce à l'écosystème Arduino, une grande variété de capteurs a pu être mise en place, en collaboration avec le Pr. Eric Campo du LAAS/CNRS :

- capteurs de mouvements infrarouge,
- *contacts Reed* dans les portes, les fenêtres, un placard et le frigo,
- capteurs de force (FSR) dans le lit et le fauteuil,
- capteurs de choc (vibration) sur le plancher pour la détection de chutes.

Le déploiement de ce réseau de capteurs à la MIB, qui a perduré plusieurs années, a également permis d'éprouver OpenWiNo et les protocoles implémentés, en situation de déploiement réel. Il a également été

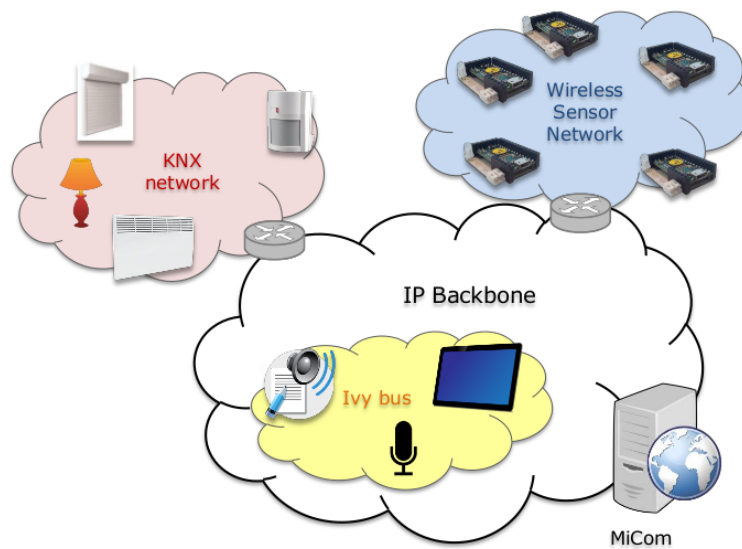


FIGURE 3.6 – Architecture des réseaux présents sur la MIB

l'occasion d'implémenter des protocoles spécifiques, comme la MAC TDMA slottée basée sur la synchronisation SiSP évoquée au §1.3.3.3 qui est aujourd'hui encore utilisée à la MIB.

Le bus IVY, qui est un bus logiciel fonctionnant sur IP *multicast*, a été déployé, en collaboration avec l'équipe IHM. IVY transporte des chaînes de caractères et contrairement à MQTT, ne propose pas d'organisation des données transportées (pas d'arbre, pas de *topic*) mais permet un abonnement simple par Expressions Régulières (*Regex*). Classiquement en IHM, le bus IVY permet l'interconnexion d'agents de reconnaissance vocale et d'agents de synthèse vocale, en lien avec le Contrôleur de Dialogue (CdD)¹. Nous y avons également connecté les informations issues du réseau de capteurs via un agent déployé sur la *gateway* WSN.

Ce projet a également permis une forte interaction avec Dr. Nadine Vigouroux et Dr. Frédéric Vella de l'équipe ELIPSE (IHM) du laboratoire. Dans ce cadre, nous avons co-encadré M. Timothée Réau, ingénieur d'études, qui a contribué au développement d'un CdD enrichi par le réseau de capteurs sans fil. L'objectif ici est de renforcer la connaissance du CdD pour augmenter sa pertinence dans l'interaction avec l'utilisateur. Par exemple, si l'utilisateur demande à la maison « d'allumer la lumière », si le CdD est capable de déterminer la pièce dans laquelle se trouve l'utilisateur grâce à la connaissance apportée par les capteurs de mouvements, alors le CdD pourra déduire la bonne lumière à allumer. Cet enrichissement du CdD peut également permettre l'augmentation de la robustesse de la reconnaissance vocale, en cas d'enregistrement bruité par exemple. L'architecture du contrôleur de dialogue enrichi par le réseau de capteurs est représentée en figure 3.7 : on y voit le réseau de capteurs remonter des informations au nœud *sink*, qui les transmet au contrôleur de dialogue. A ce stade, nous n'avons pas de base de données : le contrôleur de dialogue était chargé d'assurer son propre historique, ce qui introduisait une grande limitation.

Un premier modèle de contrôleur de dialogue a été proposé et le scénario « lever du lit » a été implémenté dans un CdD simple, via un automate d'état fini. Le scénario était le suivant :

1. Élément central dans le système d'interaction, qui, à partir des interactions passées, décide de l'interaction suivante proposée à l'utilisateur. Le CdD peut être indirectement connecté au monde physique pour connaître le contexte (via des capteurs) ou déclencher des actions sur l'environnement (via des actionneurs).

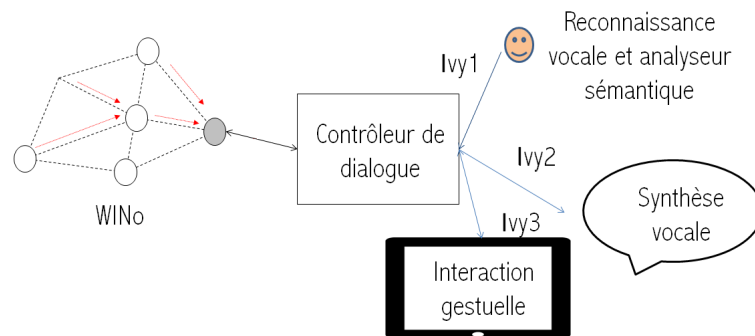


FIGURE 3.7 – Architecture contrôleur de dialogue et dispositifs d'interaction enrichi par le réseau de capteurs

- l'habitant, préalablement couché, se lève de son lit. L'action est détectée par le capteur sous le tapis au pied du lit. Le CdD est donc prévenu que l'habitant se lève,
- le CdD salue l'habitant, lui indique l'heure, et lui demande dans quelle pièce il veut se rendre via un message vocal. Il attend une éventuelle réponse de l'habitant via la reconnaissance vocale,
- en fonction de la réponse (cuisine, salle de bain, toilettes, ...) le CdD se prépare à allumer les lumières des différentes pièces, au fur et à mesure du déplacement de l'habitant dans la maison. L'information de déplacement est là-encore remontée par les capteurs et l'allumage des différentes lumières est réalisé par le CdD.
- une fois l'habitant dans la cuisine et la détection de la préparation de son petit déjeuner (ouverture des placards, du frigo, etc.), le CdD propose à l'habitant d'ouvrir les volets par un message vocal et attend une réponse par la reconnaissance vocale. Si la réponse est positive, le CdD déclenche l'ouverture des volets.

Ces premiers travaux se sont révélés fort structurants pour l'équipe pluridisciplinaire. Ils ont permis la publication de plusieurs articles [94], [95] et [96] et une vidéo de démonstration a été produite [REF]. Nous avons alors clairement identifié nos complémentarités et les perspectives de nos travaux. Tout d'abord, vis à vis de l'état de l'art, notre CdD enrichi était alors une vraie originalité. Cependant, son implémentation devenait très complexe si nous visions plusieurs situations (plusieurs scénarios). En effet, si l'automate d'états finis avait permis la finalisation de la preuve de concept, sa structuration ne permettait ni l'implémentation d'un scénario complexe ni, encore moins, de s'affranchir de la notion même de scénario. Pourtant, l'équipe souhaitait pouvoir procéder à une évaluation de ces briques technologiques avec de vrais habitants, pour en évaluer l'intérêt, ce que nous présenterons dans la section suivante.

D'un point de vue strictement Réseaux et Protocoles, émergeait une perspective liée aux problématiques évoquées dans le chapitre 1 de ce document : la question de la latence introduite par la mise en veille des capteurs et les rendez-vous MAC, et de leur impact sur la réactivité du système d'interaction : comment traiter dynamiquement ces temps, suffisamment courts pour être *négligeables devant le temps de l'interaction* (humain, relativement lent), c'est-à-dire n'introduisant aucune dégradation perceptible par l'utilisateur en interaction, mais tout en prévoyant des temps de veille nécessairement longs et fréquents pour maximiser l'autonomie énergétique des capteurs autonomes déployés. En effet, dans l'hypothèse d'un réseau déployé en dehors de la MIB, par exemple en suivant une approche TLL (*True Life Lab*), c'est-à-dire chez un habitant en conditions réelles, les nœuds capteurs devaient pouvoir tenir plusieurs semaines voire plusieurs mois sans aucune maintenance des batteries. Nous savions [6] que pour atteindre cette durée

en assurant une réactivité inférieure à la seconde avec des batteries de dimension raisonnable, il fallait pouvoir jouer sur la dynamique des protocoles.

Conférence : Adrien Van den Bossche, Eric Campo, Nadine Vigouroux, and Frédéric Vella. Réseau de capteurs sans fil distribués pour le monitoring des activités de vie au sein d'une maison intelligente. In *Journées francophones Mobilité et Ubiquité (UbiMob)*, Sophia Antipolis, France, juin 2014

Conférence : Frédéric Vella, Nadine Vigouroux, Adrien Van den Bossche, Eric Campo, Blandine Boudet, and Pierre Rumeau. Etude de l'ACcessibilité de l'interaction dans une Maison Intelligente par des personnes fragilisées pour une meilleure autonomie à domicile. In *Journées Annuelles de la Société Française de Gériatrie et Gérontologie (JASFGG)*, Paris, France, octobre 2013

3.3.4 SENUM/OVIPAD

Co-encadrement de Mlle Mathilde Blanc-Machado dans son stage de M2

« Environnement d'étude des activités de la personne en vue de définir des modèles d'habitat »

Période : mars - septembre 2015

Financement : projet partenariat public-privé SENUM

Co-encadrement de Mlle Mathilde Blanc-Machado, ingénieur d'études

« Développement et mise en application d'outils pour l'évaluation de dispositifs socio-techniques d'aide au maintien à domicile »

Période : octobre 2015 - juillet 2016

Financement : projet partenariat public-privé SENUM

Suite à nos premiers travaux dans l'équipe pluridisciplinaire autour de la MIB, nous avons plusieurs résultats théoriques, ainsi que quelques prototypes réalisés et opérationnels, qui devaient alors être confrontés aux utilisateurs, en vue de déterminer si, d'un point de vue de l'*usage*, ces travaux pouvaient avoir un intérêt au delà des travaux académiques. Bien que peu répandus dans notre discipline Réseaux et Protocoles, cette étape de confrontation avec les utilisateurs est naturellement très classique dans la communauté IHM ; nous nous y sommes donc confronté avec les projets présentés dans cette section : SENUM (*Seniors et Numérique*) et OVIPAD (*Observation et analyse multimodale d'une solution Technologie d'Information et de Communication pour le renforcement de la qualité de vie à domicile des personnes âgées*), qui, comme leur nom l'indique, se focalisent sur un public de seniors vivant à domicile. Suite aux projets SUIPAD et ECAMI évoqués plus haut, il était alors possible de mener une étude impliquant un partenaire concernés par les questions sociétales du « bien vieillir à domicile » ; nos prototypes opérationnels permettaient alors d'envisager cette étude d'usage et d'acceptabilité que nous recherchions, voire d'étudier comment et sous quelle forme ces avancées pouvaient être proposées au public concerné.

Les deux projets ont été menés parallèlement, avec un certain nombre d'interactions : alors que le projet SENUM visait l'étude de l'acceptabilité des NTIC pour les personnes âgées et la proposition d'adaptations au niveau de l'habitat, le projet OVIPAD visait à réaliser une observation des usages des TIC, observation qui devait être mise en perspective du profil socio-culturel de la personne âgée, en fonction de sa propre perception des besoins en autonomie et des valeurs de satisfaction et d'acceptabilité. 150 bénéficiaires AG2R LA MONDIALE sont alors venus utiliser les technologies domotiques et d'interactions déployées dans la MIB et donner un feedback à l'équipe des chercheurs.

