HAL
open science

Sur la radionavigation dans les villes intelligentes du futur

Roudy Dagher

To cite this version:

Roudy Dagher. Sur la radionavigation dans les villes intelligentes du futur : Le cas des réseaux de capteurs sans fils. Informatique ubiquitaire. Université Lille 1 - Sciences et Technologies, 2015. Français. NNT : . tel-01235715

HAL Id: tel-01235715

https://inria.hal.science/tel-01235715

Submitted on 30 Nov 2015

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.

Numéro d'ordre : 41758

Université Lille 1 – Sciences et Technologies

École doctorale **ED Régionale SPI 72**

Inria Lille – Nord Europe

Thèse présentée par **Roudy Dagher**

Soutenue le **6 octobre 2015**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université Lille 1 – Sciences et Technologies

Spécialité **Informatique**

Sur la radionavigation dans les villes intelligentes du futur

Le cas des réseaux de capteurs sans fils

Thèse dirigée par Nathalie Mitton

Composition du jury

Rapporteurs	Cesar Viho	professeur Université de Rennes 1
	Hervé Rivano	chargé de recherche HDR Inria Grenoble – Rhône Alpes
Examinateurs	Thierry Delot	professeur Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
	Thomas Watteyne	chargé de recherche Inria Paris – Rocquencourt
	Laurent Clavier	professeur Institut Mines Telecom
	Arnaud Vena	MCF IES Université Montpellier II
Directeur de thèse	Nathalie Mitton	chargée de recherche HDR Inria Lille – Nord Europe

Je dédie ce travail
à ma famille Franco-Hispano-Libanaise !

À tous ceux qui ont perdu le Nord !

Caminante, son tus huellas
el camino, y nada más ;
caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante, no hay camino,
sino estelas en la mar.

Antonio Machado

REMERCIEMENTS

Comme toujours, ma première pensée est pour mon épouse Raquel et maintenant nos deux enfants Alexandre et Valentina. Il n'y a pas de mots assez forts pour vous exprimer ma reconnaissance d'avoir donné du sens à ma vie et à mon travail.

J'ai eu la chance et le plaisir de réaliser cette thèse sous la direction de Nathalie MITTON. Je la remercie pour ses conseils précieux et surtout de m'avoir laissé une liberté scientifique et intellectuelle tout en s'assurant de la cohérence de mes travaux. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir toujours appuyé dans mes recherches, aussi ambitieuses fussent-elles.

Je remercie les membres de mon jury pour avoir accepté d'y prendre part, c'est un honneur d'avoir suscité votre intérêt scientifique. Je vous remercie pour votre regard et vos critiques constructives.

Cette thèse a démarré dans le cadre d'un programme CIFRE avec ETINEO SAS au sein d'un i-lab. Pendant ces deux premières années, j'ai eu le plaisir de travailler avec Jean-Michel COPIN. Merci "Jean Miche" d'avoir été un bouclier doctoral, et de m'avoir bénéficié de ton expérience tant sur plan technique que humain. Merci aussi à Salvatore, le super ingénieur qui a redonné vie au projet.

Au sein de l'équipe FUN, j'ai évolué dans une équipe internationale avec des personnes exceptionnelles scientifiquement, techniquement et humainement. Je les remercie tous. En particulier, je remercie très amicalement Tahiry pour ses conseils et son regard scientifique de haut niveau. Je remercie Roberto, mi compañero, pour ses critiques et son intuition d'ingénieur inégalée. Merci à Ibrahim, pour ses conseils et son regard critique et perçant.

Je remercie mes parents ainsi que mes frères et grande sœur. Venant d'un pays en guerre comme le Liban, je mesure comme vous l'importance des études et les efforts consentis par les parents pour aller encore plus loin. J'espère qu'avec cette thèse, je vous aurais rendu fier de votre petit garçon.

SOMMAIRE

Remerciements **vii**

Sommaire **ix**

Liste des tableaux **xi**

Liste des figures **xiii**

Liste des algorithmes **xvii**

Liste des acronymes **xix**

Notations **1**

Introduction générale **3**

1 État de l'art **7**

2 Vers la radionavigation opportuniste dans les villes intelligentes **29**

3 Analyse d'une radiogoniométrie opportuniste dans les villes intelligentes **41**

4 *ASAP* : radiolocalisation passive et mono-ancre pour les réseaux de capteurs sans fils **55**

5 Auto-Calibration dans un réseau d'antennes à large ouverture **77**

6 Une radiolocalisation mono-source dans les villes intelligentes **89**

7 Conclusion et Perspectives **105**

Bibliographie personnelle **111**

Bibliographie **113**

A Diagonalisation d'une matrice hermitienne particulière **125**

Table des matières **127**

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Comparatif des techniques de radiolocalisation véhiculaire dans les STI 36

LISTE DES FIGURES

1.1 Le procédé de radiolocalisation le plus répandu. 9
1.2 Les principales métriques pour la radiolocalisation. 10
1.3 Mesure d'angle d'incidence (AoA). 11
1.4 Mesures de distance et lieux circulaires. 12
1.5 Télémétrie avec des mesures de temps. 14
1.6 Mesures de différence de temps de vol (TDoA). 15
1.7 Near field electromagnetic ranging (NFER). 16
1.8 Localisation RIPS – (A,B) en émission (C,D) en réception 19
1.9 La localisation RIPS en deux tours 19
1.10 Graphe du réseau avec des contraintes de connectivité. 20
1.11 Les interactions dans les STI. 23
1.12 Exemple de techniques de localisation pour les VANETs (reproduit de [18]). 25

2.1 Blocs fonctionnels dans une ville intelligente ©Schneider Electric 30
2.2 Un réseau de capteur sans fils (WSN). 31
2.3 Les couches du standard IEEE 802.15.4. 32
2.4 Étage de transmission d'un paquet – couche physique (reproduit de [34]). 33
2.5 Exemple du système de luminaires intelligents *Owlet Nightshift* 34
2.6 Architecture générale du système *UNS* proposé 37

3.1 Instanciation du système UNS avec une radiogoniométrie . . . 42
3.2 Problème de triangulation par radiogoniométrie 43
3.3 Dilution de précision (GDOP) 44
3.4 Méthodologie de simulation 47
3.5 Modèle de mobilité du nœud 49
3.6 Scenario d'évaluation extrait de la zone d'intérêt ($R_{max} = S = 35m$). 50
3.7 Paramètres et sorties de simulation 51

3.8 Effet des collisions sur le taux de positionnement 51
3.9 Effet de la dilution de précision (GDOP) sur l'erreur de positionnement 53
3.10 Erreur moyenne quadratique (RMSE) de l'algorithme de localisation 53

4.1 Système de localisation *ASAP* 56
4.2 Réseau d'antenne et source 59
4.3 Localisation par réseaux d'antennes à large ouverture (LAA) . . 63
4.4 Inversion par rapport à un cercle 64
4.5 Ambiguïtés de la la localisation LAA en 2D 67
4.6 Exemple d'intersections de lieux circulaires et barycentres. Il est important de noter que le lemme 1 nous garantit que les points du cluster intérieur sont inverses des points du cluster extérieur quelle que soit la position de la source. 69
4.7 Lieux de positionnement avec le réseau $\mathbf{r}_1$ (presque-circulaire) à ouverture $D = 2.5$m et $L = L_{max} = 8128$ échantillons. 73
4.8 Erreur quadratique moyenne (RMSE) avec *ASAP* dans toute la zone de localisation. 74

5.1 Séquence de transmission $(a) \Rightarrow (b) \Rightarrow (c)$ pour l'estimation automatique du PLE par le réseau d'antennes 78
5.2 Estimation du PLE avec une source pilote. 80
5.3 Performance de l'estimation du PLE en fonction du SNR et le nombre d'échantillons L – sur 200 triages avec $PLE = 2$. 84
5.4 Distribution de l'estimation du PLE sur 200 simulations ($PLE = 2$). 85
5.5 Sensibilité de la localisation LAA – sur 200 tirages ($PLE = 3, L =$ 500 échantillons). 86
5.6 Sensibilité de la localisation LAA et approche – sur 200 tirages ($PLE = 3, L = 500$ échantillons). 86

6.1 Instanciation du système UNS avec le système de localisation *ASAP* 90
6.2 Localisation du véhicule avec une seule ancre – orientation connue 92
6.3 Localisation du véhicule avec deux ancres – orientation estimée 93
6.4 Schéma de co-simulation WSNET/Matlab. 96
6.5 Nombre de voisins détectables le long de la trajectoire du véhicule ($T_{beacon} = 1s$). 98
6.6 Évolution de l'erreur de localisation sur la trajectoire (orientation connue et $SNR =$ 20 dB). 99

6.7 Évolution de l'erreur de localisation sur la trajectoire (orientation estimée et $SNR = 20$ dB). 101
6.8 Estimation opportuniste de l'orientation ($SNR = 20$ dB). 102
6.9 Erreur de localisation moyenne (RMSE) pour les cas mono-source et bi-sources. 102
6.10 Effet des collisions sur le taux de positionnement 103

LISTE DES ALGORITHMES

3.1 L'algorithme de localisation du véhicule à base d'une radiogoniométrie. 46
3.2 Algorithme de mobilité du nœud 49
4.1 L'algorithme de localisation *ASAP*. 70
5.1 L'algorithme d'estimation du coefficient d'atténuation a 82
6.1 L'algorithme de localisation du véhicule à base du système *ASAP*. 95
6.2 L'algorithme de localisation du véhicule à base du système *ASAP* – avec orientation estimée. 95

LISTE DES ACRONYMES

AoA Angle of Arrival.
API Application Programming Interface.
ASAP Arrayed Single Anchor Positioning.

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access.
CSS Chirp Spread Spectrum.

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum.

GDOP Geometrical Dillution of Precision.
GPS Global Positioning System.

INS Inertial Navigation System.
ISM Bande Industrielle, Scientifique et Médicale.

KML Keyhole Markup Language.

LAA Large Aperture Array.
LBS Location-Based Services.

MAC Medium Access (Layer) – couche d'accès au médium.
MANET Mobile Area Network.

NFER Near-Field Electromagnetic Ranging.

OQPSK Offset-Quadrature Phase Shift Keying.

PA Power Amplifier.
PLE Path Loss Exponent.

PPDU PHY Protocol Data Unit.

RIPS Radio Interferometric Positioning.
RMSE Root Mean Square Error.
RSS Received Signal Strength.
RToA Round-trip Time o Arrival.

SNR Signal to Noise Ratio.
SSID Service Set Identifier.
STI Système de transport intelligent– *ITS* en Anglais.

TDoA Time difference of Arrival.
TIC Technologies de l'Information et de la Communication – *ICT* en Anglais.
ToA Time of Arrival.

ULB Ultra Large Bande.
UNS Ubiquitous Navigation System.
UTM Universal Transverse Mercator projection.
UWB Ultra Wide Band.

V2I Vehicle to Infrastructure communications.
V2V Vehicle to Vehicle communications.
VANET Vehicular Area Network.

WSN Wireless Sensor Network.

ZL Zone de Localisation.

NOTATIONS

a, A	Scalaire
$\underline{a}, \underline{A}$	Vecteur colonne
$\mathbb{A}, \mathbf{A}$	Matrice
$(\cdot)^*$	Complexe conjugué
$(\cdot)^T, (\cdot)^H$	Transposé, conjugué transposé
$\odot, \oslash$	Produit, division matricielle par éléments
$\exp(\underline{A})$	Exponentielle par éléments due vecteur $\underline{A}$
$\underline{A}^b$	Puissance par éléments du vecteur $\underline{A}$
$\|\underline{A}\|$	Norme euclidienne $\underline{A}$
$\mathbb{I}_N$	Matrice identité de dimension $N \times N$
$\underline{1}_N$	Vecteur colonne de N uns
$\mathcal{R}, \mathcal{C}$	Ensemble des nombres réels, complexes

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Nous introduisons le contexte de la problématique visée, nous présentons la thèse défendue et l'approche, puis nous décrivons la structure du mémoire afin d'orienter sa lecture.

Contexte

De nos jours, les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont devenues essentielles dans le développement urbain, et permettent de lever plusieurs défis au niveau des infrastructures et des services publics. L'application la plus remarquable fut d'abord les systèmes de transports intelligents (STI) au travers d'applications telles que la surveillance et gestion du trafic routier, la sécurité routière, l'éco-mobilité, l'aide à la conduite...etc. Dans cette optique, le concept émergent de ville intelligente a attiré la recherche et l'innovation vers le tout connecté où l'idée directrice est de connecter la population et/ou les véhicules avec des services utilisés dans leur vie quotidienne. Avec l'essor des réseaux de capteurs sans fil, cette technologie apparaît comme une des solutions clé pour l'instrumentation de la ville au travers de nombreuses applications telles que : le parking intelligent, les luminaires intelligents, la surveillance du trafic et de la qualité de l'air, etc.

Avec la démocratisation du GPS et son intégration dans les smartphones et les véhicules, la localisation véhiculaire est devenue un service incontournable dans le domaine des STI. Elle est au cœur d'un nombre croissant de solutions basées sur le positionnement par satellites uniquement, ou mettant en œuvre plusieurs solutions de localisation complémentaires (systèmes hybrides). A titre d'exemple, un système de navigation hybride combine le positionnement par GPS avec la navigation inertielle (ou à l'estime) utilisant des capteurs d'accélération et de rotation. Outre le GPS et la navigation inertielle, des technologies additionnelles peuvent être utilisées seules ou en complément pour compenser l'absence de

réception des signaux satellitaires dans certains environnements. Il s'agit des technologies radio (ou ondes hertziennes) comme par exemple :

- RFID : installation de portiques ou bornes le long des voies (ou au péages) pour identifier les voitures (dotées d'un TAG).
- Réseaux cellulaires : identification de la cellule (cell-id) du mobile grâce à la station de base.
- Réseaux locaux :
  - Bluetooth : capture d'adresse des terminaux Bluetooth avec des bornes Bluetooth dédiées.
  - Wifi : utilisation des bornes d'accès WiFi (hotspots) dans les milieux urbains.

Parmi les technologies radio ci-dessus, la plus intéressante en terme d'ubiquité est celle du Wifi. En effet, de nombreuses bornes Wifi se trouvent dans les villes et elles sont déjà géo-référencées. En bref, dès qu'un mobile identifie un point d'accès il peut le localiser sur le plan en un service WEB ou localement dans un cache. Grâce à l'observation d'une ou plusieurs bornes, on peut avoir une première estimation de la position du mobile.

Dans l'élan de l'internet des objets, le déploiement de réseaux de capteurs sans fils s'accélère et à ce rythme on peut prévoir que le nombre d'objets communicants dans la ville va augmenter considérablement. Pour des raisons liées aux applications, une bonne partie de ces objets seraient fixes géo-référencés. Dans une démarche Big Data, comme c'est déjà le cas pour les bornes WiFi, on peut raisonnablement faire l'hypothèse que ces positions seront accessibles dans le/un Cloud. Pourquoi ne pas utiliser ces informations, avec une radiolocalisation adéquate, pour localiser le véhicule ?

Thèse

En cherchant à répondre à cette question, la thèse défendue dans ce mémoire ouvre une nouvelle voie pour la radiolocalisation véhiculaire pour les STI dans le contexte des villes intelligentes. Nous proposons un système de localisation autonome qui va permettre à un véhicule intelligent de se localiser (auto-localisation) d'une manière opportuniste et passive. La finalité est d'aboutir à un service de navigation complémentaire au GPS, et ce dans un souci de continuité et d'amélioration du service de navigation.

En contraste avec les approches réseau ou par détection de voisinage, nous adoptons une approche ascendante et cross-layer : du signal vers l'estimation de la position du véhicule. Nous construisons un système de localisation qui

s'intègre aisément dans une pile de communication standard et qui s'étend sur deux niveaux protocolaires : couche physique et couche de liaison (MAC). Au niveau physique, nous utilisons un réseau d'antennes pour collecter les signaux à des fins d'identification et de localisation. Dès qu'un paquet est détecté au niveau MAC, les signaux physiques correspondants sont exploités pour estimer la position de l'émetteur dans le référentiel du véhicule. En utilisant l'identifiant de l'émetteur, on peut retrouver sa position dans un référentiel externe (ou global) depuis une base de données construite hors ligne et accessible localement ou à distance. A partir de cette dernière ainsi que de l'orientation du véhicule, la position du véhicule dans le référentiel externe peut être estimée par changement de base.

Les contributions de cette thèse peuvent être résumées comme suit :

1. Étude d'un nouveau problème de radiolocalisation opportuniste à l'intersection des domaines de systèmes de transport intelligents, des villes intelligentes et des réseaux de capteurs sans fils.
2. Conception d'un nouveau système pour la radionavigation véhiculaire tirant profit du déploiement d'objets communicants dans les villes intelligentes.
3. Analyse d'une radiolocalisation par radiogoniométrie opportuniste dans le contexte des réseaux de capteurs sans fils déployés dans une ville intelligente.
4. Développement d'un système de radiolocalisation mono-ancre et passif pour les réseaux de capteurs sans fils sur la base d'un traitement de signaux d'un réseau d'antennes à large ouverture.
5. Développement d'une nouvelle technique d'estimation du coefficient d'affaiblissement pour la localisation avec des réseaux d'antennes à large ouverture.
6. Développement d'un système de radiolocalisation passif et autonome pour l'auto-localisation opportuniste d'un véhicule à partir d'une seule source lorsque l'orientation est connue.

Organisation du manuscrit

Ce mémoire est organisée en 6 chapitres.

Le **chapitre 1** présente un état de l'art de la radiolocalisation notamment en terme de mesures physiques permettant de localiser une source radio. Il décrit les problématiques des STI et se focalise sur les solutions existantes pour la localisation des véhicules, pour ensuite discuter de leur applicabilité dans le contexte des villes intelligentes et les réseaux de capteurs sans fils.

Le **chapitre** 2 présente le contexte de nos travaux puis extrait la problématique de cette thèse en la positionnant par rapport à l'état de l'art. Enfin, il décrit le système *UNS* (Ubiquitous Navigation System) proposé avec sa formulation en terme de traitement du signal, tout en discutant ses avantages et ses inconvénients.

Le **chapitre 3** décrit une première implémentation du bloc de localisation d'*UNS* utilisant une approche classique de radiogoniométrie : mesure des angles d'incidence des paquets. Il s'agit ici d'implémenter une radiogoniométrie opportuniste, et intrinsèquement passive, pour la confronter à notre problématique afin d'en identifier les limites.

Le **chapitre 4** propose notre système de localisation "passif" et "mono-ancre" nommé *ASAP*. Nous présentons d'abord son architecture à base de réseau d'antennes, puis nous énonçons un théorème spécifique au réseau d'antennes circulaires qui constitue le fondement théorique de la technique de localisation sous-jacente. Nous évaluons ensuite les performances de la localisation dans toute la zone de couverture autour du réseau d'antennes.

Le **chapitre 5** détaille une technique d'auto-calibration pour la localisation du système *ASAP*. Plus précisément, nous décrivons et évaluons une méthode d'estimation automatique du coefficient d'affaiblissement de l'environnement de propagation. Ce coefficient, requis par l'algorithme *ASAP*, est estimé en ligne par le réseaux d'antennes lui-même sans intervention extérieure.

Le **chapitre 6** revient sur le système *UNS* du chapitre 3 et propose d'intégrer le système *ASAP* du chapitre 4 comme nouveau bloc de localisation. Par conséquence, pour se localiser de manière opportuniste, il suffirait de détecter un seul voisin lorsque l'orientation du véhicule est connue. A défaut, il faudrait en détecter deux pour estimer d'abord l'orientation du véhicule et ensuite sa position. Nous évaluons cette nouvelle implémentation dans les mêmes conditions de mobilité et de communications réseau que dans le chapitre 3.

Enfin, dans la partie **Conclusion et Perspectives** nous faisons une synthèse des contributions de cette thèse, tout en discutant leurs limites pour en ouvrir des perspectives pour des travaux futurs.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART

Depuis le succès du GPS, la radiolocalisation est devenue un service essentiel non seulement pour l'Homme mais aussi pour l'informatique au sens large. Bien que ses principes fondateurs remontent à l'antiquité, la radiolocalisation a toujours évolué avec notre connaissance du monde physique, de l'électronique et des télécommunications. En pratique, il y a autant de manières de réaliser un service de localisation que d'applications la nécessitant. Néanmoins, toute technique de localisation repose sur des mesures du monde physique, si bruitées fussent-elles, afin d'en établir une corrélation avec la position que l'on cherche à estimer. Dans ce chapitre, nous présentons les principales techniques de mesures pour la radiolocalisation. Ensuite, nous nous intéressons aux systèmes de transport intelligents (STI) et en particulier aux solutions qui existent pour localiser les véhicules. Nous concluons avec une discussion sur l'applicabilité dans le contexte des villes intelligentes et les réseaux de capteurs sans fils.

1.1 Les techniques de radiolocalisation

Depuis l'antiquité, l'Homme a toujours navigué en se basant sur des observations d'objets (stellaires et/ou terrestres) dont il avait connaissance des positions [131]. L'exemple type, qui date de la Renaissance, est celui de la navigation astronomique utilisée à des fins de navigation maritime [120, 76]. La méthode repose sur le géo-référencement de la position des astres (éphémérides nautiques) dans un système de coordonnées célestes (système de coordonnées horaires). En utilisant les éphémérides, on déterminait alors la position du navire en employant comme instrument le sextant (estimation de la latitude) et un chronomètre précis (estimation de la longitude).

La version moderne de la navigation astronomique est le GPS. En effet, on a remplacé les astres par des satellites en orbite autour de la terre et inventé de nouveaux instruments de mesure pour leur observation. Dans le cas de la radionavigation par GPS ou équivalent [1], le récepteur GPS estime sa position à partir des mesures de pseudo-distances par rapport à des satellites qui sont mis en orbite autour de la terre. L'utilisation d'ondes électromagnétiques, porteuses d'informations sur le satellite (éphéméride, horodatage), permet de mesurer le temps de vol et inférer la distance récepteur-satellite en utilisant des techniques de traitement de signal adéquates.

Dans le contexte des réseaux sans-fils en général, et dans celui des réseaux de capteurs en particulier, on retrouve des techniques de radiolocalisation qui s'apparentent beaucoup aux procédés discutés ci-dessus : utilisation de nœuds à des positions connues (ancres), mesures liées à la position relative aux ancres, estimation de la position (localisation) à partir des mesures et la connaissance de la position des ancres. Bien que la démarche et l'objectif soient les mêmes, les mesures et surtout les algorithmes de localisation diffèrent comme nous allons le voir par la suite.

1.1.1 Le procédé de localisation

On distingue deux types de nœuds :

— ancre : nœud dont on connaît la position. Parfois appelé nœud de référence.

— cible : nœud dont on cherche à estimer la position. Parfois appelé source ou mobile.

Le procédé de localisation permet d'estimer la position de la cible en effectuant un ensemble de mesures (via des signaux) entre les ancres et la cible pour ensuite les fusionner avec les positions connues des ancres. Très souvent, il se

1. GLONASS (Russie), Gallileo (Europe), IRNSS (Inde) et BeiDou (Chine).

décompose en deux phases [41] : estimation de paramètres liés à la position de la cible, estimation de la position via un algorithme de localisation. On peut aussi les appeler respectivement [72] : association et fusion de métriques. Nous adopterons cette dernière appellation par la suite.

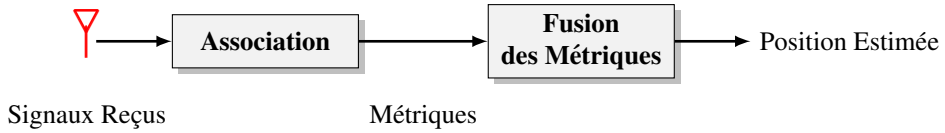


FIGURE 1.1 – Le procédé de radiolocalisation le plus répandu.

Un procédé de radiolocalisation admet les caractéristiques suivantes concernant [4] :

- **Les communications**
  - ***Active*** : la cible participe au processus en émettant un ou plusieurs signaux (interaction avec les ancres).
  - ***Passive*** : la cible n'émet aucun signal et se contente de recevoir les signaux des ancres.
- **Le calcul**
  - ***Centralisée*** : les métriques, souvent disponibles au niveau des ancres, sont envoyées à un serveur de localisation dédié à la fusion des métriques.
  - ***Distribuée*** : plusieurs cibles collaborent entre elles et avec les ancres pour une estimation jointe de leurs position.
  - ***Locale*** : le procédé de localisation est exécuté par la cible elle même, on parle alors d'*auto-localisation*.
- **Le déploiement**
  - ***Avec Infrastructure*** : le procédé de localisation est mis en œuvre avec des ancres à des positions prédéterminées.
  - ***Sans Infrastructure*** : les ancres sont choisies "à chaud" par le système avant de démarrer le procédé de localisation.

A titre d'exemple, la radiolocalisation utilisée dans la navigation par GPS est passive, locale et avec infrastructure dédiée. Le récepteur GPS estime les pseudo-distances (métriques) des satellites observés (infrastructure), récupère leurs éphémérides depuis les trames reçues, et déroule localement un algorithme pour estimer, entre autres, la position du récepteur.

Dans la littérature, plusieurs études ont été faites afin de classifier les techniques et systèmes de localisation utilisés dans les réseaux sans-fils [41, 38, 81,

103, 13, 75, 125, 82] et ce selon des critères divers tels que l'utilisation des informations du réseau, la présence d'ancres ou même le déploiement de l'algorithme de localisation (local, central ou distribué). Nous préférons ici nous limiter aux principales métriques tout en illustrant comment elles peuvent être utilisées, d'une manière géométrique, pour estimer la position de la cible [4].