Pour réaliser cette étude, nous disposons de plusieurs outils méthodologiques :

- d'un questionnaire pour identifier les profils socio-culturels, les usages et les intentions d'utilisation des TIC par les seniors,
- d'une plate-forme d'observation des activités d'une personne dans un habitat connecté et des interactions, basée sur la MIB et les travaux réalisés jusqu'ici, enrichi de plusieurs briques que nous allons détailler plus bas,
- d'un entretien et d'un questionnaire post-expérimentation.

La figure 3.8 représente le déroulement d'une *observation*, c'est-à-dire d'une itération du protocole expérimental appliqué à un sujet.



FIGURE 3.8 – Étapes du protocole expérimental

Pour ce faire, nous sommes repartis des briques développées dans les projets SUIPAD et ECAMI, et ajouté :

- un réseau de caméras IP HD (720p) produisant chacune un flux *multicast* temps réel pour être visible simultanément sur plusieurs postes d'observation,
- un dispositif de capture et d'enregistrement de la voix de l'utilisateur, pour l'observation, mais aussi en vue de constituer une base de données de *corpus* vocaux,
- des tablettes d'interaction, développées pour l'occasion, permettant de présenter une interface très simple pour la plupart des actionneurs de la MIB,
- une interface de type *Magicien d'Oz* [97] [98], c'est-à-dire un pupitre permettant à un opérateur, dit *magicien*, de piloter en un temps très court toute la maison, comme si ce pilotage était réalisé par une machine². Le pupitre permettait aussi bien de piloter les actionneurs domotiques classiques de la maison (lumières, volets, meubles motorisés) que piloter de nouveaux éléments dans la maison (télévision, radio, lit motorisé) ou déclencher la synthèse vocale pour dialoguer avec l'utilisateur, soit à l'aide de messages préprogrammés, soit via une saisie rapide au clavier,
- quelques capteurs de mouvement supplémentaires,
- une base de données permettant une post-analyse des activités de la personne en interaction avec la maison. Cette base de données est basée sur le journal MiCom et enrichie de plusieurs éléments, notamment sur la provenance des ordres enregistrés (interrupteur mural ou tablette tactile ou commande vocale)

2. Selon [99], « l'expérience du magicien d'Oz (ou technique) est une expérience dans le domaine de l'interaction homme-machine et de l'ergonomie informatique dans laquelle les sujets interagissent avec un système informatisé qu'ils croient autonome, mais qui est en fait totalement ou partiellement contrôlé par un humain. ».

En termes d'infrastructure, le Magicien d'Oz a été déployé sur la base de l'architecture avec Contrôleur de Dialogue (cf. ECAMI), où nous avons supprimé le CdD pour le remplacer par *MiOz* (Un Magicien d'Oz pour la Maison Intelligente) [100]. L'architecture réseau est représentée figure 3.9. L'interface d'interaction InTacS a également fait l'objet d'une publication [101].

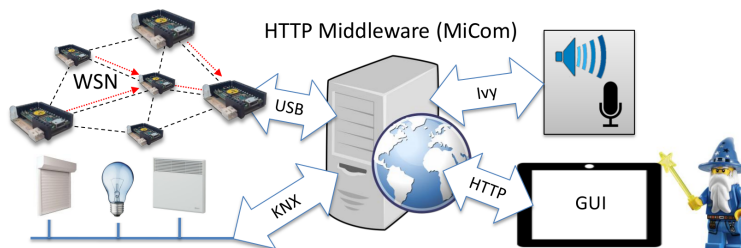


FIGURE 3.9 – Architecture MIOZ

Les deux projets nous ont permis d'élargir l'équipe de recherche transdisciplinaire par l'arrivée l'intégration de deux chercheurs SHS complémentaires (Anthropologue et Sociologue des médias) et de co-diriger Mlle Mathilde Blanc-Machado dans son stage de fin d'école d'ingénieur, puis, pendant près d'un année, comme ingénieur d'études dans l'équipe, sur la MIB. Ces deux projets ont également constitué une nouvelle fois un terrain de mise à l'épreuve de nos travaux sur le prototypage rapide de nœuds capteurs, avec une mise en situation réelle complète, cette fois en incluant des utilisateurs réels. Nous avons à ce titre pu développer plusieurs capteurs et actionneurs spécifiques, basés sur l'architecture WiNo, que nous allons détailler dans la section suivante et dans l'annexe A de ce document.

Parmi les nombreuses conclusions de ce projet, nous souhaitons en discuter une ici, en lien direct avec notre discipline : pour une personne âgée, pouvoir piloter un équipement électronique utilisé quotidiennement (par exemple, une télévision) autrement que par sa télécommande (par exemple, par la voix) est une option forte intéressante. Cependant, pour une majorité des utilisateurs interrogés pendant l'étude, cette option ne doit pas être conditionnée par le changement de l'appareil en question ; autrement dit, cette option n'est pas *acceptable* s'il faut remplacer cet appareil par une télévision plus récente qui elle, connectée, présentera des possibilités de pilotage plus élaborées. Il nous semble que cette remarque est intéressante dans la mesure où elle remet en cause le systématisme d'une recherche d'interopérabilité. En effet, il est très fréquent de remplacer un équipement pourtant opérationnel s'il ne présente plus les caractéristiques attendues en termes d'interopérabilité. Pour la majorité des sujets de l'étude SENUM, *c'est à la technologie de commande de se mettre à la portée de tout appareil à commander, et non le contraire*. C'est notamment dans cet objectif que nous avons proposé WiNoIR que nous présentons dans la section suivante.

Les résultats préliminaires de cette étude, sur la cohorte des pré-tests puis sur les 30 premiers sujets, ont été publiés dans [102] et [103]. Le partenaire AG2R LA MONDIALE a également réalisé une vidéo sur l'opération SENUM [REF].

Conférence : Elizabeth Bougeois, Jenny Duchier, Frédéric Vella, Mathilde Blanc Machado, Adrien Van den Bossche, Thierry Val, Nadine Vigouroux, and Eric Campo. Post-test perceptions of digital tools by the elderly in an ambient environment. In *International Conference On Smart homes and health Telematics (ICOST)*, Wuhan, China, mai 2016

Conférence : Adrien Van den Bossche, Eric Campo, Jenny Duchier, Elizabeth Bougeois, Mathilde Blanc Machado, Thierry Val, Frédéric Vella, and Nadine Vigouroux. Multidimensional observation methodology for the elderly in an ambient digital environment. In *International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP), Linz, Austria, juillet 2016*

3.3.5 De la Maison Intelligente vers le *True Life Lab*

Depuis le début de nos travaux sur la plate-forme, nous savions que la MIB introduisait un biais important sur le plan observationnel et usage. En effet, les comportements des usagers observés à la MIB sont biaisés dans la mesure où l'habitant n'évolue pas dans son environnement naturel ; il adopterait probablement un comportement différent si la même situation se présentait à son domicile. C'est une différence notable entre l'approche par *Living Lab* (LL) comme la MIB, et l'approche dite du *True Life Lab* (TLL) [REF] ; dans la seconde approche, les observations sont réalisées en milieu écologique, dans l'environnement quotidien de la personne observée.

Nous pourrions faire une critique analogue du point de vue de notre discipline, les Réseaux et Protocoles : en effet, la plate-forme permet un déploiement hautement simplifié de nos capteurs, actionneurs et serveurs hébergeant les algorithmes de traitement des données. Ce déploiement est simplifié grâce aux caractéristiques de la plate-forme, notamment :

- par la présence préliminaire du bus KNX et d'un réseau local Ethernet, avec de nombreuses terminaisons réparties dans la maison. Ces deux technologies présentent toutes deux des caractéristiques fiables dans le transport de l'information,
- par la structure de la plate-forme, qui permet un passage de câbles très simplifié (câbles réseaux comme câbles d'alimentation électrique),
- par la disponibilité d'une connexion à Internet de qualité, via le réseau du campus, à très haut débit, sans intermittence ni variation de qualité de service, ni limite en volume de données échangées, comme c'est le cas chez le particulier avec des box DSL ou des liens 4G,
- par la présence d'un serveur local, aux ressources très importantes, hébergeant une ferme de machines virtuelles.

Ces conditions techniques et technologiques idéales ne sont clairement pas celles d'un déploiement réel. Nous pouvons les considérer comme un biais aussi important, du point de vue Réseaux et Protocoles, que le biais introduit sur le plan observationnel et usage. *Si un réseau équivalent était déployé au domicile d'une personne observée, il n'aurait pas les mêmes performances.*

Si l'équipe pluridisciplinaire que nous avons rejoint en 2011 a été montée avec un adossement fort à la MIB, nous avons un intérêt certain à appliquer nos méthodes observationnelles en dehors de la plate-forme et adopter une approche *True Life Lab*. Pour ce faire, les briques technologiques devaient pouvoir permettre ce déploiement, qui ne se voit pas contraint de la même manière en LL qu'en TLL. Nous noterons donc les contraintes liées au TLL, supplémentaires (+) ou relâchées (-), par rapport au LL :

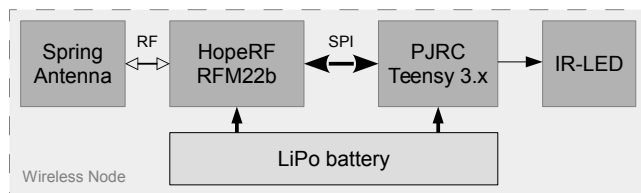
- + le déploiement des capteurs et actionneurs doit être simplifié à son extrême : les nœuds capteurs et actionneurs doivent être *installables* n'importe où, sans aucune contrainte autre que celle liée à l'application. Par exemple, s'il faut installer un capteur sur une porte de placard alors qu'aucune source énergétique ni câble réseau n'est disponible à proximité, alors cette installation doit être *faisable* techniquement, sans pour autant dénaturer le lieu d'installation (pas de perçage par exemple),

- + le réseau doit être déployable dans une hypothèse *éphémère*, c'est-à-dire limitée dans le temps. Cette durée peut être préalablement connue ou non. Cependant, le déploiement peut être amené à perdurer pour des questions non techniques, liées à l'usage par exemple. Il convient donc de prévoir des moyens simples pour maintenir l'installation opérationnelle si cette durée augmente, par des moyens simples à mettre en oeuvre, sans dénaturer l'environnement ni introduire de biais dans l'observation en cours,
- + d'une manière assez similaire aux contraintes des réseaux de capteurs sans fil, le réseau doit présenter des caractéristiques d'auto-organisation et d'auto-réparation (*self-healing*). En cas de panne avérée et non réparable, le système doit être en mesure de notifier le dysfonctionnement pour minimiser le biais introduit par la panne dans l'interprétation des résultats,
- + à la différence des architectures *testbed* classiques, l'évaluation des performances ne peut reposer sur un réseau de supervision pour surveiller les nœuds déployés ou remonter les paramètres de performances des protocoles; cette remontée étant nécessaire pour l'analyse des performances des protocoles, celle-ci devra être effectuée via le réseau de production sans, là encore, introduire de biais. En dernier lieu, un stockage local pourra être réalisé sur le nœud, sans possibilité d'analyse temps réel,
- les contraintes de gestion de configuration liées aux usages multiples de la plate-forme MIB (différentes expériences, travaux pratiques des étudiants, etc.) disparaissent. Le réseau déployé peut être considéré comme *mono-tâche*.