1.1.2 Les principales métriques

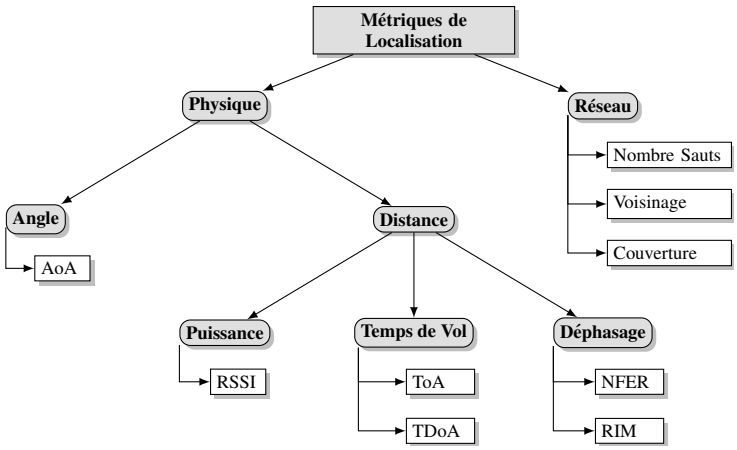


FIGURE 1.2 – Les principales métriques pour la radiolocalisation.

La phase d'association est la première étape dans le processus de localisation. Les métriques associées à la position de la cible émanent souvent de mesures physiques qui dépendent du matériel utilisé. D'un autre côté, des mesures spécifiques au réseau comme le nombre de sauts ou les information de voisinage, peuvent être utilisées à des fins de localisation à grain grossier. La figure 1.2 donne un aperçu des principales métriques utilisées dans le processus de radiolocalisation. Un système de localisation peut utiliser une de ces mesures ou adopter une approche hybride [41, 112] en utilisant des mesures différentes (ex. distance et angle).

1.1.2.1 Mesures physiques

D'une manière générale, les mesures physiques peuvent être catégorisées par type de mesure : angle d'incidence (AoA), distance (*range-based*) et réseau.

Angle d'incidence La mesure de l'angle d'incidence d'une onde émanant d'une ancre vers la cible depuis l'ancre permet de déterminer un lieu de position pour la cible : une droite passant par le couple ancre-cible. En utilisant au

moins deux ancres, on peut alors relever deux ancres par rapport à l'horizon et positionner la cible à leur intersection par triangulation [2] (cf. figure 1.3(a)).

(a) Angle d'incidence

(b) Mesure avec un réseau d'antennes ULA ($N_a = 3$)

FIGURE 1.3 – Mesure d'angle d'incidence (AoA).

La technique la plus utilisée pour l'estimation de l'angle d'incidence repose sur l'utilisation d'un réseau d'antennes linéaire et uniforme (ULA). Sous l'hypothèse de propagation plane (champ lointain), deux éléments adjacents du réseau reçoivent l'onde avec un retard de phase donné par

$$\Delta\Phi = 2\pi\frac{\Delta \sin\alpha}{\lambda}, \tag{1.1}$$

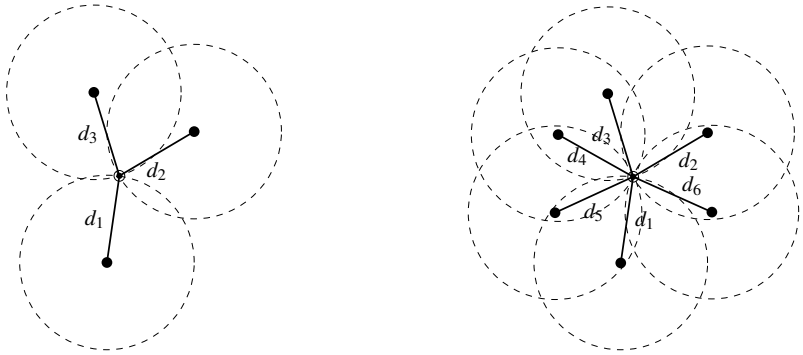
où Δ est l'espacement inter-éléments du réseau qui comporte N_a éléments, et λ la longueur d'onde. Le réseau d'antennes doit avoir une petite ouverture ($\Delta \sim \frac{\lambda}{2}$) pour respecter l'hypothèse de champ lointain. La technique la plus directe qui exploite cette relation à des fins de radiogoniométrie est souvent référencée comme interférométrie [92].

Une autre classe de méthodes de radiogoniométrie est celle des méthodes des sous-espaces [64, 78]. Au lieu de traiter les signaux reçus sur les antennes du réseau séparément, elles traitent l'ensemble des signaux comme un vecteur de dimension N_a. Avec cette formulation vectorielle, un modèle paramétrique du problème est formulé [64]. Ensuite, une analyse spectrale est effectuée sur la matrice de covariance du vecteur ainsi formé (statistique du second ordre) pour trouver estimer l'angle d'incidence. L'algorithme fondateur et le plus connu est MUSIC [109]. D'autres techniques de radiogoniométrie qui exploitent la

2. L'utilisation de la triangulation pour le l'estimation des distances remonte à l'antiquité : Thalès pour l'estimation de la hauteur des pyramides avec les triangles semblables, l'estimation de la distance à des navires observés depuis la côte, etc.

connaissance du diagramme de rayonnement des antennes réceptrices sont discutées dans [75, § II.A] et [92].

Distance En utilisant les mesures de distance (ou télémétrie) entre la cible et plusieurs ancres, la position de la cible peut être estimée en utilisant la méthode de trilatération [103]. De nombreuses techniques de télémétrie existent dans la



(a) Trilatération (b) Multilatération

FIGURE 1.4 – Mesures de distance et lieux circulaires.

littérature [75]. Les plus populaires sont celles utilisant la puissance du signal reçu (RSSI) et le temps de vol. D'autres techniques, moins populaires, transposent des résultats de la physique sur les ondes électromagnétiques pour fournir un service de télémétrie. Il s'agit des techniques NFER (*Near Field Electromagnetic Ranging*) et RIPS (*Radio Interferometric Positioning*).

Puissance (RSSI) Cette technique est basée sur la puissance du signal recu (RSS ou RSSI), une mesure standard disponible sur la plupart des puces radio sur étagère. Le système de télémétrie à base de RSSI le plus typique se base sur un modèle de l'affaiblissement de propagation [91, 85] (*path-loss log-normal shadowing*), qui est formulée avec la puissance reçue [3] :

$$P_r(d)[dBm] = P_0(d_0)[dBm] - 10n_p log_{10}\frac{d}{d_0} + X_\sigma \tag{1.2}$$

où :

— $P_r(d)[dBm]$: la puissance reçue dB milliwatts à la distance d de l'émetteur.
— $P_0(d_0)[dBm]$: une puissance de référence in dB milliwatts à la distance de référence d_0 de l'émetteur (généralement à 1m).

3. $P[mW] = 10^{P[dBm]/10}$ ert $P[dBm] = 10\log_{10}(P[mW]/1mW)$.

— n_p : coefficient ou exposant d'affaiblissement de l'onde. Ce nombre modélise la vitesse à laquelle l'onde s'atténue avec la distance. Exemple de valeurs : 2.0 en espace ouvert et 1.6 à 1.8 dans un bâtiment [91].

— X_σ : une variable aléatoire de loi normale centrée avec un écart-type σ. Ce bruit additif modélise les zones d'ombre (*shadowing*) causées par les phénomènes de réflexion et de réfraction. Exemple de valeurs : 0 dB en espace ouvert et 5.8 dB dans un bâtiment [91].

Ce modèle est le plus répandu de part sa simplicité et sa cohérence avec l'expérience [85, 110]. D'autres modèles ont été proposés dans la littérature [91, 102, 119], mais le modèle ci-dessus demeure le plus populaire.

A partir du modèle de propagation de l'équation (1.2) on peut dériver la distribution des mesures de distances à base de RSSI :

$$\hat{d} = d \cdot 10^{\frac{X_\sigma}{10n_p}} = 10^{\log_{10}(d)+\frac{X_\sigma}{10n_p}} = e^{(\ln 10)\cdot[\log_{10}(d)+\frac{X_\sigma}{10n_p}]} = e^{(\ln d)+\frac{\ln 10}{10n_p}X_\sigma}. \tag{1.3}$$

Ce qui correspond à une distribution log-normale

$$\hat{d} \sim \ln \mathcal{N}(\ln d, \frac{\sigma \ln 10}{10n_p}).\cdot \tag{1.4}$$

On peut donc estimer la distance par :

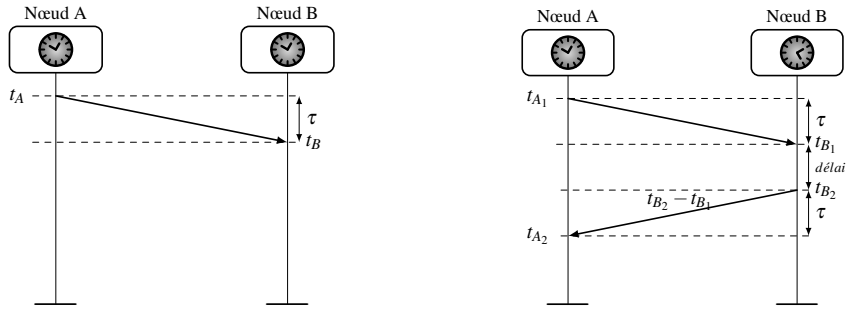
$$\hat{d} = d_0 \left(\frac{P_r(d)[mW]}{P_0(d_0)[mW]} \right)^{-1/n_p}. \tag{1.5}$$

L'équation (1.5) nous indique que la cible se trouve sur un cercle centré sur l'ancre. En utilisant plusieurs ancres, on peut donc estimer la position de la cible comme l'intersection de plusieurs cercles centrés sur les ancres (cf. figure 1.4) en utilisant la méthode de multilatération [103]. Il est important de noter que l'estimateur de l'équation (1.5) est biaisé [75], et lorsqu'on connaît la variance de la mesure, on peut dériver un autre estimateur non-biaisé de comme suit [75] :

$$\hat{d} = d_0 \left(\frac{P_r(d)[mW]}{P_0(d_0)[mW]} \right)^{-1/n_p} e^{-\frac{\sigma^2}{2\eta^2 n_p^2}} \quad \text{,avec } \eta = \frac{10}{\ln 10}. \tag{1.6}$$

Temps de vol (ToA) L'onde électromagnétique qui véhicule les messages de communication se propage à la vitesse de la lumière. Si l'on mesure le temps de traversée, on peut estimer la distance parcourue. En pratique, cela suppose que l'émetteur et le récepteur soient parfaitement synchronisés. On distingue alors deux types de mesures aller (*one-way*) et aller-retour (*round-trip*) comme illustré

dans la figure 1.5. En terme d'implémentations, on utilise la technique d'intercorrélation généralisée ou des filtres adaptés [42, 63]. L'approche ToA mesure



(a) Temps de vol (ToA) (b) Temps aller-retour (RToA)

FIGURE 1.5 – Télémétrie avec des mesures de temps.

la différence entre les instants de transmission (t_A) dans l'horloge du nœud émetteur et de réception (t_B) dans l'horloge du nœud récepteur. Ce délai, appelé temps de vol, est relié à la distance cible-ancre par $\tau = d/c$. La difficulté majeure dans cette technique réside dans la synchronisation des horloges utilisées par les nœuds en question.

Afin de pallier la synchronisation des horloges, une mesure du temps aller-retour (RToA) est préférable. La cible émet un message à l'instant t_{A_1} horodaté avec son horloge locale. L'ancre mesure, dans son horloge locale, le temps d'arrivée du signal t_{B_1} et celui de l'émission de sa réponse t_{B_2}. La réponse embarque la différence temporelle $t_{B_2} - t_{B_1}$. Le temps aller-retour est alors lié au temps de vol τ comme suit :

$$t_{aller-retour} = 2 \cdot \tau = (t_{A_2} - t_{A_1}) - (t_{B_2} - t_{B_1}). \tag{1.7}$$

Avec les dernières avancées de la technologie radio, des signaux à large bande (UWB) ont été utilisés pour mettre en œuvre une télémétrie radio à faible portée et surcoût énergétique, et ce même dans des environnements difficiles [42, 43]. L'entreprise Nanotron Technologies Gmbh a mis sur le marché la technologie de modulation CSS qui est robuste aux multi-chemins [46] et opère dans la bande ISM (2.4 GHz) sur une largeur de bande de 60MHz. Sur la base de cette couche physique, Nanotron a aussi développé la technologie de télémétrie SDS-TWR, qui est une extension à la méthode RToA précédemment discutée. La méthode SDS-TWR élimine le besoin de synchronisation ancre-cible, et se trouve robuste aux multi-chemins grâce à la technique de modulation CSS. La couche physique CSS a fait son entrée dans le standard IEEE 802.15.4a [55, 56, 97].

On peut également citer la puce radio Scensor, développé par l'entreprise Decawave [23, 133]. Cette puce travaille dans la bande UWB du standard et

permet d'effectuer des mesures de distance avec une précision centimétrique. La technique utilisée effectue également des mesures de temps aller-retour.

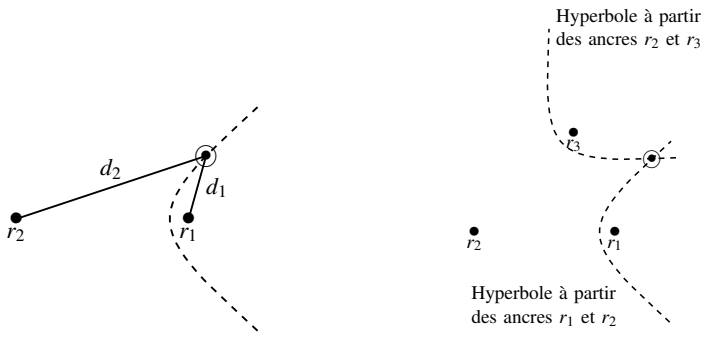
Différence de temps de vol (TDoA) Il est parfois plus aisé de synchroniser les ancres entre elles et garder la cible asynchrone avec l'ensemble des ancres. Dans ce cas, on peut utiliser les mesures de différence de temps de vol (TDoA). Afin d'illustrer le principe, prenons le cas d'une cible émettrice et deux ancres synchronisées et en réception (figure 1.6(a)). L'approche classique pour les mesures TDoA est de mesurer d'abord les temps de vol (ToA) pour chaque signal reçu au niveau des ancres :

$$\begin{cases} \hat{\tau}_1 = \tau_1 + \text{offset}_1 & (1.8) \\ \hat{\tau}_2 = \tau_2 + \text{offset}_2 & (1.9) \end{cases}$$

Comme les ancres sont synchronisées, nous avons $\text{offset}_1 = \text{offset}_2$ ce qui aboutit à l'estimation du TDoA

$$\hat{\tau}_{TDoA} = \hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_2 = \frac{d_1 - d_2}{c}. \tag{1.10}$$

L'équation (1.10) nous indique que la cible (source) se trouve sur une branche d'hyperbole avec comme foyers les ancres r_1 et r_2. En utilisant trois ancres, la position de la cible se trouve à l'intersection de deux branches d'hyperboles avec comme foyers les deux paires d'ancres (figure 1.6(b)).



(a) Deux ancres (b) Trois ancres

Figure 1.6 – Mesures de différence de temps de vol (TDoA).

Enfin, une autre approche pour les mesures de TDoA utilise l'inter-corrélation

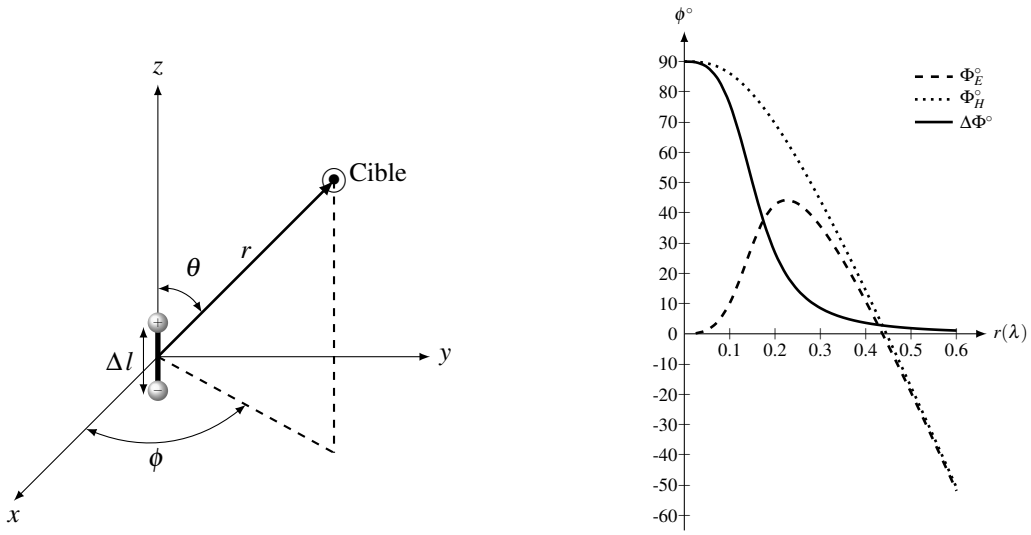
généralisée donnée par

$$\hat{\tau}_{TDoA} = arg \max_{\tau} \left| \int_0^T r_1(t) r_2(t+\tau) dt \right|, \tag{1.11}$$

où $r_i(t)$ est le signal reçu par l'ancre r_i, et T l'intervalle d'observation. On peut se référer à [42] et [75] pour une discussion plus détaillée sur le sujet.

Déphasage Les mesures de phase sur un ou plusieurs signaux reçus peuvent contenir une information sur la distance à la source. Nous avons identifié deux techniques intéressantes qui exploitent les lois fondamentales de la physique sur la propagation des ondes électromagnétiques. Il s'agit des techniques NFER (*Near Field Electromagnetic Ranging*) et RIPS (*Radio Interferometric Positioning*). la première exploit la propagation en champs proche découverte par Heinrich Hertz [105], alors que la seconde est inspirée par l'interférométrie utilisée à des fins de localisation dans le domaine de l'optique trente années auparavant [77, 25].

a) La technique NFER Elle utilise les équations des composantes électriques et magnétiques pour inférer la distance à la source à partir du déphasage entre ces deux composantes [106, 104].



(a) Dipôle Hertzien en coordonnées sphériques

(b) Déphasage en fonction de la distance

FIGURE 1.7 – Near field electromagnetic ranging (NFER).

Soit un dipôle Hertzien (ou dipôle élémentaire) ayant une longueur élémentaire Δl, dans lequel circule un courant alternatif $I = I_0 \cos(\omega t)$ (cf. figure 1.7(a)). En coordonnées sphériques (r, θ, ϕ), les composantes électrique E_θ et magnétique H_ϕ du champs électromagnétique sont données par [105, 59] :

$$\begin{cases} E_\theta = \dfrac{I_0 \Delta l \sin\theta}{4\pi\omega\epsilon_0}\left[\dfrac{\beta}{r^2}\cos(\omega t - \beta r) + \left(\dfrac{1}{r^3} - \dfrac{\beta^2}{r}\right)\sin(\omega t - \beta r)\right] & (1.12) \\ \\ H_\phi = \dfrac{I_0 \Delta l \sin\theta}{4\pi\omega}\left[\dfrac{1}{r^2}\cos(\omega t - \beta r) - \dfrac{\beta}{r}\sin(\omega t - \beta r)\right] & (1.13) \end{cases}$$

avec $\beta = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, c la vitesse de la lumière, λ la longueur d'onde et ϵ la permittivité du vide.

A partir des équations 1.12 et 1.13, on peut calculer le déphasage entre les grandeurs E_θ et H_ϕ comme suit [59, 105] :

$$\Delta\phi = \Phi_E - \Phi_H = \cot^{-1}\left(\frac{\omega r}{c} - \frac{c}{\omega r}\right) - \cot^{-1}\frac{\omega r}{c}. \tag{1.14}$$

On peut lier la phase à la distance [4] avec la formule suivante [104] :

$$r = \frac{\lambda}{2\pi}\sqrt[3]{\cot\Delta\phi}. \tag{1.15}$$

L'évolution du déphasage $\Delta\phi$ dans la figure 1.7 l'associe directement à la distance à la source (variable r). Elle montre bien qu'il faut baisser la fréquence (i.e augmenter λ) pour améliorer la résolution de la mesure. De ce fait, cette technique est utilisée en basse fréquence et sur des portées de l'ordre de 50m. L'aspect basse fréquence est un atout majeur pour la propagation en environnement intérieur.

Les inventeurs de la technologie NFER ont fondé la société américaine Q-Track en 2002 à Huntsville – Alabama. Cette technologie est propriétaire, et fonctionne à basse fréquence. Ils offrent une solution de localisation clé en main avec un canal 802.15.4 pour la communication et un canal NFER réservé à la localisation.

b) La technique RIPS La télémétrie par interférométrie radio exploite le signal résultant de l'interférence de deux sinusoïdes émises à des fréquences voisines depuis deux ancres. La distance aux ancres est inférée à partir de la mesure de déphasage entre deux signaux reçus à deux positions distinctes (cf. figure 1.8). Dans [77], Maroti et al décrivent une méthode de localisation nom-

4. En utilisant l'identité trigonométrique : $\cot(a-b) = -\frac{1+\cot a \cot b}{\cot a - \cot b}$ et la relation $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$.

mée Radio-Interferometric Positioning (RIPS) et montrent comment observer le déphasage à partir des mesures de RSSI. Afin d'illustrer le principe de RIPS, considérons trois ancres A,B,C et une cible D comme dans la figure 1.8. Faisons transmettre A et B, deux sinusoïdes (harmoniques) à des fréquences voisines f_a,f_b. L'interférence des deux signaux est un signal de battement avec une fréquence $|f_a - f_b|$. L'ancre C et la cible D, qui sont en mode réception, reçoivent le battement avec un déphasage $\Delta\Phi$ (cf. figure 1.8). On montre que ce dernier dépend de la distance entre le quadruplet (A, B, C, D) comme suit [77] :

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(d_{AD} - d_{BD} - d_{BC} - d_{AC}) \bmod 2\pi \tag{1.16}$$

où $\lambda = \frac{c}{(f_a+f_b)/2}$, et d_{XY} est la distance Euclidienne entre les nœuds X et Y. l'équation (1.16) permet de définir la mesure dite *q-range* du processus, donnée par

$$q_{ABCD} = d_{AD} - d_{BD} - d_{BC} - d_{AC}. \tag{1.17}$$

Elle est estimée en mesurant le déphasage $\Delta\Phi$ et en l'associant avec l'équation (1.16) comme suit

$$q_{ABCD} = \lambda\frac{\Delta\Phi}{2\pi} \bmod \lambda. \tag{1.18}$$

Il est important de noter qu'en raison de l'ambiguïté de phase (à cause du mod λ), on estime q_{ABCD} en répétant le processus n fois avec des paires de fréquences distinctes (f_a, f_b) et ainsi résoudre le système d'équations :

$$q_{ABCD} = \lambda_i\frac{\Delta\Phi_i}{2\pi} \bmod \lambda_i. \tag{1.19}$$

Connaissant les distances inter-ancres (d_{AC} et d_{BC}), la cible D se trouve ainsi sur une branche d'hyperbole avec comme foyers les ancres émettrices (A, B) :

$$d_{AD} - d_{BD} = q_{ABCD} + d_{BC} + d_{AC}. \tag{1.20}$$

Comme le cas TDoA, il nous faut une deuxième branche d'hyperbole pour placer la position de la cible à leurs intersections. Pour ce faire, un deuxième tour est nécessaire, dans lequel les ancres émettrices sont (A, C) alors que l'ancre B et la cible D sont en réception. Ceci nous permet d'estimer le paramètre q_{ACBD} et la branche d'hyperbole associée :

$$q_{ACBD} = d_{AD} - d_{CD} - d_{BC} - d_{AB} \quad \text{et} \quad d_{AD} - d_{CD} = q_{ACBD} + d_{BC} + d_{AB}. \tag{1.21}$$

On peut donc estimer la position de la cible en résolvant le système d'équations en utilisant les équations 1.20 et 1.21. Pour plus de détails se référer à [65, 101].

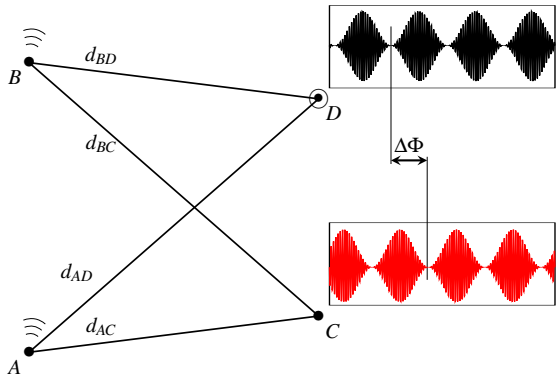
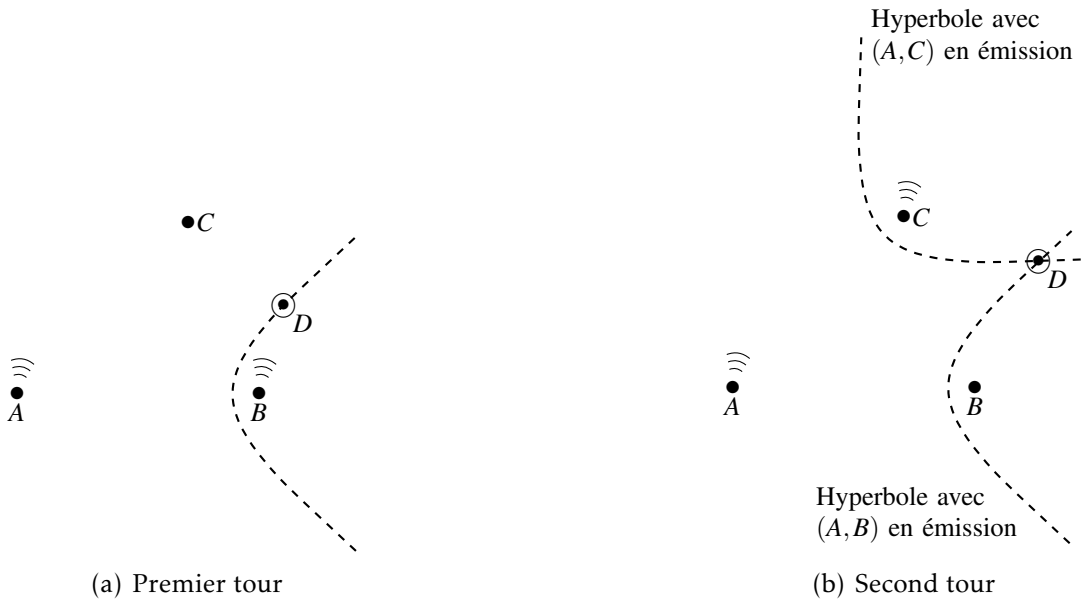


FIGURE 1.8 – Localisation RIPS – (A,B) en émission (C,D) en réception



(a) Premier tour (b) Second tour

FIGURE 1.9 – La localisation RIPS en deux tours

1.1.2.2 Mesures centrées réseau

Les mesures de connectivité du réseau sont probablement les plus simples à obtenir dans un réseau sans-fils. La position de la cible est inférée en analysant les ancres dans son voisinage en termes de connectivité, zone de couverture radio et proximité [70]. Ce type de mesures est surtout efficace et direct dans les réseaux denses.