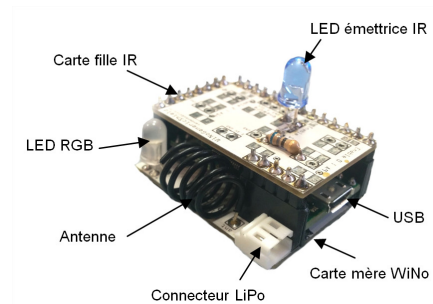
Les contraintes énoncées ici rejoignent nos objectifs scientifiques dans le déploiement des réseaux de capteurs évoqués au chapitre 1 de ce document et ce n'est pas un hasard si les protocoles proposés dans nos travaux disciplinaires s'inscrivent dans cette démarche.

Au delà des protocoles de communication sans fil, nous avons également contribué au prototypage rapide de solutions complètes incluant le prototype matériel, avec notre outil WiNo/OpenWiNo (cf. §1.3.5.2.2). Cet outil est parfaitement adapté pour réaliser des capteurs et actionneurs déployables en TLL. Les protocoles d'auto-organisation du réseau et économes en énergie permettent des déploiements sur plusieurs mois. La topologie maillée (*mesh*) augmente la robustesse du réseau en introduisant un outil de type *self-healing* et réduit la latence des transports d'information. L'écosystème Arduino, dans lequel est ancré le prototype, permet, via les bibliothèques *Open Source*, d'assembler des petits systèmes intégrés et complets. C'est dans cet objectif que nous avons présenté deux des prototypes de nœuds pour le TLL répondant à ces contraintes : le *WiNoIR* et le *WiNoCube*.

- Le *WiNoIR* (figure 3.10) [104] est un nœud sans fil basé sur le modèle WiNo présenté au chapitre 1, auquel nous avons ajouté une LED infrarouge et une bibliothèque logicielle permettant l'émission de signaux infrarouges tels que ceux utilisés par les télécommandes d'appareils grand public. Déployé en situation de LL ou TLL, il peut commander tout équipement doté d'un récepteur infrarouge via le réseau sans fil maillé, sans nécessiter de modification sur ledit appareil, ni d'achat d'un nouvel équipement compatible. Il permet donc de répondre aux besoins exprimés par les utilisateurs dans SENUM/OVIPAD, notamment en ce qui concerne la question de l'interopérabilité. Associé avec une MAC à rendez-vous telle qu'ADCF (§1.3.2.2) ou SiSP-MAC (§1.3.3.2.2) et paramétrée de façon suffisamment réactive, un déploiement de plusieurs mois peut être envisagé avec des piles AA ou batteries de capacité inférieures à 2000 mA.h, telle qu'une batterie LiPo classique par exemple. Des *WiNoIR* ont par exemple été déployés sur la MIB pour piloter les deux téléviseurs non connectés, la hotte aspirante et le lit médicalisé.
- Le *WiNoCube* est également basé sur le modèle WiNo, plus précisément sur un TeensyWiNo. Monté dans un boîtier cubique translucide imprimé 3D, il permet de prototyper des objets d'interaction connectés riches puisqu'il profite non seulement des nombreux capteurs du TeensyWiNo : sondes



(a) Architecture



(b) Prototype

FIGURE 3.10 – WiNoIR : architecture matérielle et prototype

inertiels 3D classiques (accéléromètre, gyroscope, magnétomètre), mais également d'un vibreur, d'un buzzer et de plusieurs LEDs RGB, chacune disposée sur une face du cube. Les périphériques ajoutés sont visibles en jaune/orange sur la figure 3.11. Grâce à ces nombreux capteurs et actionneurs, le cube peut identifier son orientation ; il peut être tourné sur lui-même comme un bouton rotatif ; il peut se colorer, vibrer ou bipper pour signaler un événement ou confirmer un retour d'état à l'utilisateur. Pour maximiser son autonomie énergétique, il ne maintient qu'une activité réseaux très réduite lorsqu'il est immobile. S'il est déplacé, il se réveille et entre pleinement opérationnel.

Quelques exemples d'autres développements réalisés à partir de nœuds WiNos, très souvent dans le cadre de projets étudiants, qui s'inscrivent dans cette démarche sont présentés dans l'annexe A de ce document.

Revue : Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. Plateforme de prototypage rapide d'objets connectés avec la famille WiNo* - Enabling Fast-prototyping of Connected Things using the WiNo* family. *ISTE OpenScience - Internet des objets*, mars 2017

Conférence : Adrien Van den Bossche, Mathilde Blanc Machado, Thierry Val, Frédéric Vella, and Nadine Vigouroux. Utilisation des nœuds WiNoIR pour connecter tous les équipements domotiques d'un habitat intelligent (poster). In *Journée Nationale de l'Internet des Objets - Nouveaux défis de l'Internet des Objets: Interaction Homme-Machine et Facteurs Humains*, Paris-Saclay, France, novembre 2016

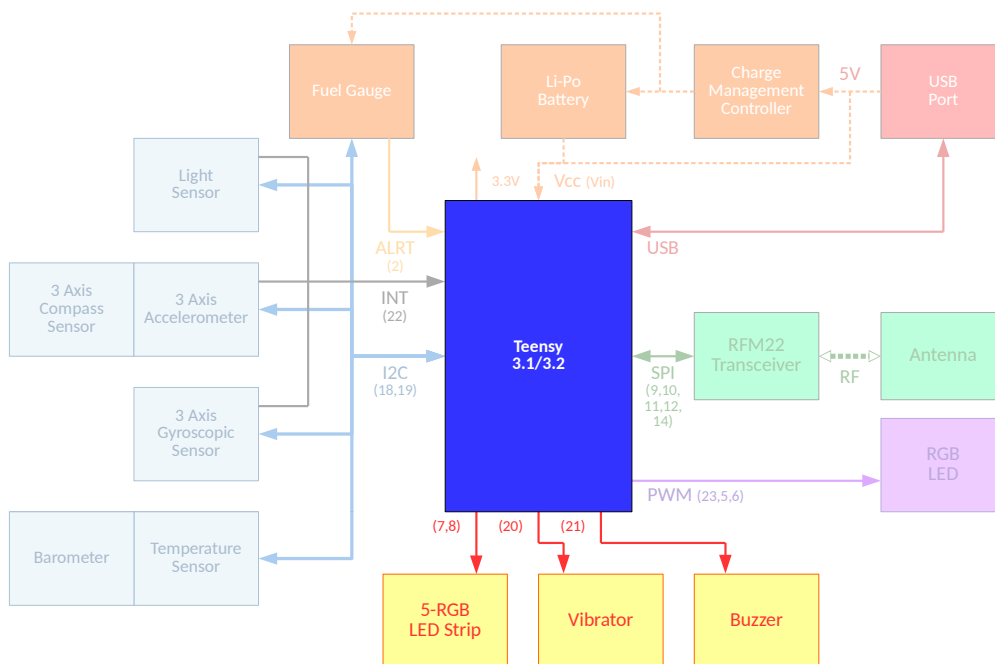


FIGURE 3.11 – Schéma fonctionnel du TeensyWiNo enrichi pour le WiNoCube

3.4 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre implication dans des travaux qui concerne la mise en application des Réseaux de Capteurs Sans Fil à l'Habitat Intelligent. Ces travaux ont majoritairement été réalisés avec le support de la plate-forme Maison Intelligente de Blagnac. Ils ont souvent été réalisés dans le cadre de l'équipe pluridisciplinaire traitant des problématiques socio-techniques pour l'aide et l'assistance à l'autonomie à domicile des personnes âgées et/ou personnes présentant un handicap. Ce contexte constitue un terrain d'application à nos travaux disciplinaires. Considérée en quelque sorte, au départ, comme une « charge collective », notre implication sur la plate-forme MIB s'est rapidement révélée très intéressante car à la fois riche sur le plan scientifique, notamment grâce aux aspects transdisciplinaires des projets en lien avec la plate-forme, mais aussi avec ce fort ancrage réaliste pour évaluer concrètement nos travaux disciplinaires.

A ce stade, nous retiendrons que :

- l'évaluation des performances des technologies réseaux en environnement de type *Living Lab* introduit un biais similaire à celui dans l'observation des usages. Si cette évaluation constitue un premier résultat intéressant, elle ne suffit pas et le réseau doit être évalué en environnement écologique, c'est-à-dire en environnement réel. Une évaluation en situation *True Life Lab* est donc recommandée,
- pour pouvoir envisager l'évaluation des performances des technologies réseaux en environnement de type *True Life Lab*, il est nécessaire que le réseau déployé présente certaines caractéristiques en terme d'auto-configuration et d'auto-réparation, mais aussi en ce qui concerne son autonomie énergétique. De plus, à la différence des architectures *testbed* classiques, on ne peut disposer d'un

réseau de supervision parallèle au réseau à évaluer,

- l'hétérogénéité des technologies déployées dans ce contexte est forte et leur risque d'obsolescence rapide est certain. Les problématiques liées à l'unification et l'homogénéisation des données est un challenge. Nous l'avons partiellement résolu avec *MiCom*, mais dans les limites du périmètre qui nous concerne. Si les solutions basées sur MQTT sont séduisantes sur cet aspect, vont-elles permettre un passage à l'échelle au niveau de l'hétérogénéité dans l'IoT ?

Les protocoles et technologies réseaux actuels répondent difficilement à ces contraintes. C'est ainsi que nous proposons plusieurs perspectives pour pouvoir répondre favorablement à ces contraintes à moyen terme : tout d'abord, dans ce contexte où le réseau est potentiellement en lien étroit avec l'utilisateur et son activité, il nous semble tout à fait opportun d'optimiser la réactivité du réseau et des protocoles en tenant compte de l'activité de la personne. En effet, dans les protocoles conçus et présentés dans les deux premiers chapitres de ce manuscrit, nous prévoyons des options d'économie d'énergie débrayables si nécessaire, voire débrayables dynamiquement en fonction de la situation observée par le réseau de capteurs. C'est par exemple le cas avec les CFDS d'ADCF qui ont été déployés à la MIB. Une perspective intéressante consisterait donc à asservir la dynamique du réseau sur l'activité de la personne en interaction avec ce réseau. Par exemple, si nous considérons un réseau de capteurs formé par des capteurs de mouvement et un cube d'interaction, ce dernier pourrait être maintenu dans un état de veille profond tant qu'aucun mouvement humain n'est détecté dans son voisinage. La problématique ici serait d'étudier la faisabilité et les caractéristiques d'un protocole MAC dynamique centré sur l'activité de la personne en interaction avec son environnement numérique ambiant. La problématique de la localisation, telle qu'elle a été présentée dans le chapitre 2 avec ALO, constitue également une brique technologique intéressante dans ce contexte, puisque l'information de position des nœuds pourraient être apportée et le service de localisation rendu.

Une seconde perspective consisterait à traiter la problématique de l'hétérogénéité du réseau par des solutions telles que celles qui commencent à être standardisées dans l'IoT. Nous l'avons vu plus haut, un exemple bien connu est le bus MQTT, qui permet de publier des informations issues de capteurs et dispositifs connectés dans un format homogène au niveau Transport, propice à une analyse des données en flux tendu. L'avantage d'une telle solution est qu'il suffit de partager une architecture arborescente commune puis, pour chaque technologie, déployer un connecteur (un agent) qui publie les données dans le format attendu. Cependant, le codage de la charge utile n'est pas standardisé : plus qu'une problématique de réseaux et protocoles, il s'agit plus là d'une problématique de codage de l'information.

Une fois ces deux objectifs atteints, une dernière perspective consisterait à concevoir un *testbed* portable contenant un ensemble de capteurs, actionneurs et *gateways* prêts à être déployés, auto-gérés et auto-réparés, pour permettre le déploiement éphémère de réseaux en situation de TLL.