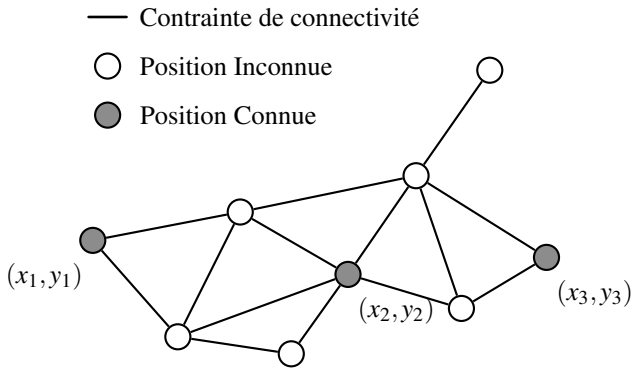


FIGURE 1.10 – Graphe du réseau avec des contraintes de connectivité.

Dans les mesures de connectivité, la cible observe un certain nombre d'ancres dans son voisinage immédiat à portée radio. L'ensemble de ces mesures définit des contraintes de connectivité qui sont ensuite exploités à des fins de localisation [19, 29]. Par exemple, lorsque la cible observe trois ancres voisines, elle peut se supposer proche de ces dernières et estimer sa position au barycentre des trois ancres [51].

1.2 La localisation opportuniste dans les villes

La localisation opportuniste, telle qu'elle existe aujourd'hui dans nos villes, repose sur le géo-référencement des points d'accès WiFi et les stations de base du réseau cellulaire. Les applications mobiles disposent de services logiciels (APIs) pour envoyer des requêtes contextualisées à des serveurs de géolocalisation distants.

1.2.1 BigData et géo-référencement

Le concept "Big data", parfois appelé mégadonnées ou données massives, n'est pas totalement nouveau [87, 135, 21]. Avant les avancées technologiques - accompagnées par les baisses de coûts - dans le domaine des capteurs, du calcul,

du stockage et des réseaux, un tel paradigme était limité aux grands comptes comme Google, Microsoft, Yahoo, CERN, NASA, NSA, etc. Le fournisseur de référence un service de localisation opportuniste à base de géo-référencement est l'entreprise américaine *Skyhook Wireless* [5], qui est de facto une entreprise big data. L'entreprise Google a collecté dans le passé, via ses véhicules de type *Google Street Car*, les positions des points d'accès WiFi observés lors de son passage. Aujourd'hui, cette collecte se fait via les smartphones des usagers (crowdsensing) au travers de mécanismes de partage de "position courante" (GPS), réseau WiFi courant (SSID et adresse MAC du routeur) et réseau mobile courant (cell-id).

1.2.2 Services de géolocalisation

Avec l'apparition de la spécification *HTML5 Geolocation API* [53, 88], la (radio)localisation opportuniste a déjà fait son chemin dans nos smartphones et les principaux navigateurs web (Firefox, Chorme et Safari). Cette spéciation permet de connaître, entre autres, la position courante de l'utilisateur ce qui permet de lui offrir des services en fonction de sa position, on parle alors de services LBS (*Location-Based Services* en anglais).

En terme d'implémentations, les services de localisation offerts par la SDK de l'entreprise *Skyhook Wireless* et l'API Google GeoLocation API [6] offrent déjà des services de localisation hybrides qui peuvent combiner GPS, exploitation du géo-référencement des points d'accès WiFi et le réseau cellulaire (GSM, LTE, etc.).

En guise d'exemple, prenons le cas d'un client web qui utilise l'API Google Geolocation après avoir observé une antenne-relais GSM et deux points d'accès Wifi. Il envoie alors la requête suivante (format JSON) :

Listing 1.1 – Requête JSON du client.

```
1  {
2   "homeMobileCountryCode": 310,
3   "homeMobileNetworkCode": 260,
4   "radioType": "gsm",
5   "carrier": "T-Mobile",
6   "cellTowers": [
7    {
8     "cellId": 39627456,
9     "locationAreaCode": 40495,
10    "mobileCountryCode": 310,
11    "mobileNetworkCode": 260,
```

5. http ://www.skyhookwireless.com/
6. https ://developers.google.com/maps/documentation/geolocation/

```
12      "age": 0,
13      "signalStrength": -95
14    }
15  ],
16  "wifiAccessPoints": [
17    {
18      "macAddress": "01:23:45:67:89:AB",
19      "signalStrength": 8,
20      "age": 0,
21      "signalToNoiseRatio": -65,
22      "channel": 8
23    },
24    {
25      "macAddress": "01:23:45:67:89:AC",
26      "signalStrength": 4,
27      "age": 0
28    }
29  ]
30 }
```

La requête ci-dessus nous indique que le client est aux états unis (ligne 2) sur le réseau GSM T-Mobile (lignes 3 et 5). Il est important de noter que le SSID du réseau WiFi n'est pas transmis, mais uniquement les adresses MAC des points d'accès (lignes 18 et 25) et des informations de RSSI et SNR (lignes 19, 21 et 26) pour une localisation en grain grossier. La réponse du serveur est simple : une position avec une précision en mètres qui permet de tracer un cercle de confiance autour de la position estimée.

Listing 1.2 – Réponse JSON du serveur.

```
1 {
2   "location": {
3     "lat": 51.0,
4     "lng": -0.1
5   },
6   "accuracy": 1200.4
7 }
```

1.3 Les systèmes de transport intelligents (STI)

Avec la croissance du nombre de véhicules, les infrastructures sont saturées et on assiste à une augmentation des bouchons, accidents, temps passé dans les transports et in fine une augmentation de la pollution due aux émissions

de polluants (CO2, particules fines) par les véhicules. Afin de répondre à ces problématiques, les STI ont émergé comme une application des TIC au domaine du transport [122, 37, 11, 27, 90]. D'une manière générale, les TIC sont utilisés

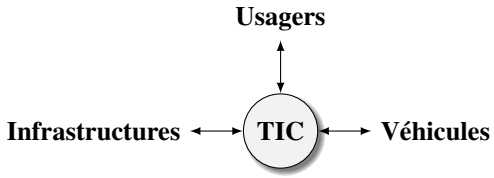


FIGURE 1.11 – Les interactions dans les STI.

pour collecter (capteurs) des informations des infrastructures et des véhicules, les transmettre à un système (central ou ad-hoc) pour analyse et traitement pour ensuite informer les usagers de la situation et d'éventuelles mesures à prendre.

1.3.1 Les applications et problématiques

Initialement, le champ d'applications des STI concernait les problématiques de trafic en termes de sûreté et congestion. Rapidement, le spectre d'applications s'est ouvert pour améliorer le confort et l'accessibilité des transports [67, 37], mais aussi pour l'interconnexion des véhicules avec l'internet [40, 26, 83]. Les champs d'application des STI peuvent être regroupés selon les thématiques suivantes :

— **Gestion du trafic** : la surveillance et la gestion du trafic ont été la raison d'être des STI pour fluidifier la circulation sur les axes routiers. Elles nécessitent le déploiement de capteurs pour le recueil des données de trafic. Ces données sont ensuite traitées par un système dédié qui notifie enfin les usagers au travers d'un système d'aide sur la route (ex. panneau), radio (bande FM) ou un système de navigation intégrant en temps réel les données de trafic.

— **Sécurité et réglementation** : le respect des limitations de vitesse, les télépéages, la surveillance et le péage des parkings, les passages à niveau.

— **Sûreté** : gestion des situations hivernales, gestion des accidents et des secours, gestion des équipements en tunnel, systèmes anti-collision, surveillance de l'hypovigilance du conducteur.

— **Véhicule intelligent** : en équipant les véhicules avec des systèmes d'aide à la conduite, de systèmes et capteurs pour l'analyse de la route (ex. caméra) et détection d'obstacles, systèmes de communication (ex. partage de la position GPS), aide au stationnement, systèmes de guidage.

— **Mobilité intelligente** : pour un meilleur confort et une baisse de la consommation de carburant. Par exemple la multimodalité, ou la possibilité d'envisager plusieurs modes de transports, et ce pour le transport de personnes et de marchandises (gestion de fret et des flottes).

— **Développement durable** : par exemple la multimodalité est une forme de mobilité durable qui réduit les émissions à effet de serre. Réguler les vitesses en périodes de pic de pollution, protection de l'environnement pour le transport de marchandises dangereuse. Les parkings intelligents permettent aussi de réduire les temps de recherche d'emplacement de parking.

1.3.2 Les technologies de communication

L'écrasante majorité des applications dans les STI nécessite des moyens de communications pour des besoins divers allant de la surveillance à l'information des usagers.

Les exemples les plus courants sont ceux du télépéage et le radar automatique. Le premier utilise la technologie RFID pour identifier le transpondeur dans le véhicule, alors que le second utilise la plaque signalétique pour identifier le véhicule en infraction via une capture d'image. Dans les deux cas, la facture est envoyée automatiquement au propriétaire du véhicule.

Les réseaux de capteurs sans fils (WSNs) peuvent aussi être utilisés pour mesurer le trafic et pour renseigner sur l'occupation des places de parking [116, 36].

La technologie centrale dans les communications véhiculaires pour les STI est celle des VANET (Véhicular Ad-hoc NETworks). L'idée directrice de cette technologie est d'intégrer ou adapter la technologie WLAN aux véhicules dans le contexte des STI [49, 50]. Les VANETs distinguent deux types de communication :

— V2V (**V**ehicle to **V**ehicle) : communications entre véhicules voisins favorisant leur coopération.

— V2I (**V**ehicle to **I**nfrastructure) : communication entre véhicule et l'infrastructure. Cette dernière peut être dédiée à remonter des informations, ou descendre des informations pertinentes pour le véhicule en fonction de son état (accidents, bouchons, feu, priorité, etc.).

Les communications se font généralement sur des courtes distances (100 à 300 m) et sur une bande de fréquence de 10 à 20 MHz [50]. Les défis à relever par ce type de réseaux sont multiples : topologie dynamique (mobilité des véhicules), effet de l'environnement (réflexions, atténuations), partage du canal et sa congestion du canal et interférences, impossibilité d'avoir un coordinateur du réseau, compromis sécurité des communications et vie privée des usagers.

1.3.3 La localisation véhiculaire dans les STI

La connaissance de la position des véhicules est une nécessité absolue dans de nombreuses applications des STI comme la sûreté, l'assistance du conducteur ou la mobilité intelligentes [111, 31] et également utilisée dans les VANETs au niveau protocolaire (ex. routage) et applicatif [18]. A vrai dire, cette hypothèse sur la disponibilité de la position n'est pas très forte. En effet, de nos jours le GPS est disponible sur tout le globe et fournit un service de positionnement à faible coût pour ses utilisateurs. Néanmoins, comme tout système de positionnement, il souffre de plusieurs imperfections comme la discontinuité du service, la perte de précision et la robustesse. D'où l'apparition de nouveaux systèmes de localisation complémentaires pour améliorer le service rendu aux applications et in fine à l'utilisateur. Ces nouvelles techniques ont aussi leurs imperfections, mais ce qui est fascinant est leur utilisation hybride dans une optique de fusion de données pour aboutir à une estimation encore plus précise de la position du véhicule [18, 111].

Aperçu des techniques de localisation

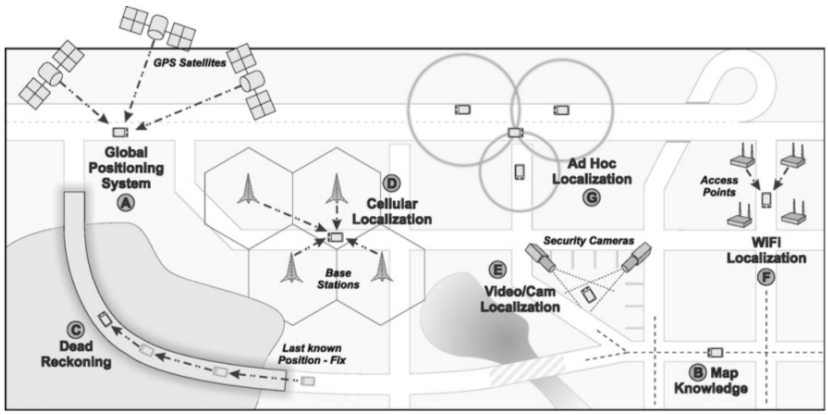


FIGURE 1.12 – Exemple de techniques de localisation pour les VANETs (reproduit de [18]).

Les techniques de localisation pouvant être utilisées dans les VANETs sont citées dans la figure 1.12 :

(A) GPS : avec 24 satellites en orbite équipés d'horloges atomiques et synchronisées, des mesures de temps de vol (ToA) sont effectuées avec le récepteur GPS. La précision obtenue varie d'une dizaine à une trentaine de mètres. Comme discuté précédemment, d'autres imperfections comme la discontinuité du service limitent l'utilisation à certaines applications.

(B) Projection carte routière : il ne s'agit pas d'une technologie de localisation promptement dite, mais de l'utilisation de la connaissance précise de la carte numérique pour affiner l'estimation de position et la limiter aux endroits physiquement possibles pour un véhicule. Les techniques dites de *Map Matching* permettent de reconstruire la trajectoire du véhicule à partir d'un ensemble d'estimations de position en les projetant sur la carte.

(C) Navigation à l'estime : empruntée de la navigation maritime, cette méthode permet de prédire la position courante du véhicule à partir de sa dynamique (accélération, vitesse, orientation, etc.). Elle est connue de souffrir de dérive avec le temps à cause de l'accumulation des erreurs. Elle est souvent utilisée en relais lorsque le signal GPS est perdu.

(D) Repérage visuel : en utilisant un traitement d'image/vidéo adéquat et des cartes numériques précises, on peut localiser le véhicule sur sa voie de circulation [108, 107]. C'est l'une des techniques les plus prometteuses en terme de précision (inférieure au mètre).

(E) Localisation cellulaire : elle se base sur les infrastructures (antennes relais) du réseau mobile déployé dans les villes. Bien qu'un mobile utilise une seule station pour les communications, d'autres stations voisines peuvent aussi communiquer avec lui à des fins de localisation. Les mesures utilisées sont de type RSSI, ToA, TDoA et AoA [7]. Ce type de localisation est généralement moins précis que le GPS.

(F) Localisation WiFi : service de localisation avec le géo-référencement des points d'accès WiFi comme discuté dans la section 1.2. Mais aussi en utilisant l'infrastructure dédiée au VANET (communications V2I).

(G) Localisation ad-hoc : il s'agit d'une localisation locale et relative de plusieurs véhicules entre eux. La connaissance de la position d'un véhicule relativement à son voisinage peut être très efficace pour certaines applications comme la détection de collision. Le schéma de fonctionnement de ce type d'approche est naturellement coopératif et distribué.

Les techniques de radiolocalisation existantes

Kloeden et.al ont présenté une technique d'auto-localisation du véhicule [62] avec les caractéristiques suivantes :

— Hybride : fusion de l'odométrie et de la radiolocalisation (temps de vol et radiogoniométrie).

— Avec infrastructure : formée par deux ancres qui participent directement au processus de localisation, c'est même leur fonction principale.

7. Lorsque des réseaux d'antennes sont utilisés sur les stations de base.

— Active et Coopérative : Le véhicule envoie un signal *echo* et attend la réponse des ancres pour estimer le temps aller-retour et l'angle d'incidence. On parle de communications V2I.

Liu et.al ont proposé une technique de localisation distribuée pour les véhicules [69, 68]. Ils proposent un algorithme de localisation distribué basé sur le partage des mesures des pseudo-distances GPS entre des véhicules voisins. Ils adoptent donc une approche active basée sur des communications V2V pour le partage des mesures GPS.

Enfin Parker et Valaee [84] ont proposé un système de localisation hybride et coopératif (communications V2V) pour des applications comme l'évitement de collision coopératif. Leur algorithme permet d'avoir une localisation relative d'un ensemble (cluster) de véhicules voisins. Il se base sur la mesure de distances inter-véhicules en utilisant le RSSI. En plus, il fusionne les informations suivantes :

1. Distances inter-véhicules : à base de mesures de RSSI.
2. Position GPS (optionnel) : utilisée pour initialiser le processus avec une estimation de la position.
3. Vitesse du véhicule : obtenue localement à partir de capteurs embarqués (ex. odométrie).

1.4 Synthèse

Un procédé de radiolocalisation se décline en deux phases successives : association et fusion des métriques. Dans la phase d'association, on effectue des mesures puis on les associe à la position de la cible pour construire un ensemble de métriques. Ces dernières sont ensuite fusionnées, avec les positions connues des ancres, par un algorithme de localisation dédié pour enfin estimer la position de la cible. Nous avons identifié deux familles de métriques : physiques et liées au réseau. Si l'on veut un système passif, dans lequel la cible n'interagit pas avec le réseau, deux métriques sont particulièrement adaptées : angle d'incidence et distance à base de RSSI. Sachant que la localisation à base de mesures de RSSI est connue pour son manque de fiabilité et sa dépendance à l'environnement [128, 52], il serait préférable d'investiguer celle avec des angles d'incidence par rapport à notre problématique.

En réponse aux besoins des applications mobiles en terme de localisation et notamment pour le développement de services *LBS*, la radiolocalisation opportuniste a déjà fait son chemin dans nos villes. Dans une démarche *Big Data*, les points d'accès WiFi sont géo-référencés et rendus géo-localisables dès leur détection par tout terminal mobile. Par conséquent, un service de radiolocalisation en grain grossier est offert aux applications.

En réponse aux besoins des STI en termes de précision et continuité du service, des techniques de localisation complémentaires au GPS ont été développées dans la littérature. Elles partent toutes d'un véhicule intelligent et communiquant avec d'autres véhicules (V2V) ou une infrastructure dédiée à la localisation (V2I). En outre, elles adoptent un fonctionnement hybride dans lequel plusieurs sources d'information de position sont fusionnées afin d'aboutir à un système optimal. En général, il s'agit d'applications de la radiolocalisation dans les MANET au domaine des STI.

Avec l'essor de l'internet des objets et l'émergence des villes intelligentes, de nouvelles sources (capteurs, humains, applications, voitures,etc.) génèrent de plus en plus de données, plus ou moins contextualisées, vers des organisations capables de les agréger et les stocker avec des coûts faibles et ce pendant de longues durées [135]. De nombreux objets déployés dans la ville à des fins applicatives (Luminaires, parkings, capteurs, etc.) seront géo-référencés.

En vertu du principe de l'interopérabilité dans les villes intelligentes, la disponibilité de ces données générées dans le contexte d'une application donnée rend possible le développement d'applications nouvelles qui exploitent ces dernières pour offrir de nouveaux services.

Dans le contexte des villes intelligentes, un véhicule sera entouré par un nombre considérable d'objets communicants sans-fils. A l'instar des points d'accès WiFi, se pose alors la question de la radiolocalisation opportuniste à base du géo-référencement de ces objets. Au vu de l'échelle du problème, toute radiolocalisation active et intrusive sur le réseau et/ou les applications serait à proscrire. Dans le chapitre suivant, nous décrivons les contraintes et l'architecture d'un tel système de radiolocalisation.

CHAPITRE 2

VERS LA RADIONAVIGATION OPPORTUNISTE DANS LES VILLES INTELLIGENTES

Avec l'émergence des villes intelligentes, le déploiement de l'internet des objets s'accélère avec un nombre considérable d'objets communicants sans fils. A l'instar des points d'accès Wifi, beaucoup de ces objets sont placés à des positions initialement connues, et pouvant être partagées dans le "Cloud" dans une démarche "BigData" ; on parle alors de géo-référencement. Dans ce chapitre nous présentons le concept de ville intelligente avec une attention particulière aux applications à base de réseaux de capteurs sans fils. De ce contexte, nous extrayons la problématique de cette thèse puis nous proposons une approche novatrice pour une radiolocalisation passive et opportuniste.

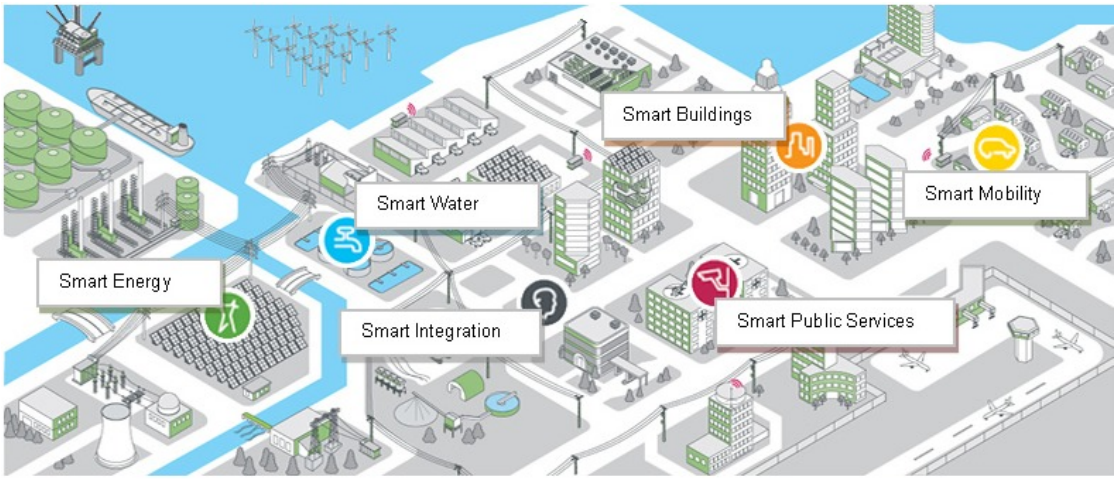


FIGURE 2.1 – Blocs fonctionnels dans une ville intelligente ©Schneider Electric

2.1 Contexte - les réseaux de capteurs sans fils dans les villes intelligentes

2.1.1 Les villes intelligentes

De nos jours, plus de la moitié de la population mondiale vit dans les villes, et la tendance est toujours à la hausse. De ce fait, les villes sont de plus en plus énergivores et polluantes. Elles représentent ainsi plus de 75% de l'empreinte énergétique mondiale et jusqu'à 80% d'émissions carbone. Outre les problèmes environnementaux et énergétiques, les grandes villes posent de nouveaux problèmes comme : la gestion des déchets, la raréfaction des ressources (eau, gaz), pollution de l'air et santé publique en général, congestion du trafic et le vieillissement des infrastructures [22, 117].

Afin de relever ces défis d'urbanisation croissante, et en s'appuyant essentiellement sur les TIC, le concept de villes intelligentes [1] a émergé. Une ville intelligente se veut une ville durable et agréable qui soit gérée d'une manière intelligente et efficace. D'un point de vue conceptuel, une ville intelligente peut être vue comme une intégration de plusieurs systèmes intelligents ; autrement dit c'est un système de systèmes qui doit son intelligence à l'interopérabilité et la collaboration de ces systèmes entre eux [28, 48]. Selon la vision (industrielle) de Schneider Electric, on peut regrouper les principaux blocs fonctionnels dans une ville intelligente comme suit (figure 2.1) :

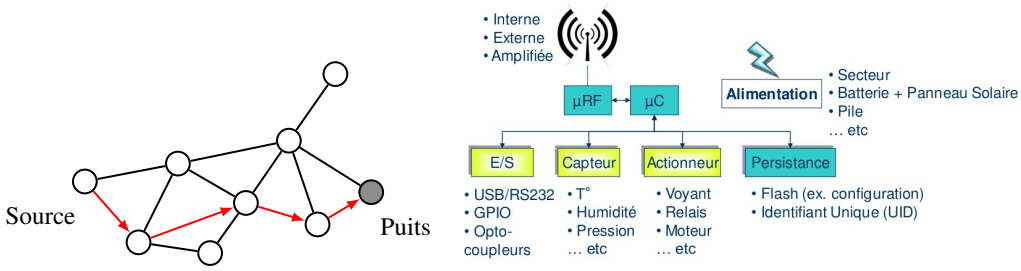
1. En anglais *Smart Cities*, mais on parle aussi de ville numérique, communicante ou ubiquitaire.

— L'énergie : connaître les habitudes et anticiper les demandes. Ex. relevé distant des compteurs et partage des données.
— L'eau : maîtriser les fuites et surveiller la qualité de l'eau.
— L'intégration : de services ou systèmes existants pour en créer de nouveaux. Amélioration de l'interopérabilité.
— Le bâtiment : l'habitat intelligent et surtout l'interconnexion d'habitats avec le partage des bonnes pratiques.
— Les services publics : la collecte de déchets, les luminaires intelligents, surveillance et détection d'anomalies, etc.
— La mobilité : déplacement efficace dans la ville, parkings intelligents, etc.