Conclusion générale et perspectives de recherche

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur une période de dix années, qui aura vu une forte évolution du domaine des Télécommunications et Réseaux. Le domaine des Réseaux Sans Fil, et tout particulièrement celui des Réseaux de Capteurs Sans Fil, dont traite essentiellement notre travail, s'est clairement métamorphosé sur la décennie. Alors qu'au début de la période, l'essentiel des travaux académiques abordaient les protocoles MAC et Routage des RCSF par les principes des réseaux maillés et/ou les réseaux ad hoc, avec généralement pour hypothèse la couche Physique DSSS du standard IEEE 802.15.4-2006 [17] [9], cette décennie se termine avec l'avènement des réseaux en bande étroite, généralement organisés par un réseau d'infrastructure. Ces technologies permettent d'augmenter considérablement les portées et donc, réduisent *de-facto* l'intérêt des réseaux maillés multi-sauts [105]. La problématique du routage est donc moins préminente et le challenge porte plutôt sur la réduction des emprunts protocolaires car, si les portées sont grandes, c'est au prix d'une très forte réduction des débits et d'importantes limitations d'utilisation de la bande passante avec des rapports cycliques de l'ordre de 1% imposés par les autorités de régulation des Télécoms. Cependant, les challenges de contrôle d'accès au médium restent importants, notamment sur les difficultés liées au passage à l'échelle et la saturation des bandes ISM³.

D'autres technologies de transmission ont également contribué à cette métamorphose, surtout grâce à une disponibilité grandissante des *transceivers*, avec des conditions très accessibles sur le plan technique (*drivers* ouverts, disponibilités de *breakout-boards*...) comme sur le plan économique. Parmi ces nouvelles offres de transmission, celle que nous avons largement traitée est l'Ultra-Wide Band, qui permet d'entrevoir de nouveaux services rendus par l'empilement protocolaire, en plus du service *Data*, comme celui de la localisation des nœuds communicants sans fil. En effet, grâce à la mesure du temps de vol radio et sans aucun composant électronique dédié au positionnement tel qu'un récepteur GNSS, des capteurs inertiels ou bien un émetteur/récepteur Ultra Son, les nœuds *Ultra-Wide Band* (UWB) sont capables d'estimer la distance que les séparent l'un de l'autre ; la seule nécessité est la présence dans les nœuds d'un *timer* à très haute fréquence, capable de mesurer des temps de l'ordre de la nanoseconde. Alors que ceci était difficilement réalisable technologiquement il y a une dizaine d'années pour des composants de grande série à bas coût, ces fonctionnalités standardisés [34] sont aujourd'hui disponibles sur de tels matériels.

Une autre évolution forte du domaine étudié concerne des aspects méthodologiques dans l'évaluation des performances des protocoles réseau. Alors qu'il y a dix ans, rares étaient les évaluations présentant une étude par prototypage réel/*testbed*, c'est aujourd'hui une attente forte de la communauté académique. A la fin de notre thèse de Doctorat, la plupart des contributions académiques publiées étaient évaluées

3. Les opérateurs de Télécoms s'accaparent les bandes ISM sur lesquelles se tiennent les trafics LoRa et Sigfox [REF].

par méthodes formelles et simulation. Durant notre thèse de Doctorat, nous faisons partie d'une équipe de recherche qui promouvait l'évaluation des performances par banc de test en complément des méthodes traditionnelles. C'est ainsi que nous avons toujours défendu cette méthodologie depuis, et, aujourd'hui, force est de constater que ces techniques sont en plein essor : les plateformes *testbeds* publics se développent et de nombreuses bonnes publications confirment les résultats théoriques par une étude via prototypage et analyse de performances en conditions réelles.

Concernant plus spécifiquement nos travaux présentés dans ce mémoire, nous souhaitons mettre l'accent sur différents points :

- Nous avons montré, par plusieurs travaux différents, que l'auto-organisation et l'auto-réparation des Réseaux de Capteurs Sans Fil pouvait être organisée de façon totalement décentralisée par des protocoles reposant sur l'envoi et la réception de trames balises (*beacons*) en diffusion (*broadcast*). Cette auto-organisation permet de s'affranchir d'un élément coordinateur central, comme c'est généralement le cas dans les RCSF (IEEE 802.15.4, WirelessHART, TSCH, etc.), augmentant ainsi la fiabilité du réseau en cas de panne de cet élément central. L'utilisation de la diffusion, par rapport à l'*unicast*, permet d'atteindre tous les voisins avec un unique message, ce qui limite le nombre d'échanges pour parvenir à un consensus entre nœuds dans un réseau sans hiérarchie. Cependant, cette décentralité entraîne une complexité algorithmique et protocolaire, voire un risque de sécurité car les protocoles décentralisés reposent sur une hypothèse de confiance envers les nœuds pairs. Nous avons fait l'hypothèse que cette sécurité pouvait être tenue par des algorithmes de chiffrement et protocoles associés, mais sans avoir étudié les conséquences de cette hypothèse plus en détail. Cependant, dans cette optique, nous avons étudié sous l'angle de la *confiance protocolaire* l'un des protocoles décentralisés proposés, SiSP, et montré que certaines attaques ou comportements malveillants pouvaient également être contrés eux aussi de façon décentralisée, ce qui renforce notre thèse.
- Nous avons contribué au développement et à la diffusion d'outils permettant l'implémentation, le déploiement et l'analyse de performances de protocoles de niveau 2 et 3, pour les réseaux sans fil, dans un environnement réel. Ces outils permettent une approche méthodologique complémentaire des approches par méthodes formelles et par simulation. Dans ce contexte, nous avons proposé OpenWiNo, un environnement matériel et logiciel permettant de faciliter l'implémentation des protocoles de niveaux 2 et 3 sur un large panel de couches physiques, en permettant le changement simple de *transceiver* au niveau *hardware*, comme il est possible de le faire en simulation. Organisés en *testbed*, les nœuds OpenWiNo peuvent être déployés en nombre et dans l'environnement cible pour augmenter la pertinence de l'analyse de performances. Comme la plupart de nos contributions matérielles et logicielles, OpenWiNo est diffusé sous licence libre.
- Nous avons fait l'hypothèse, en début de chapitre 2, de la possibilité de proposer un *Objet* dédié à la localisation, parallèle à l'empilement protocolaire classique, en vue de fournir un *service de localisation* en complément du *service de données* classiquement rendu par un empilement protocolaire. Nous avons désigné cet objet par *Abstracted Localisation Object* (ALO). ALO prévoit de rassembler, compiler et synthétiser de nombreuses informations issues des protocoles, tables, informations, etc. générées par l'empilement protocolaire pour déduire la localisation relatives au nœuds. Dans cet objectif, nous avons contribué aux méthodes de *Ranging*, processus permettant de déterminer la distance entre deux nœuds sans fil à partir d'informations sur le signal radio transmis et reçu. Nous avons particulièrement travaillé sur les méthodes par *Time of Flight* (ToF), c'est-à-dire par mesure du temps de vol radio. Nous avons proposé plusieurs protocoles de *ranging*, avec chacun des caractéristiques différentes : certains comme ODS-UWB recherchent la meilleure économie d'énergie possible pour les nœuds mobiles, d'autres tels que 2M-TWR ou BB-TWR sont le plus *indolore* possible pour être noyés dans le trafic usuel du réseau, et certains, tels que ViRAS, recherchent la

meilleure précision. Ces protocoles étant implémentés sur une couche Physique de type Ultra-Wide Band et la communauté académique ne disposant pas d'outil pour implémenter, tester et évaluer les performances de ces protocoles, là encore, nous avons développé les outils matériels et logiciels qui nous manquaient, DecaWiNo et DecaDuino, que nous avons publié sous licence libre. Après ces huit années de travail sur le sujet, nos travaux nous permettent d'atteindre des précisions de la dizaine de centimètres en *ranging Line Of Sight* (LOS) et à une vingtaine de centimètres en localisation 2D.

Orientations et perspectives de recherche

Nos conclusions permettent d'envisager de nombreuses perspectives de recherche. Cette dernière section en présente les principales :

- Dans un premier temps, une perspective à court terme consisterait à poursuivre notre recherche disciplinaire en Réseaux & Protocoles en fusionnant nos deux principales thématiques MAC et Localisation pour proposer des contributions d'empilements protocolaires intégrés et des outils de validation correspondants. Un démonstrateur complet, incluant les protocoles MAC et Localisation décentralisés, économes en énergie permettrait de comparer ces contributions aux protocoles existants.
- Afin d'aller plus loin sur les méthodes de prototypage rapide, une perspective très intéressante et novatrice consisterait à étudier les possibilités d'intégration des langages de plus haut niveau, compilés, voire interprétés, dans le contexte embarqué. Nous avons effectivement regretté, en fin de premier chapitre, la lourdeur imposée par l'implémentation d'un nouveau protocole avec les outils actuels. Celle-ci est généralement très coûteuse en ressource de développement, essentiellement à cause des contraintes inhérentes aux langages de bas niveau utilisés dans l'embarqué, qui restent difficilement contournables aujourd'hui. Utiliser un langage de plus haut niveau permettrait à la fois d'élaborer un code simple et digeste, tout en profitant de nombreuses bibliothèques implémentant les algorithmes courants (solveurs, parcours de graphes, etc.). Pourtant, les récents travaux sur le langage Python, par exemple, montrent qu'il est possible d'exécuter du code Python sur des microcontrôleurs tels que ceux utilisés sur les nœuds des RCSF. Il serait donc intéressant d'étudier l'implémentabilité et l'utilisabilité d'un framework basé sur un tel langage, sur un microcontrôleur consommant moins de 50 mW au travail et permettant des cycles de veille réactifs tels que ceux qui sont imposés par les protocoles MAC dans les RCSF. Au delà des facilités accrues pour l'implémentation de nos protocoles de niveau 2 et 3, la disponibilité de bibliothèques courantes (chiffrement) et de protocoles de haut niveau (protocoles applicatifs...) permettrait de prototyper des solutions protocolaires plus complètes et plus proches de la réalité. Une telle faisabilité, couplée à des possibilités d'émulation ou de *co-simulation*, pourrait encore une fois améliorer la manière dont notre communauté envisage l'analyse des performances des protocoles.
- Sur les aspects purement Localisation, plus précisément sur le *ranging*, nous considérons que nous devons poursuivre nos études des liens sans ligne de vue (NLOS). Ces cas sont incontournables dans un déploiement réel; il est donc absolument nécessaire de les considérer. En situation NLOS, le signal est affaibli et ralenti par la traversée des matériaux faisant obstacle. Le temps de vol est alors augmenté, soit par la traversée directe du matériau, soit parce que le signal contourne l'obstacle et parcourt alors une distance plus grande. Il convient donc de détecter cette situation et, si possible, de la corriger. En l'état, nos jeux de données nous ont permis de détecter les situations de NLOS, dans certains cas, grâce à une observation de la répartition des rangings. En effet, en LOS et en situation d'immobilité des nœuds impliqués dans le *ranging*, la répartition des ToF est typiquement une gaussienne d'une largeur de quelques centimètres. Cette répartition change radicalement en

NLOS où apparaissent quasi systématiquement des groupes, pour chaque chemin multiple (*multi-path*) physique. Cette différence de répartition permet une détection simple de NLOS dès lors que le système dispose d'un nombre suffisamment élevé d'échantillons. Nous avons débuté un tel travail dans le cadre du projet POU CET, pour l'instant sans financement.

- Une autre perspective, sur la localisation, consisterait à améliorer la précision de *ranging*. Pour cela, l'une des possibilités consiste à corriger au mieux les dérives des horloges. En effet, dans nos travaux sur *Two-Way Ranging*, nous avons considéré (cf. 2.3.2.3.3) une première correction consistant à calquer l'horloge du nœud partenaire sur l'horloge du nœud à l'initiative du *ranging*. Cette correction permet de réduire l'erreur de *ranging* car les n estampilles sont ramenées dans le même référentiel. Cependant, si ce référentiel est lui-même entaché d'une erreur - et il n'y a aucune raison qu'il ne le soit pas - une erreur persiste. Dans cette perspective, nous avons cherché à réduire l'impact de cette erreur résiduelle en corrigeant l'une des horloges du réseau et en diffusant son écart aux autres nœuds, de proche en proche. Nous avons débuté un tel travail avec Dr. Réjane Dalcé dans le cadre du projet *Virtual Reference-Aware Synchronization* (ViRAS), pour l'instant sans financement.
- Le modèle ALO proposé en début de chapitre 2 devrait être totalement spécifié : spécification des modes d'échanges avec chaque niveau de l'empilement protocolaire, primitives des différents SAP, etc. Cependant, pour que l'échange entre ces différentes entités protocolaires locales soit efficace et le plus versatile possible, il faudrait permettre à ALO d'accéder à un maximum de messages échangés entre les couches adjacentes, à la manière d'un bus logiciel. Pour ce faire, il nous semblerait intéressant d'étudier une communication locale entre couches protocolaire et ALO via Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) : comme MQTT, AMQP permet de diffuser des messages entre agents ayant souscrit à un sujet (*topic*). De plus, comparé à MQTT, AMQP permet de mettre en file d'attente certains messages, ce qui pourrait être très intéressant dans le cas d'ALO, notamment pour injecter des informations relatives à la localisation dans les messages qui vont être émis par l'empilement protocolaire. Un premier *draft* d'implémentation devrait permettre d'évaluer l'intérêt de ce modèle. Au delà d'ALO, c'est le principe plus général de *cross-layering* qui pourrait être amélioré par AMQP dans de futures implémentations de piles protocolaires.

Enfin, nous pouvons également mentionner que, si le domaine des Télécommunications et Réseaux a beaucoup évolué sur la décennie concernée par ces travaux, c'est aussi et surtout de part l'usage qui est fait des technologies. Le réseau est désormais pleinement inscrit dans notre quotidien et, au delà des problématiques techniques, l'Internet des Objets et la notion de *donnée* dans le contexte IoT ouvrent de larges problématiques en Droit et en Sociologie qu'il est nécessaire de prendre en compte dans les projets de recherche. Ce volet n'est bien sûr pas au cœur de notre domaine d'expertise, mais nous souhaitons nous entourer de spécialistes pour l'intégrer à nos projets.

Enfin, et en guise de mot de fin, au delà de toutes ces considérations scientifiques, la Direction d'une activité de recherche demeure un travail passionnant que nous sommes conscient d'avoir la chance de pratiquer chaque jour.

Bibliographie

- [1] Wendi Rabiner Heinzelman, Joanna Kulik, and Hari Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '99, pages 174–185, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [2] G. J. Pottie. Wireless sensor networks. In *1998 Information Theory Workshop (Cat. No.98EX131)*, pages 139–140, Jun 1998.
- [3] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. J. Pottie. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5) :16–27, Oct 2000.
- [4] Site web de la Maison Intelligente de Blagnac. <http://mib.iut-blagnac.fr/>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [5] Adrien Van Den Bossche. *Proposition of a new deterministic medium access method for time-constrained wireless personal area networks*. Theses, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, July 2007.
- [6] Nicolas Fourty, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. An advanced study of energy consumption in an IEEE 802.15.4 based network : everything but the truth on 802.15.4 node lifetime. *Elsevier Computer Communications*, juin 2012.
- [7] D. De Guglielmo, A. Seghetti, G. Anastasi, and M. Conti. A performance analysis of the network formation process in IEEE 802.15.4e TSCH wireless sensor/actuator networks. In *2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6, June 2014.
- [8] S. Femmam and I. M. Benakila. A New Topology Time Division Beacon Construction Approach for IEEE802.15.4/ZigBee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. In *2016 IEEE 14th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 14th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 2nd Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress(DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech)*, pages 856–860, Aug 2016.
- [9] IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, pages 1–320, Sept 2006.
- [10] F. Sivrikaya and B. Yener. Time synchronization in sensor networks : a survey. *IEEE Network*, 18(4) :45–50, July 2004.

- [11] Ting Zhu, Ziguu Zhong, Yu Gu, Tian He, and Zhi-Li Zhang. Leakage-aware energy synchronization for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '09, pages 319–332, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [12] Kai-Chuang Huang and Kwang-Cheng Chen. Interference analysis of nonpersistent csma with hidden terminals in multicell wireless data networks. In *Proceedings of 6th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, volume 2, pages 907–911 vol.2, Sep 1995.
- [13] Saoucene Mahfoudh, Gerard Chalhoub, Pascale Minet, Michel Misson, and Ichrak Amdouni. Node coloring and color conflict detection in wireless sensor networks. *future internet*, 2(4) :469–504, 2010.
- [14] Domenico De Guglielmo, Giuseppe Anastasi, and Alessio Seghetti. *From IEEE 802.15.4 to IEEE 802.15.4e : A Step Towards the Internet of Things*, pages 135–152. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [15] Adrien van den Bossche, Thierry Val, and Eric Campo. Modelisation and Validation of a Full Deterministic Medium Access Method for IEEE 802.15.4 WPAN. *Elsevier Ad Hoc Networks*, pages 1285–1301, 2009.
- [16] IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2003*, pages 1–670, 2003.
- [17] Jose A. Gutierrez, Edgar H. Callaway, and Raymond Barrett. *IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks : Enabling Wireless Sensor Networks*. IEEE Standards Office, New York, NY, USA, 2003.
- [18] Site web du groupe IEEE Task Group 15.4b. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG4.html>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [19] Anis Koubâa, Mario Alves, Melek Attia, and Anneleen Van Nieuwenhuyse. Collision-Free Beacon Scheduling Mechanisms for IEEE 802.15.4/Zigbee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. 2007.
- [20] Gérard Chalhoub, Alexandre Guitton, and Michel Misson. MAC specifications for a WPAN allowing both energy saving and guaranteed delay - Part A : MaCARI : a synchronized tree-based MAC protocol. In *WSAN*, 2008.
- [21] Gérard Chalhoub. *MaCARI : une méthode d'accès déterministe et économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. (MaCARI : a deterministic energy efficient mac protocol for wireless sensor networks)*. PhD thesis, Blaise Pascal University, Clermont-Ferrand, France, 2009.
- [22] Adrien van den Bossche, Thierry Val, and Eric Campo. Proposition and validation of an original mac layer with simultaneous accesses for low latency wireless control/command applications. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2) :11576 – 11581, 2008. 17th IFAC World Congress.
- [23] Jeffrey M. Gilbert, Won-Joon Choi, and Qinfang Sun. Mimo technology for advanced wireless local area networks. In *Proceedings of the 42Nd Annual Design Automation Conference*, DAC '05, pages 413–415, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [24] D. Rejane, A. van den Bossche, and V. Thierry. Optimization of a csma/ca based mac protocol designed for confined wsns. In *2012 International Conference on Wireless Communications in Underground and Confined Areas*, pages 1–4, Aug 2012.

- [25] Gérard Chalhoub, Erwan Livolant, Alexandre Guitton, Adrien van den Bossche, Michel Misson, and Thierry Val. Specifications and evaluation of a MAC protocol for a LP-WPAN. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 7(1-2) :69–89, 2009.
- [26] Juan Lu. *Modeling, simulation and implementation of an 802.15.4 based adaptive communication protocol in wireless sensor network : application to monitoring the elderly at home*. Theses, INSA de Toulouse, February 2013.
- [27] Juan Lu, Adrien Van den Bossche, and Eric Campo. An IEEE 802.15.4 Based Adaptive Communication Protocol in Wireless Sensor Network : Application to Monitoring the Elderly at Home. *Wireless Sensor Network*, 6 :192–204, septembre 2014.
- [28] Vidéo de démonstration d’ADCF à la MIB. http://irit.fr/~Adrien.Van-Den-Bossche/adcf_application_demonstration_video_v2.flv. [accédé le 13 décembre 2018].
- [29] Juan Lu, Adrien Van den Bossche, and Eric Campo. A New Beacon Scheduling Mechanism for Mesh Wireless Personal Area Networks based on IEEE 802.15.4. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Toulouse, 05/09/2011-09/09/2011*, septembre 2011.
- [30] Juan Lu, Adrien Van den Bossche, and Eric Campo. Enabling Guaranteed Beacon and Data Slots in Multi-hop Mesh Sensor Networks for Home Health Monitoring. In *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC), Venice, Italy, 24/06/2012-29/06/2012*, juin 2012.
- [31] Oana Andreea Hotescu, Katia Jaffres-Runser, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Synchronizing Tiny Sensors with SISP : a Convergence Study. In *ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Miami Beach, USA, 21/11/2017-25/11/2017*, novembre 2017.
- [32] Adrien Van den Bossche, Nicolas Fourty, and Jean-Paul Jamont. A Trusted Lightweight Synchronisation Protocol for Wireless Ad-hoc Networks. In *CIVEMSA IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Application, Annecy, France, 26/06/2017-28/06/2017*, juin 2017.
- [33] Adrien Van den Bossche, Thierry Val, and Rejane Dalce. SISP : a lightweight Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks (short paper). In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Toulouse, France, septembre 2011*.
- [34] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pages 1–314, Sept 2011.
- [35] Jean-Paul Jamont, Michel Ocelllo, and Eduardo Mendes. *Decentralized Intelligent Real World Embedded Systems : A Tool to Tune Design and Deployment*, pages 133–144. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [36] Jean-Paul Jamont and Michel Ocelllo. Meeting the challenges of decentralised embedded applications using multi-agent systems. *Int. J. Agent-Oriented Softw. Eng.*, 5(1) :22–68, January 2016.
- [37] L. Iannone, R. Khalili, K. Salamatian, and S. Fdida. Cross-layer routing in wireless mesh networks. In *1st International Symposium on Wireless Communication Systems, 2004.*, pages 319–323, Sept 2004.
- [38] Devu Manikantan Shila and Tricha Anjali. Load aware traffic engineering for mesh networks. *Computer Communications*, 31(7) :1460 – 1469, 2008. Special Issue : Resource Management and routing in Wireless Mesh Networks.

- [39] Site web de Tetaneutral. <http://www.tetaneutral.net/>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [40] Site web de Toulouse Sans Fil. <http://www.toulouse-sans-fil.net/>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [41] Chiraz Houaidia, Hanen Idoudi, Adrien van den Bossche, Leila Azouz Saidane, and Thierry Val. Inter-flow and intra-flow interference mitigation routing in wireless mesh networks. *Elsevier Computer Networks*, 2017.
- [42] Sabri Khssibi, Hanen Idoudi, Adrien Van den Bossche, Thierry Val, and Leila Azzouz Saidane. Presentation and analysis of a new technology for low-power wireless sensor network. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications*, 3(1), 2013.
- [43] Site web de FIT/IoT-LAB. <https://www.iot-lab.info/hardware/>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [44] Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. OpenWiNo : An Open Hardware and Software Framework for Fast-Prototyping in the IoT. In *International Conference on Telecommunications, Thessaloniki, greece, 16/05/2016-18/05/2016*, mai 2016.
- [45] S. Palchaudhuri, A. K. Saha, and D. B. Johns. Adaptive clock synchronization in sensor networks. In *Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2004. IPSN 2004*, pages 340–348, April 2004.
- [46] Hyojung Lee, Wonpil Yu, and Youngmi Kwon. Efficient rbs in sensor networks. In *Third International Conference on Information Technology : New Generations (ITNG'06)*, pages 279–284, April 2006.
- [47] R. Stoleru and J. A. Stankovic. Probability grid : a location estimation scheme for wireless sensor networks. In *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004.*, pages 430–438, Oct 2004.
- [48] Site web du Fablab Fritzing. <http://fab.fritzing.org/>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [49] Site web de WiNo. <https://wino.cc>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [50] Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. Plateforme de prototypage rapide d'objets connectés avec la famille WiNo* - Enabling Fast-prototyping of Connected Things using the WiNo* family. *ISTE OpenScience - Internet des objets*, mars 2017.
- [51] Site web du projet Ophelia. <https://www.irit.fr/~Adrien.Van-Den-Bossche/projet-ophelia>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [52] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, and N. Strachan. Evaluation of lora and lorawan for wireless sensor networks. In *2016 IEEE SENSORS*, pages 1–3, Oct 2016.
- [53] Martin Bor, John Edward Vidler, and Utz Roedig. *LoRa for the Internet of Things*, pages 361–366. Junction Publishing, 2 2016.
- [54] Chong Liu, Kui Wu, and Tian He. Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator. In *2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE Cat. No.04EX975)*, pages 516–518, Oct 2004.
- [55] K. A. Horváth, G. Ill, and Á. Milánovich. Passive extended double-sided two-way ranging algorithm for uwb positioning. In *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 482–487, July 2017.