Il est important de noter que nos villes sont déjà intelligents au travers de nombreux systèmes "verticaux" issus du M2M [132] ou des STIs [67]. Outre sa dimension socio-économique et politique [48] centrée citoyen, la particularité du concept de la ville intelligente est d'avoir une approche horizontale qui mise sur une interopérabilité des systèmes existants et qui ouvre la voie au déploiement de nouveaux paradigmes comme l'internet des objets [12].

2.1.2 Les réseaux de capteurs sans-fils

Les réseaux de capteurs sans-fils (WSN) sont l'une des technologies clé dans l'implémentation des villes intelligentes [126, 47] et/ou des STIs au travers de nombreuses applications [116, 36] comme : le parking intelligent, les luminaires intelligents, la surveillance du trafic et de la qualité de l'air, etc.



(a) Exemple de réseau (b) Architecture type d'un nœud

FIGURE 2.2 – Un réseau de capteur sans fils (WSN).

Un réseau de capteurs sans-fil appartient à la famille des réseaux *ad-hoc* [95, 134, 8]. Il est composé d'un large ensemble de nœuds intelligents et communicants déployés dans une zone d'intérêt. Ils sont capables de capter des informations souvent environnementales et les acheminer de proche en proche (routage)

et d'une manière autonome, généralement vers une station de base (puits du réseau). Les nœuds du réseau admettent une architecture composée des unités suivantes (cf. figure 2.2(b)) :

— *Capture* : propre à l'application visée. Il s'agit de la conversion de grandeurs physiques en numérique.

— *Calcul* : permettant de traiter et agréger les données acquises, exécuter des algorithmes ou mettre en œuvre des protocoles divers (routage, liaison...etc). Souvent avec une ou des unités de mémoire vive et morte.

— *Communication* : sans-fil, multi-sauts et bi-directionnelle avec un étage radio généralement standard.

— *Alimentation* : par batterie, pile avec panneau-solaire et parfois sur secteur. La source d'énergie dépend fortement de l'application visée.

Le puits peut aussi jouer le rôle de coordinateur du réseau et passerelle vers le monde "extérieur" pour le recueil et l'exploitation des données. La particularité des WSNs réside dans le fait que les nœuds du réseau sont limités en énergie, portée de communication et capacité de traitement.

Le standard de référence dans les WSNs est l'IEEE 802.15.4 qui couvre les couches protocolaires basses : physique et liaison (MAC). Ce standard [54] est à la base de nombreux standards couvrant les couche supérieures comme 6LowPAN, ZigBee, WirelssHART. Il attribue un identifiant unique sur 64-bits à tout nœud compatible, on parle alors d'adresse MAC du nœud. Il spécifie deux types de contrôle d'accès au médium : CSMA/CA et *unslotted* CSMA/CA. Quant à la couche physique, elle permet une communication sur un canal (bande étroite) avec des techniques de modulation et d'étalement de spectre qui dépendent de la bande de fréquence choisie. Enfin, la taille d'une trame est limitée à 127 octets (appelée *aMaxPHYPacketSize*).

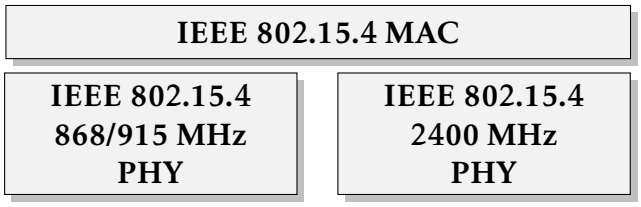


Figure 2.3 – Les couches du standard IEEE 802.15.4.

Dans ce travail, nous faisons l'hypothèse que les nœuds utilisent le standard IEEE 802.15.4 au niveau des couches physique et MAC, sans aucune hypothèse sur les couches supérieures. La couche MAC est supposée utiliser un contrôle d'accès CSMA/CA, alors que la couche physique est supposée communiquer dans

la bande ISM (2400MHz). Cette bande est disponible au niveau mondial, elle offre 16 canaux (étroits) de communication centrés sur les fréquences suivantes

$$F_c[\text{MHz}] = 2405 + 5 \times (canal - 1) \quad canal \in [11, 12, \ldots 26]. \tag{2.1}$$

Dans cette bande [54, §6.5], une modulation O-QPSK est utilisée avec des symboles sur 4-bits. Chaque symbole est ensuite associé à une séquence (en anglais *chip*) de 32 bits à partir d'un dictionnaire de 16 séquences (16-*array DSSS spreading*). Pour mémoire, le débit est de $62.5Ksymboles/s$ soit $2Mchip/s$. Le principe de transmission est illustré par la figure 2.4.

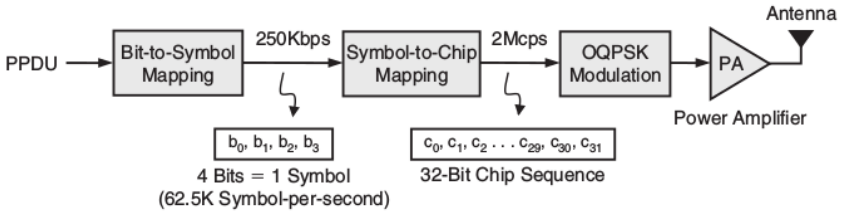


FIGURE 2.4 – Étage de transmission d'un paquet – couche physique (reproduit de [34]).

2.1.3 Les luminaires intelligents

L'éclairage public dans une ville est un service public fondamental pour les citoyens et les véhicules qui se déplacent sur la chaussée. Afin de faciliter sa maintenance et optimiser sa gestion et les coûts énergétiques engendrés, le concept de luminaires intelligents est apparu comme une des applications clé pour les villes intelligents.

On peut distinguer deux types d'intelligence : locale et globale. Localement, le luminaire peut utiliser la technologie LED pour l'éclairage et être adaptatif par rapport aux conditions météorologiques et de trafic. Il peut aussi être communicant pour permettre une configuration à distance et une télémaintenance. D'un point de vue global, le système de gestion des luminaires permet aussi d'économiser de l'énergie : gestion de l'allumage progressif des luminaires, gestion des pannes, surveillance et maintenance prédictive.

Dans la littérature scientifique, des travaux existent pour utiliser les réseaux de capteurs sans-fils à des fins de contrôle des luminaires. Domingo-Perez et al. présentent dans [30] un système de télégestion de luminaires en utilisant un protocole de contrôle des luminaires et un réseau de capteurs sans fils. Ils proposent d'intégrer des nœuds sur des ballasts standards (DALI) et les contrôler à distance via le réseau de capteurs ainsi créé. Denardin et al. [24] proposent

un système de luminaires intelligents à base de technologie LED et un réseau de capteurs sans fils. Ils implémentent également un routage géographique qui exploite la connaissance de la position des luminaires formant le réseau.

Dans l'industrie, des entreprises comme OWLET [2] et ECHELON [3] proposent des solutions clé-en-main (cf. figure 2.5 et [32]) comportant des contrôleurs de luminaires attachés à des nœuds communicants, des coordinateurs de réseau et un système de gestion. Les luminaires sont segmentés, avec un puits de données par segment. L'ensemble des puits est piloté depuis un système d'information dédié.

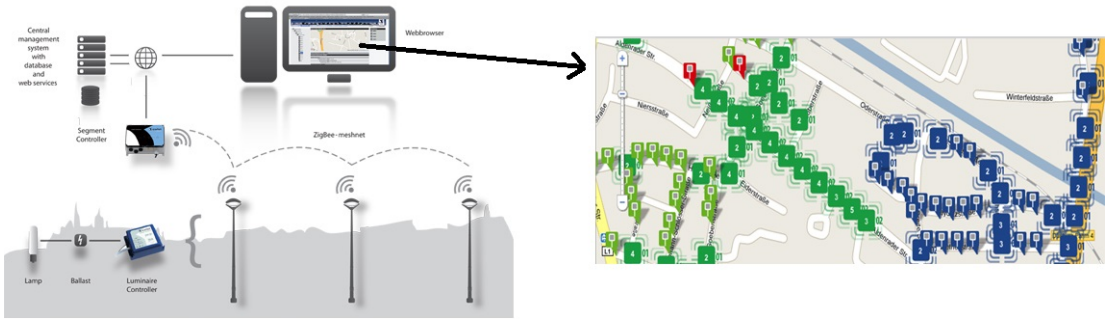


FIGURE 2.5 – Exemple du système de luminaires intelligents *Owlet Nightshift*

Le point clé dans ce type d'application est le géo-référencement des luminaires qui est une exigence importante pour une gestion efficace de ce système dans une perspective de réduction de consommation énergétique et d'émission carbone. Pour cette raison, nous choisissons ce scénario comme hypothèse de travail pour notre problématique qui sera discutée ci-après.

2.2 Problématique - radiolocalisation opportuniste et passive

Dans le contexte des réseaux de capteurs dans les villes intelligentes, on peut raisonnablement supposer qu'à l'instar des points d'accès WiFi, beaucoup de nœuds de réseau de capteurs seraient déployés dans la ville et seraient également géo-référencés. Pour chaque nœud qui communique sur le médium, on pourrait rechercher sa position sur le plan. A partir de là, se pose la question suivante : comment localiser le véhicule à partir de l'observation (identification et signaux reçus) d'un ou plusieurs nœuds voisins ?

2. http://owlet-streetlight.com
3. http://www.echelon.com

2.2.1 Hypothèses et contraintes

Avant de discuter cette question, il nous semble important d'y adjoindre une hypothèse afin de simplifier le problème. En effet, nous préférons restreindre la problématique au scénario des luminaires intelligents présentés dans la section 2.1.3 pour les raisons suivantes :

1. Couverture des routes : les luminaires sont naturellement implantés le long des voies de circulations et surtout dans les tunnels et espaces souterrains.
2. Vision directe : ils se retrouvent très souvent en vision directe avec les véhicules.
3. Géo-référencement des luminaires : pour des raisons de maintenance et de contrôle à distance, tous les luminaires sont géo-référencés. Dans une démarche BigData, le partage de leurs positions est donc envisageable.

Les contraintes du problème sont multiples :

1. Non-maîtrise de l'infrastructure des luminaires utilisés comme ancres : on ne peut en aucun cas imposer une topologie spécifique pour les ancres. C'est un phénomène subi.
2. Hétérogénéité des protocoles : bien que les couches physique et liaison (MAC) peuvent être les mêmes au travers d'un standard garantissant l'interopérabilité des produits, les couches protocolaires supérieures varient (ZigBee, 6LowPAN, etc.).
3. Localité ou autonomie de la localisation : le problème d'auto-localisation du véhicule doit rester local au véhicule, comme le GPS. Cette contrainte est importante pour un passage à l'échelle de la solution.

Pour répondre à cette problématique, le système de localisation du véhicule ne peut donc faire aucune hypothèse sur les ancres ni en terme de position géographique, ni en terme de protocoles qui supporteraient la localisation (ex. *ranging*). En outre, il doit demeurer passif, comme un récepteur GPS, pour opérer d'une manière non-intrusive vis-a-vis des communications en cours. Ces dernières n'étant pas prévues pour permettre la localisation du véhicule.

2.2.2 Discussion des approches existantes

Comme discuté dans l'état de l'art (section 1.3.3), nous avons identifié trois techniques de localisation véhiculaire dans le domaine des STI. D'un autre côté, nous avons aussi présenté l'utilisation de la radiolocalisation opportuniste, essentiellement à base de points d'accès Wifi, dans les applications mobiles sur smartphone par exemple. Dans cette section, nous discutons l'ensemble de ces approches par rapport à notre problématique.

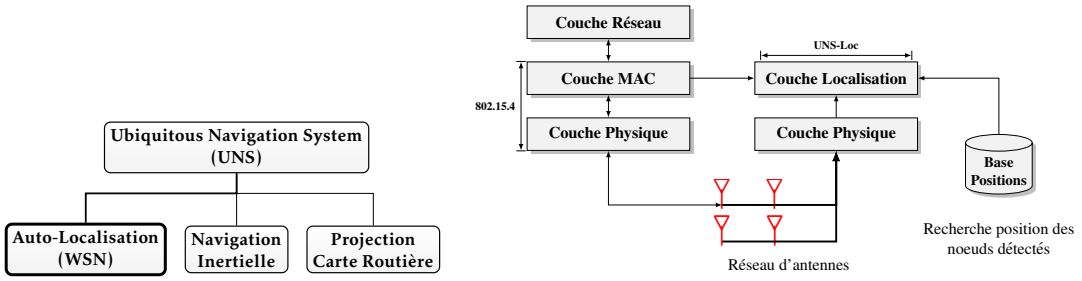
Référence	Techniques	Hybride	Coopérative	Active
Kloeden et.al [62] 2011	• Odométrie. • ToA et AoA.	oui	oui (V2I)	oui
Liu et.al [69] 2014	• Position GPS. • Pseudo-distances.	non	oui (V2V)	oui
Parker et Valae [84] 2006	• Position GPS. • RSSI. • Capteur vitesse. • Projection carte	oui	oui (V2V)	oui

Tableau 2.1 – Comparatif des techniques de radiolocalisation véhiculaire dans les STI

Nous pouvons classer les approches existantes dans le domaine des STI dans le tableau 2.1. Les approches de localisation véhiculaires dans les STI discutées ci-dessus sont toutes coopératives et actives. Elles ne répondent donc pas à notre problématique. Néanmoins, il convient de noter qu'elles sont toutes hybrides. Enfin, l'approche de Kloeden et.al [62] fonctionne sans GPS et tire son caractère actif des mesures de temps aller-retour (RToA) pour estimer la distance aux ancres (infrastructure).