- [56] C. Liu and K. Wu. Performance evaluation of range-free localization methods for wireless sensor networks. In *PCCC 2005. 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2005.*, pages 59–66, April 2005.
- [57] M. Singh, S. K. Bhoi, and P. M. Khilar. Geometric constraint-based range-free localization scheme for wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 17(16) :5350–5366, Aug 2017.
- [58] Rejane Dalce. *Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur*. Thèse de doctorat, INSA Toulouse - EDSYS - Laboratoires LATTIS puis IRIT, juin 2013. (Soutenance le 26/06/2013).
- [59] Linqing Gui. *Amélioration de la Localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil par Méthodes "Range-free"*. Thèse de doctorat, INSA Toulouse - EDSYS - Laboratoires LATTIS puis IRIT, février 2013. (Soutenance le 13/02/2013).
- [60] S. Lanzisera, D. T. Lin, and K. S. J. Pister. Rf time of flight ranging for wireless sensor network localization. In *2006 International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems*, pages 1–12, June 2006.
- [61] Dépôt Git du DecaWiNo. <https://github.com/winocc/DecaWiNo-board>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [62] Site web de DecaDuino. <https://www.irit.fr/~Adrien.Van-Den-Bossche/decaduino/>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [63] Rejane Dalce, Thierry Val, and Adrien Van den Bossche. Comparison of Indoor Localization Systems based on Wireless Communications. *Wireless Engineering and Technology*, 2 No 4, octobre 2011.
- [64] Xiaoli Li, Hongchi Shi, and Yi Shang. A partial-range-aware localization algorithm for ad-hoc wireless sensor networks. In *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, pages 77–83, Nov 2004.
- [65] R. P and M. L. Sichitiu. Angle of arrival localization for wireless sensor networks. In *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, volume 1, pages 374–382, Sept 2006.
- [66] C. Wang, W. Han, Q. Yin, W. Wang, and J. Chen. A distributed localization system based on phase measurement for wireless sensor networks. In *2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, volume 1, pages 505–508, April 2009.
- [67] Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Une plateforme de prototypage évolutive pour la localisation dans un réseau IEEE 802.15.4a CSS. In *Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), Grenoble, 04/07/2012-06/07/2012*, page (support électronique), <http://www.ieee.org/>, juillet 2012. IEEE.
- [68] Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Towards a new range-based localization method for WSNs : Challenges, Constraints and Correction. In *IEEE International Conference on Wireless Communications in Unusual and Confined Areas (ICWCUCA), Clermont-Ferrand, France, 28/08/2012-30/08/2012*, 2012. (distinction décernée : Best Paper).
- [69] Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Indoor Self-Localization in a WSN, based on Time Of Flight : Propositions and Demonstrator. In *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Montbelliard, 28/10/2013-31/10/2013*, 2013.

- [70] Vidéo de démonstration de MiLOC à la MIB. <https://www.irit.fr/~Thierry.Val/video/demo.mp4>. [accédé le 13 décembre 2018].
- [71] Tingcong Ye, Michael Walsh, Peter Haigh, John Barton, Alan Mathewson, and Brendan O’Flynn. An experimental evaluation of IEEE 802.15.4a ultra wide band technology for precision indoor ranging. *Int. J. Ambient Comput. Intell.*, 4(2) :48–63, April 2012.
- [72] Dries Neiryck, Marcas O’Duinn, and Ciaran McElroy. Characterisation of the NLOS performance of an IEEE 802.15.4a receiver. In *12th Workshop on Navigation, Positioning and Communications (WPNC)*, 2015.
- [73] 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), Toulouse, 23/03/2016-25/03/2016*, mars 2016.
- [74] Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. A study of the ranging error for Parallel Double Sided-Two Way Ranging protocol. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Montréal, Canada, 18/09/2016-21/09/2016*, 2016.
- [75] Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Reducing localisation overhead : a ranging protocol and an enhanced algorithm for UWB-based WSNs. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Glasgow, Scotland, 11/05/2015-14/05/2015*, 2015.
- [76] H. Kim. Double-sided two-way ranging algorithm to reduce ranging time. *IEEE Communications Letters*, 13(7) :486–488, July 2009.
- [77] Rejane Dalce, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. An experimental performance study of an original ranging protocol based on an IEEE 802.15.4a UWB testbed. In *IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), Paris, 01/09/2014-03/09/2014*, 2014.
- [78] Nezo Ibrahim Fofana, Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. Prototypage et analyse de performances d’un système de ranging pour une localisation par UWB. In *Colloque Francophone sur l’Ingénierie des Protocoles (CFIP), Paris, 22/07/2015-24/07/2015*, juillet 2015.
- [79] Nezo Ibrahim Fofana, Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. An Original Correction Method for Indoor Ultra Wide Band Ranging-based Localisation System. In *International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless (AdHoc-Now), Lille (France), 04/07/2016-06/07/2016*, juillet 2016.
- [80] Jeremy Eric Elson, Mario Gerla, Gerald J. Poplek, Gregory J. Pottie, Majid Sarrafzadeh, Deborah L. Estrin, and Committee Chair. Time synchronization in wireless sensor networks, 2003.
- [81] François Despaux, Adrien Van den Bossche, Katia Jaffres-Runser, and Thierry Val. Projet GUINNESS - rapport scientifique. Rapport de recherche, IRIT, Université Paul Sabatier, Toulouse, mars 2017.
- [82] François Despaux Rossi, Katia Jaffres-Runser, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Accurate and Platform-agnostic Time-of-flight Estimation in Ultra-Wide Band. In *IEEE International Conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, Spain, 04/09/2016-07/09/2016*, septembre 2016.
- [83] Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, François Despaux, Katia Jaffres-Runser, Ludovic Tancerel, and Thierry Val. Méthode de synchronisation de noeuds dans un réseau de capteurs sans fil. Diffusion scientifique, juin 2017.

- [84] François Despaux, Adrien Van den Bossche, Katia Jaffres-Runser, and Thierry Val. N-TWR : An Accurate Time-of-flight-based N-ary Ranging Protocol for Ultra-Wide Band. En navette 2017.
- [85] Marie Chan, Daniel Estève, Christophe Escriba, and Eric Campo. A review of smart homes—present state and future challenges. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 91(1) :55 – 81, 2008.
- [86] E Campo, D Estève, and M Chan. Conception d’un habitat adapté pour l’aide à l’autonomie des personnes âgéesdesigning a suitable home for elderly assisted living. *Les cahiers de l’année gérontologique*, 4(4) :356–363, 2012.
- [87] Bessam Abdulrazak, Sylvain Giroux, Bruno Bouchard, Mounir Mokhtari, and Hélène Pigot. *Towards Useful Services for Elderly and People with Disabilities* ;, volume 6719. Springer Science & Business Media, 2011.
- [88] U. Hunkeler, H. L. Truong, and A. Stanford-Clark. Mqtt-s : A publish/subscribe protocol for wireless sensor networks. In *Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. 3rd International Conference on*, pages 791–798, Jan 2008.
- [89] N. Tantitharanukul, K. Osathanunkul, K. Hantrakul, P. Pramokchon, and P. Khoenkaw. Mqtt-topic naming criteria of open data for smart cities. In *2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, pages 1–6, Dec 2016.
- [90] J. Lohokare, R. Dani, A. Rajurkar, and A. Apte. An iot ecosystem for the implementation of scalable wireless home automation systems at smart city level. In *TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference*, pages 1503–1508, Nov 2017.
- [91] A. Del Campo, E. Gambi, L. Montanini, D. Perla, L. Raffaelli, and S. Spinsante. Mqtt in aal systems for home monitoring of people with dementia. In *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–6, Sept 2016.
- [92] Charles Gouin-Vallerand, Bessam Abdulrazak, Sylvain Giroux, and Mounir Mokhtari. A self-configuration middleware for smart spaces. *Journal of Smart Home*, 3(1), 2009.
- [93] Adrien Van den Bossche and Frédéric Vella. Une plateforme d’expérimentation pour les systèmes d’interaction destinés aux personnes en situations de handicap. In *Journées francophones Mobilité et Ubiquité (UbiMob)*, Nancy, France, juin 2013.
- [94] Frédéric Vella, Nadine Vigouroux, Adrien Van den Bossche, Eric Campo, Blandine Boudet, and Pierre Rumeau. Etude de l’ACcessibilité de l’interaction dans une Maison Intelligente par des personnes fragilisées pour une meilleure autonomie à domicile. In *Journées Annuelles de la Société Française de Gériatrie et Gérontologie (JASFGG)*, Paris, France, octobre 2013.
- [95] Eric Campo, Adrien Van den Bossche, Nadine Vigouroux, Frédéric Vella, Xavier Daran, Edyta Osuch, Jean-Claude Marquié, Isabelle Etcheverry, and Pierre Rumeau. Déploiement et expérimentation d’un système socio-technique pour la surveillance des activités comportementales de personnes en perte d’autonomie dans un habitat intelligent. In *Workshop - Alzheimer, Approche pluridisciplinaire - De la recherche clinique aux avancées technologiques*, Toulouse, France, 25/01/2013, janvier 2013.
- [96] Adrien Van den Bossche, Eric Campo, Nadine Vigouroux, and Frédéric Vella. Réseau de capteurs sans fil distribués pour le monitoring des activités de vie au sein d’une maison intelligente. In *Journées francophones Mobilité et Ubiquité (UbiMob)*, Sophia Antipolis, France, juin 2014.

- [97] Meriem Horchani, Dominique Fréard, Benjamin Caron, Eric Jamet, Laurence Nigay, and Franck Panaget. Stratégie de dialogue et de présentation multimodale : un composant logiciel dédié et son application à des expérimentations en magicien d’oz. In *Conférence IHM 2007, 19ème Conférence francophone sur l’interaction homme-machine*, 2007. Paris 13-15 novembre 2007.
- [98] Marcos Serrano and Laurence Nigay. OpenWizard : Une approche pour la création et l’évaluation rapide de prototypes multimodaux. In *proc. IHM’09, 21ème Conférence Francophone sur l’Interaction Homme-Machine*, pages 101–109, Grenoble, France, 2009. ACM New York, NY, USA.
- [99] Thierry Baccino, Catherine Bellino, and Teresa Colombi. Mesure de l’utilisabilité des Interfaces. *Hermès Science - Lavoisier*, pages 1–250, 2005.
- [100] Nadine Vigouroux, Adrien Van den Bossche, Frédéric Vella, Eric Campo, Mathilde Blanc Machado, and Thierry Val. MIOZ : a Wizard of Oz platform to design ambient technologies (poster). In Frédérique Frouin, Véronique Migonney, and Catherine Marque, editors, *Recherche en Imagerie et Technologies pour la Santé (RITS), Dourdan, France*, mars 2015.
- [101] Frédéric Vella, Mathilde Blanc Machado, Nadine Vigouroux, Adrien Van den Bossche, and Thierry Val. Connexion du Middleware MiCom avec l’interface tactile InTacS pour le contrôle d’une smart home. In *Journées francophones Mobilité et Ubiquité (UBIMOB), Lorient, France, 05/07/2016-05/07/2016*, juillet 2016.
- [102] Adrien Van den Bossche, Eric Campo, Jenny Duchier, Elizabeth Bougeois, Mathilde Blanc Machado, Thierry Val, Frédéric Vella, and Nadine Vigouroux. Multidimensional observation methodology for the elderly in an ambient digital environment. In *International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP), Linz, Austria*, juillet 2016.
- [103] Elizabeth Bougeois, Jenny Duchier, Frédéric Vella, Mathilde Blanc Machado, Adrien Van den Bossche, Thierry Val, Nadine Vigouroux, and Eric Campo. Post-test perceptions of digital tools by the elderly in an ambient environment. In *International Conference On Smart homes and health Telematics (ICOST), Wuhan, China*, mai 2016.
- [104] Adrien Van den Bossche, Mathilde Blanc Machado, Thierry Val, Frédéric Vella, and Nadine Vigouroux. Utilisation des noeuds WiNoIR pour connecter tous les équipements domotiques d’un habitat intelligent (poster). In *Journée Nationale de l’Internet des Objets - Nouveaux défis de l’Internet des Objets : Interaction Homme-Machine et Facteurs Humains, Paris-Saclay, France*, novembre 2016.
- [105] C. Pham. Towards quality of service for long-range iot in unlicensed radio spectrum. In *2016 Wireless Days (WD)*, pages 1–3, March 2016.
- [106] Adrien Van den Bossche, Rejane Dalce, and Thierry Val. Utilisation de la plateforme pédagogique OpenWiNo pour la pédagogie par projets en IUT RT. In *Workshop Pédagogique Réseaux et Télécoms (WPR&T), St Pierre de La Réunion, 17/11/2014-21/11/2014*, page (support électronique), <http://neticien.fr/>, novembre 2014. IUT Réseaux & Télécoms.
- [107] Protocoles pour les travaux pratiques IoT de l’IUT de Blagnac. https://iot.iut-blagnac.fr/doku.php?id=protocole_introduction. [accédé le 13 décembre 2018].

Glossaire

- 2M-TWR** *Two-Messages Two-Way Ranging*. 90–92, 94, 97, 99, 107, 112, 134
- ADCF** *Adaptive and Distributed Collision-Free MAC Protocol*. 12, 22–30, 32, 37, 38, 40, 43, 49, 51, 63, 64, 77, 116, 120, 121, 129, 132, 147
- ALO** *Abstracted Localisation Object*. 69, 70, 77, 92–94, 111, 112, 132, 134, 136
- AMQP** *Advanced Message Queuing Protocol*. 136
- AoA** *Angle of Arrival*. 72
- BB-TWR** *Broadcast Based-Two-Way Ranging*. 12, 95–99, 105, 107, 112, 134
- BOP** *Beacon Only Period*. 17, 23–25, 27, 30
- CAP** *Contention Access Period*. 16, 18, 22, 40, 41
- CdD** *Contrôleur de Dialogue*. 123, 124, 127
- CFP** *Contention Free Period*. 16, 22, 40, 41
- CSS** *Chirp Spread Spectrum*. 70, 82, 87, 93
- DIY** *Do-It Yourself*. 51, 53
- FTSP** *Flooding Time Synchronization Protocol*. 37, 64
- GNSS** *Global Navigation Satellite System*. 68, 133
- GTS** . 16, 18, 19, 22, 23, 28, 40, 41, 64
- IAL-RCSF** *Intégration d'Algorithmes de Localisation dans un Réseau de Capteurs Sans Fil*. 70, 71, 83, 87, 88, 90, 92, 93
- IoT** *Internet of Things*. 12–14, 47, 48, 53, 57, 58, 60, 62–64, 132, 136
- iRingLA** *inter Ring Localization Algorithm*. 79, 80, 87, 92, 94, 116
- LOS** *Line Of Sight*. 84–86, 90, 109, 111, 112, 135

MAC *Medium Access Control*. 6, 10–15, 17, 18, 22, 25, 26, 28, 32, 34, 36, 38, 40–47, 49, 50, 52, 53, 63, 64, 71, 83, 90, 93, 94, 96, 99, 100, 109, 111, 118, 120, 123, 124, 129, 132, 133, 135

MQTT *Message Queuing Telemetry Transport*. 118, 136

NLOS *Non-Line Of Sight*. 84–86, 109, 112

ODS-UWB *On-Demand Synchronisation Protocol for UWB-based WSNs*. 101–105, 107–109, 112, 134

Overhead Surcharge protocolaire. 6

PDS-TWR *Parallel Double Sided Two-Way Ranging*. 75–78, 81, 82, 87–89, 92, 93, 105, 112, 116

QoS *Quality of Service*. 6, 40

RBS *Reference Broadcast Time Synchronisation*. 37, 49, 64

RCSF Réseaux de Capteurs Sans Fil. 12, 13, 38, 39, 47, 53, 133–135

RSSI *Received Signal Strength Indication*. 19, 20, 72, 73

SAP *Service Access Point*. 136

SATT Société d'Accélération du Transfert de Technologies. 7, 13, 50

SDS-TWR *Symmetrical Double Sided Two-Way Ranging*. 72, 74, 76, 77, 85, 86, 90

SGTS *Simultaneous Garanted Time Slot*. 12, 18–20

SiSP *Simple Synchronisation Protocol*. 12, 32, 34–37, 49, 63–65, 77, 109, 123, 134

SSDS-TWR *Sequential Symmetric Double Sided Two-Way Ranging*. 75–77, 81, 82, 93

TD *Time Division*. 17

TD_{oA} *Time Difference of Arrival*. 72

ToA *Time of Arrival*. 72

ToF *Time of Flight*. 72, 134, 135

TWR *Two-Way Ranging*. 72, 136

UWB *Ultra-Wide Band*. 133

ViRAS *Virtual Reference-Aware Synchronization*. 112, 136

WSN *Wireless Sensor Network*. 3, 9, 11, 12, 17, 36, 47, 64, 75, 79, 81, 101, 111, 123

Annexe A

Liens entre recherche et activités d'enseignement

D'abord conçu pour nos activités de recherche, nous avons rapidement tenté d'utiliser nos outils développés dans un contexte pédagogique, sous forme de travaux pratiques ou de projets tuteurés, pour tous les niveaux post-baccalauréat. Cet annexe présente cette démarche et les différentes expériences avec les publics concernés.

A.1 Projets d'étudiants

En l'absence de développeur sur le projet OpenWiNo (non financé), nous avons développé nous-mêmes le cœur d'OpenWiNo. Cependant, nous avons pu confier le développement de certains protocoles à des étudiants, essentiellement dans le cadre de projets tuteurés. Dans cette partie, nous présentons ces différentes expériences.

A.1.1 Développement de protocoles sous OpenWiNo

L'un des premiers travaux réalisés avec OpenWiNo fût l'implémentation du protocole ADCF (*Adaptive and Distributed Collision-Free MAC Protocol*) imaginé dans le cadre de la thèse de Mlle Juan Lu. Alors que Juan avait implémenté une première version du protocole sous le logiciel de simulation réseau OPNET, nous avons confié les algorithmes à une équipe d'étudiants du département informatique de l'IUT de Blagnac, dans le cadre de leur projet tuteuré de seconde année, avec pour mission d'implémenter ces algorithmes dans l'environnement « *WiNoEmu* ». Cette étape intermédiaire permettait aux étudiants de programmer en Langage C dans un environnement connu (GNU/Linux) sans se heurter directement aux problématiques du développement sur cible embarquée (pas de carte électronique, pas de sonde JTAG pour la reprogrammation, etc.). Cependant, nous leur avons imposé des contraintes fortes sur le code (limitation de la RAM, pas de code bloquant, etc.) de manière à faciliter le futur passage à l'environnement réel sur nœuds embarqués.

Cette étape validée, nous avons recruté l'un des étudiants de l'équipe projet en stage, M. Vincent Bragard, qui a été chargé de terminer le travail dans l'environnement « *WiNoTB* », ce qui a pu être réalisé en seulement quelques journées. Le reste du stage a permis à Juan et Vincent de constater l'impact réel du sans fil sur les protocoles et les algorithmes, avec de nombreuses difficultés gommées ou amoindries

en simulation : présence systématique de liens asymétriques, absence de synchronisation implicite par le simulateur, taux de perte trame fortement variables, etc.

Après le succès de l'implémentation et de l'utilisation d'ADCF, nous avons reproduit l'expérience avec plusieurs protocoles de référence pour permettre une future comparaison de nos contributions avec des protocoles connus :

- AODV, protocole de routage *mesh* réactif, confié à des étudiants du département R&T de l'IUT de Blagnac,
- DV-HOP, protocole de localisation *range-free*, confié à des étudiants du département Informatique de l'IUT de Blagnac.

Les protocoles sont opérationnels dans l'environnement OpenWiNo historique.

A.1.2 Développement d'une IHM pour le testbed

Parallèlement aux activités de développement du coeur d'OpenWiNo, nous avons également développé une première version de notre infrastructure *testbed* qui a ensuite été reprise dans le projet Ophelia (cf. §1.3.5.2.4). Cette infrastructure opérationnelle, nous avons confié le développement d'une IHM web à des étudiants de Master « Informatique Collaborative en Entreprise » (ICE) dans le cadre de leur projet tuteuré. Une première interface a été développée puis améliorée. Elle permettait la représentation temps réel de la topologie du réseau, l'interrogation des noeuds via le réseau de supervision (affichage des tables de voisinage, tables de routage, etc.) et l'injection de firmwares sur les nœuds sélectionnés. La figure A.1 présente une capture d'écran de cette interface.

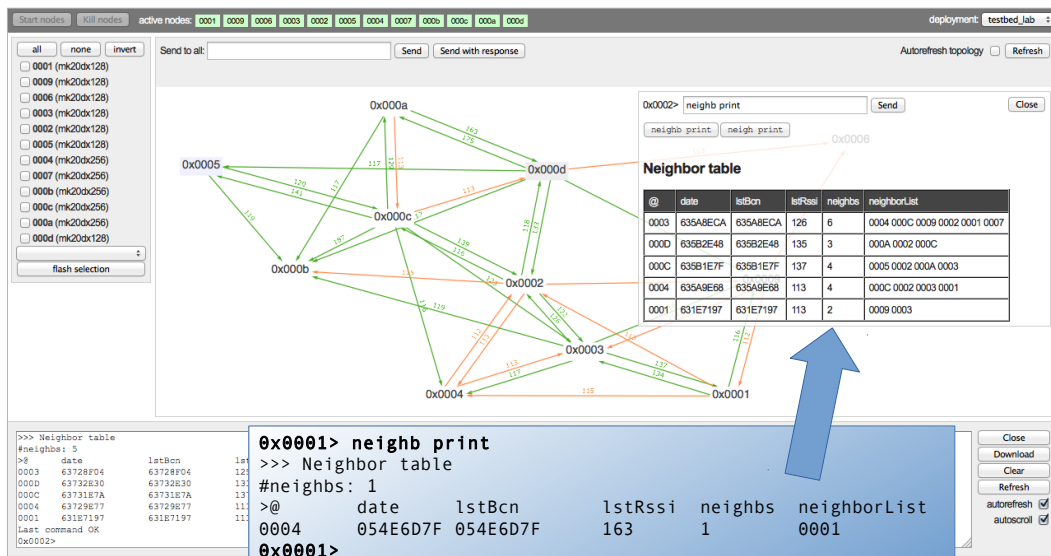


FIGURE A.1 – Interface Web pour le contrôle et l'exploitation du *testbed*

A.2 WiNo/OpenWiNo dans l'enseignement

A.2.1 Développement d'applications informatiques pour les R&T

Module de développement de protocoles de communication sans fil de niveau 2 (MAC-LLC) et 3 (Routage) pour les étudiants de seconde année DUT R&T dans le cadre du module 4207C. Module monté avec Thierry Val en 2015.

Dans ce module, l'enseignement se pratique en TD-TP, où les étudiants sont chargés d'implémenter progressivement deux protocoles :

- Un protocole de niveau L2 de type DATA+ACK, avec implémentation de la MAC, des retransmissions, de l'adressage et de la détection d'erreur,
- Un protocole de niveau L3 permettant un routage par inondation.

Le développement est fait progressivement, sous forme de *Sprints* Agiles fonctionnalité par fonctionnalité. Pour le protocole L3 par exemple, la première étape consiste d'abord à implémenter une première version entraînant une *tempête de broadcast*, puis à ajouter, petit-à-petit, les différents filtres (adresse source, numéro de séquence, etc.) permettant d'arriver à une version utilisable du protocole.

Cette activité pédagogique a été présentée lors de l'assemblée des chefs de Département R&T et a fait l'objet d'une publication [106] au Workshop Pédagogique Réseaux et Télécoms (WPR&T) organisé par les départements R&T d'IUT.

A.2.2 Initiation à l'Informatique Embarquée

Module d'introduction à l'embarqué, destiné aux étudiants de seconde année de DUT Informatique. Utilisation du TeensyWiNo comme matériel pour les TP d'introduction aux MCUs, développement d'algorithmes de traitement des données de capteurs et communication sans fil par utilisation du transceiver RFM22b. Module monté avec Rémi Boulle en 2015.

L'objectif de ce module est de confronter les étudiants aux difficultés du développement embarqué. Pour les illustrer, nous avons proposé plusieurs développements orientés RCSF/IoT :

- Implémentation d'une L2 simple (adressage et acquittement) via une MEF,
- Implémentation d'un protocole d'échange avec une infrastructure « LoRa-like » déployée sur l'IUT.

L'usage des microcontrôleurs étant assez austère pour les étudiants du département Informatique, nous avons choisi d'orienter quelques travaux pratiques sur l'IoT, afin de mettre les étudiants dans une situation concrète. Pour ce faire, nous avons développé, avec Nicolas Gonzalez, une infrastructure de collecte constituée de passerelles physique (Raspberry Pi et Chistera Pi), d'un bus MQTT et de plusieurs scripts python. Dans ces TP, les étudiants sont chargés de développer le code générant les messages sur le TeensyWiNo en respectant les protocoles propriétaires documentés sur [107]. Une fois le message émis par le WiNo, il est reçu (ou non) par une ou plusieurs passerelles du réseau et transmis sur un bus MQTT. Sur ce bus sont connectés plusieurs agents (codés en python) chargés d'interpréter chaque niveau protocolaire des messages reçus par l'infrastructure, republiant sur le bus après chaque décodage : le bus étant accessible en lecture aux étudiants, le décodage du protocole peut-être suivi en direct, voire intercepté pour un traitement différent ! La figure A.2 illustre cette infrastructure IoT développée et déployée sur

l'IUT de Blagnac. La figure A.3 permet de visualiser les différents messages véhiculés sur le bus MQTT pour une information de luminosité émise par le TeensyWiNo d'adresse 175 et reçue par la passerelle 145; on y retrouve, en couleur, les points d'échanges intermédiaires jaune, vert et bleu de la figure A.2. La couche `influxdb`, en blanc sur la trace de la figure A.3, est la sortie de la couche application avant stockage dans la base de données.

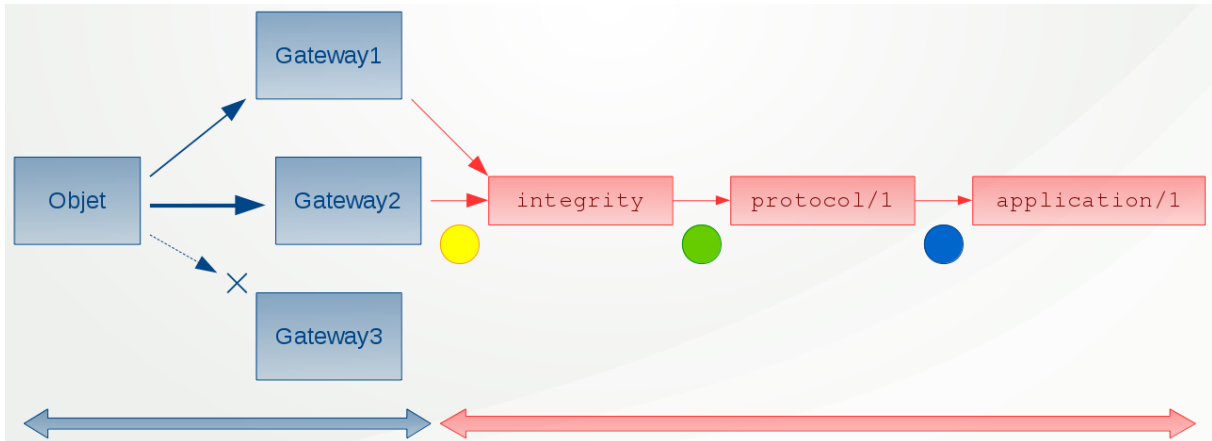


FIGURE A.2 – Architecture réseau `iot.iut-blagnac.fr`

```
gateway/192.168.233.145/rx
  physical_layer {'gateway': '192.168.233.145', 'frequency': 434.0, 'SDU': '5a010200af00021c0000b242', 'rssi': -88}
protocol/1
  physical_layer {'gateway': '192.168.233.145', 'frequency': 434.0, 'SDU': '5a010200af00021c0000b242', 'rssi': -88}
  integrity_layer {'SDU': '0200af00021c0000b242', 'protocol_id': 1, 'header': 90}
application/2
  physical_layer {'gateway': '192.168.233.145', 'frequency': 434.0, 'SDU': '5a010200af00021c0000b242', 'rssi': -88}
  integrity_layer {'SDU': '0200af00021c0000b242', 'protocol_id': 1, 'header': 90}
  protocol_layer {'source_address': 175, 'seq_number': 2, 'application_id': 2, 'SDU': '1c0000b242'}
node/175
  physical_layer {'gateway': '192.168.233.145', 'frequency': 434.0, 'SDU': '5a010200af00021c0000b242', 'rssi': -88}
  integrity_layer {'SDU': '0200af00021c0000b242', 'protocol_id': 1, 'header': 90}
  protocol_layer {'source_address': 175, 'seq_number': 2, 'application_id': 2, 'SDU': '1c0000b242'}
influxdb/
  physical_layer {'gateway': '192.168.233.145', 'frequency': 434.0, 'SDU': '5a010200af00021c0000b242', 'rssi': -88}
  influxdb {'measurement': 'student', 'fields': {'lum1': 89.0}, 'IP': '192.168.233.248', 'database': 'IUT', 'port': 8086, 'tags':
{'gateway': '192.168.233.145', 'frequency': 434.0, 'node_address': 175, 'rssi': -88}}
  integrity_layer {'SDU': '0200af00021c0000b242', 'protocol_id': 1, 'header': 90}
  protocol_layer {'source_address': 175, 'seq_number': 2, 'application_id': 2, 'SDU': '1c0000b242'}
```

FIGURE A.3 – Trace MQTT sur une donnée de luminosité émise par le TeensyWiNo 175

A.2.3 MOOC/SPOC Objets Connectés

Déclinaison sous forme d'un MOOC et d'un SPOC du module « Développement d'applications informatiques pour les R&T » présenté ci-dessus.

Dans le cadre de la Formation Continue de l'IUT A de Toulouse, nous avons été invité à participer à la création d'un module de formation de type MOOC/SPOC sur les objets connectés, sur un appel IDEX, plus précisément sur les aspects protocoles pour les OC. Nous avons proposé d'y contribuer sur la base du module réalisé en R&T, incluant des travaux pratiques réalisables à distance via le *testbed* présent sur le site de l'IUT de Blagnac.

A.2.4 Protocoles de synchronisation (M2IOT UT/INSA/N7)

Module de développement de protocoles de synchronisation fine et synchronisation MAC pour les étudiants de M2-IoT de l'Université de Toulouse et des étudiants de troisième année du département TR de l'ENSEEIH (Toulouse). Module monté avec Katia Jaffres-Runser en 2018.

Suite à notre collaboration avec Katia Jaffres-Runser, MCF au département TR de l'ENSEEIH, sur le projet GUINNESS (cf. §2.3.4), nous avons créé un module de formation où les étudiants sont chargés d'implémenter des protocoles de synchronisation MAC et synchronisation fine, dans le but de les sensibiliser aux problématiques de synchronisation dans les réseaux sans fil. Les TP sont réalisés avec le DecaWiNo, ce qui permet également aux étudiants de manipuler une couche physique UWB.

Là encore, le développement est fait progressivement, sous forme de *Sprints* Agiles fonctionnalité par fonctionnalité.

Résumé/abstract

Résumé : Alors que le domaine des réseaux sans fil (Réseaux de Capteurs Sans Fil, réseau de collecte de l'Internet des Objets) connaît un nouveau bouleversement de part les nombreuses technologies émergentes (Ultra-Narrow Band, Ultra-Wide Band...), la recherche en Réseaux et Protocoles s'ouvre à de nouvelles méthodologies et se donne de nouveaux objectifs. L'analyse de performances par maquetage/testbed est désormais une pratique répandue, qui peut générer des résultats très pertinents si elle est pratiquée convenablement ; de nouveaux challenges, comme la localisation des nœuds mobiles directement par l'empilement protocolaire, peuvent également être envisagés. Les travaux de recherche présentés dans cette HDR portent d'une part sur les couches d'accès au médium (protocoles MAC à rendez-vous, économie d'énergie, synchronisation, déterminisme d'accès au médium) et d'autre part sur les « protocoles de Ranging », qui permettent de fournir des informations de distance entre nœuds sans fil par mesure du temps de vol radio, permettant de les localiser. Une des particularités de ces travaux est de toujours envisager une évaluation des performances des protocoles proposés par prototypage réel C'est ainsi que plusieurs outils matériels et logiciels ont été développés pour réaliser les études de performances dans des conditions adéquates (maîtrise de l'environnement de test, reproductibilité), jusqu'à une instanciation de certains de ces travaux sur des cas d'usage réels, dans le contexte des habitats intelligents.

Abstract : We are currently witnessing a major upheaval in the scientific field of Wireless Networks (Wireless Sensor Networks, Device-Layer of the Internet of Things) due to the many emerging communication technologies (Ultra-Narrow Band, Ultra-Wide Band...). The scientific community is opening up to new methodologies and is setting new objectives. Testbeds are commonly used for performance analysis of the new networking protocols and can generate relevant results if the testbed is properly used. New challenges can also be considered - such as locating mobile nodes by the only use of the protocol stack. The research work presented in this HDR deals on the one hand with Medium Access Control protocols (MAC protocols based on rendez-vous, energy saving, synchronisation, deterministic MAC protocol) and on the other hand with Time-of-Flight-based ranging protocols, enabling the localisation of mobile wireless nodes. The present work has always been evaluated by actual prototyping/testbed. Thus several hardware and software tools were developed to carry out the performance studies under adequate conditions (test environment control, reproducibility) in order to obtain the best results. Moreover, a part of the work has been studied on real use cases in the context of smart homes.