D'un autre côté, comme on l'a vu dans la section 1.3.3 de l'état de l'art, la radiolocalisation opportuniste a déjà fait son chemin dans nos smartphones et les principaux navigateurs web (Firefox, Chorme et Safari) avec l'apparition de l'*HTML5 Geolocation API*. Par exemple, les services de localisation offerts par la SDK de l'entreprise *Skyhook Wireless* et l'API Google GeoLocation API offrent déjà des services de localisation hybrides qui combinent GPS, exploitation du géo-référencement des points d'accès WiFi et le réseau cellulaire (GSM, LTE, etc.). En revanche, ces services, bien que très utiles dans de nombreuses applications mobiles, donnent généralement des estimations très approximatives (essentiellement de proximité) qui les rendent inutilisables/inapplicables dans l'état pour une localisation véhiculaire.

Nous pensons qu'une nouvelle approche de radiolocalisation opportuniste est nécessaire. Elle doit être complètement passive sans coopération avec d'autres véhicules ou infrastructure dédiée à la localisation. L'état de l'art nous préconise de fusionner plusieurs techniques de localisation afin de maintenir une continuité du service de localisation pendant l'absence de localisation radio.



(a) Sous-blocs (b) Architecture logicielle

FIGURE 2.6 – Architecture générale du système *UNS* proposé

2.3 Approche - cross layer avec des réseaux d'antennes

Afin de répondre à notre problématique nous proposons le système UNS [4]. L'idée directrice est de faire un compromis entre les approches existantes dans les STI, qui sont actives et collaboratives, et celle de la radiolocalisation opportuniste qui utilise le réseau WiFi avec une localisation à grain grossier. Notre approche se fonde sur un fonctionnement cross-layer, qui exploite la couche liaison pour identifier l'émetteur et la couche physique (signaux reçus) pour le localiser par rapport au véhicule. Le système proposé est hybride et composé de trois blocs (figure 2.6(a)) :

1. **Auto-localisation** à base de WSN : auto-localisation opportuniste et passive du véhicule à partir de l'observation d'un ou plusieurs nœuds voisins. On utilise un réseau d'antennes en réception.
2. **Navigation inertielle** : afin de permettre une continuité de l'estimation de la position entre deux estimations successives avec le bloc d'auto-localisation. Ce bloc utilise des capteurs (orientation, vitesse, odométrie...etc) en local et nous fournit une estimation de l'orientation du véhicule. En général, afin de corriger les dérives, ce bloc devrait être initialisé après chaque estimation de la position du véhicule par le premier bloc.
3. **Projection carte routière** : Il s'agit d'une phase de raffinement pour corriger l'estimation de la position par rapport aux contraintes du plan ou carte du réseau routier (*Map-Matching*).

Dans ce travail, nous nous focalisons sur la conception et l'implémentation du premier bloc d'auto-localisation, les autres blocs, ainsi que leur fusion, étant largement couverts par la littérature. Par ailleurs, afin de fusionner l'ensemble,

4. UNS : **U**biquitous **N**avigation **S**ystem ou système de navigation ubiquitaire.

il est essentiel de bien connaître les performances du bloc de localisation au préalable.

2.3.1 Processus de localisation

Nous proposons d'équiper le véhicule d'un réseau d'antennes et d'utiliser deux piles logicielles : une pile de communication standard (type IEEE 802.15.4) connectée à une antenne, et une pile de localisation qui s'exécute en parallèle et exploite tous les signaux reçus sur le réseau d'antennes (figure 2.6(b)). L'ensemble des signaux est enregistré en continu, et dès que la couche MAC détecte un paquet valide le processus de localisation se déclenche et utilise l'ensemble des signaux du réseau. L'identifiant du nœud voisin détecté est d'abord utilisé pour retrouver sa position sur le plan dans un repère cartésien externe (repère du plan de navigation). Ceci peut être effectué via une requête dans une base de données dans laquelle les nœuds fixes sont géo-référencées. De préférence, cette base devrait être locale au véhicule, et par exemple incluse dans les méta-données du plan de navigation. Pour la localisation du véhicule, nous avons développé deux techniques discutées ci-après : radiogoniométrie avec deux sources et localisation mono-source.

Radiogoniométrie bi-sources

Dans une première implémentation, nous utilisons une radiogoniométrie classique et la confrontons à notre problématique. En choisissant un réseau d'antennes à petite ouverture (par rapport à la longueur d'onde) de quelques centimètres, il est possible d'estimer l'angle d'incidence d'un paquet reçu. En utilisant deux paquets, et en supposant que l'orientation du véhicule est connue (bloc navigation inertielle), on peut estimer la position du véhicule dans le repère externe du plan de navigation. En effet, dans cette approche nous supprimons la mesure de distance aux ancres de l'approche de Kloeden et.al [62]. Cette implémentation d'UNS sera présentée et discutée dans le chapitre 3.

Localisation mono-source

Suite à des résultats récents dans le domaine du traitement du signal sur la localisation avec des réseaux d'antennes à large ouverture (une dizaine de mètres par rapport à la longueur d'onde), nous proposons une deuxième implémentation qui nous permettra d'estimer, pour un paquet reçu, la position de la source dans le référentiel du véhicule. En supposant que l'orientation du véhicule est connue (bloc navigation inertielle), on peut estimer la position du véhicule dans le repère externe du plan de navigation. Lorsqu'on reçoit deux paquets, dans un

laps de temps suffisamment court (par rapport à la dynamique du véhicule), on peut également estimer d'une manière opportuniste l'orientation du véhicule. Cette implémentation d'UNS sera présentée et discutée dans le chapitre 6. Elle repose sur un algorithme de localisation mono-ancre qui sera développé dans le chapitre 4 et elle suppose la connaissance du coefficient d'affaiblissement du canal [5] qui est traitée par le chapitre 5 pour une estimation automatique et en ligne de ce paramètre par le réseau d'antennes lui-même.

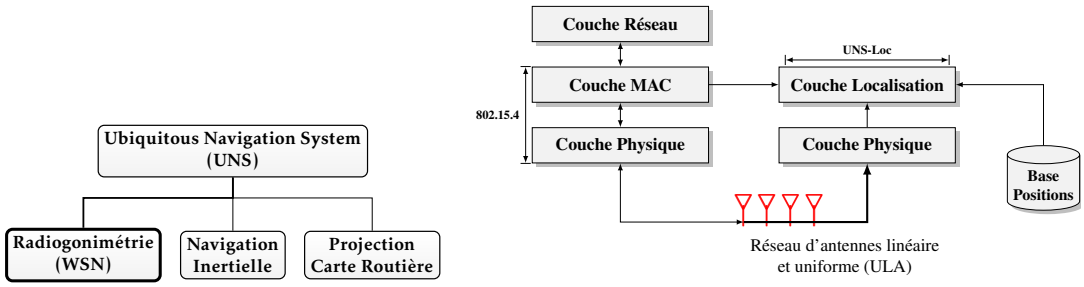
5. Path Loss Exponent (PLE) en anglais.

CHAPITRE 3

ANALYSE D'UNE RADIOGONIOMÉTRIE OPPORTUNISTE DANS LES VILLES INTELLIGENTES

La radiogoniométrie, ou l'art de mesurer les angles avec des ondes radio, est une technique de goniométrie moderne utilisée à des fins de localisation dans des domaines divers allant de la navigation maritime aux robots. Dans notre contexte, il s'agit d'utiliser les mesures d'angles d'incidence des ondes radios véhiculant les paquets détectés dans le voisinage d'un véhicule cherchant à se localiser. Dans ce chapitre, nous proposons une première implémentation du système UNS utilisant une approche classique de radiogoniométrie opportuniste, et intrinsèquement passive. L'objectif ici est d'effectuer une analyse préliminaire d'une telle approche dans le contexte visé et de jauger la pertinence d'une approche standard par rapport à notre problématique afin d'en identifier les limites. Sur la base du scénario des luminaires intelligents, nous examinons le cas d'une radiogoniométrie opportuniste avec une topologie de réseau extraite d'une carte réelle. Les résultats obtenus montrent qu'une telle approche est limitée à cause des collisions au niveau MAC, et notamment à cause des phénomènes de dilution de précision qui apparaissent en égard de la non maîtrise de la topologie du réseau de capteurs déployé en ville. De ce fait, malgré la réception de paquets des nœuds voisins, ces derniers ne peuvent pas être forcément exploités à des fins de localisation s'ils ne sont pas reçus au "bon moment" et au "bon endroit".

3.1 Le système *UNS* à base d'angles d'incidence



(a) Sous-blocs (b) Architecture logicielle

FIGURE 3.1 – Instanciation du système UNS avec une radiogoniométrie

En se basant sur le scénario des luminaires intelligents discuté dans le chapitre 2, nous instancions notre approche (section 2.3) avec un bloc de localisation par radiogoniométrie. L'architecture logicielle est identique, mais au niveau matériel nous utilisons un réseau d'antennes uniforme, linéaire et à petite ouverture (type *ULA*). Grâce à ce type de réseau d'antennes, dès qu'un paquet est reçu la direction d'arrivée (angle d'incidence) peut être estimée avec une des méthodes de la littérature comme discuté dans le chapitre précédent. En sortie du bloc de navigation inertielle, nous utilisons l'estimation de l'orientation du véhicule. Enfin, le bloc de projection sur la carte routière (Map Matching) a pour fonction de raffiner la position lorsque la localisation par angles d'incidence admet des ambiguïtés.

Nous faisons l'hypothèse que l'orientation du véhicule est connue localement grâce à un système à base d'une centrale inertielle ou par odométrie. Cette hypothèse est importante car elle permet de simplifier le problème d'auto-localisation du véhicule. En effet, comme discuté dans ce qui suit, avec la connaissance de l'orientation du véhicule, il suffit d'avoir détecté deux voisins pour le localiser. A défaut, il aurait fallu utiliser au moins trois voisins.

3.1.1 Radiogoniométrie idéale

Dans cette configuration, nous nous focalisons sur le bloc de positionnement par réseaux de capteurs. En supposant que le véhicule va pouvoir observer au moins deux lampes dans son voisinage, avec la connaissance de la position des luminaires ainsi que les angles d'incidences par rapport à l'orientation du véhicule, il est possible d'inférer la position du véhicule par *Triangulation*. Or on sait à partir de travaux antérieurs [79, 16, 33, 96] qu'il faut au moins deux ancres

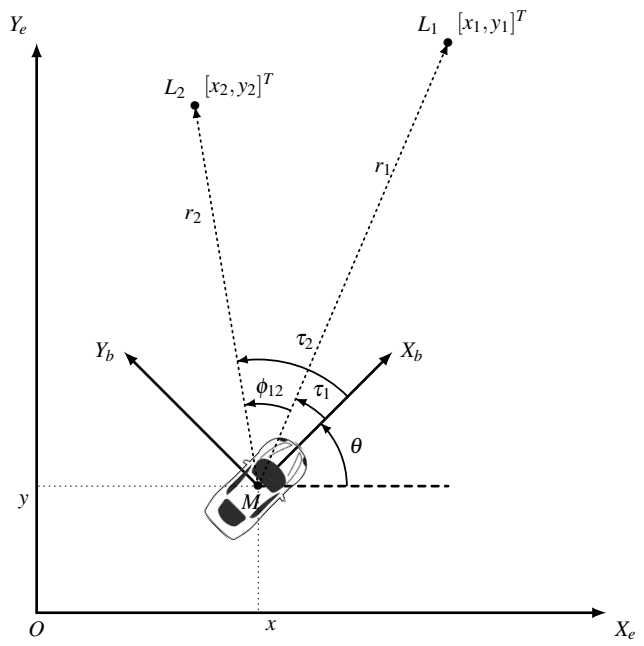


FIGURE 3.2 – Problème de triangulation par radiogoniométrie

pour estimer la position du véhicule, et au moins trois pour estimer en plus son orientation. Étant donné que l'orientation du véhicule est supposée connue, nous pouvons nous limiter à une triangulation avec deux ancres émettrices. La figure 3.2 illustre le problème de localisation avec deux ancres :

— θ : Orientation du nœud mobile M solidaire du véhicule.

— τ_i : angle d'incidence ou relèvement de l'ancre L_i par rapport à M.

— $\phi_{12} = \tau_2 - \tau_1$: Angle visuel entre L_2 et L_1, aussi relèvement de L_2 par rapport à L_1.

— r_i : Distance entre M et L_i.

— (X_e, Y_e) : Référentiel *externe* du plan de la ville, par exemple le système cartésien WGS 84 [111].

— (X, Y) : Le référentiel du véhicule.

En absence de bruit de mesure, on a la relation trigonométrique suivante entre les mesures de relèvement et la position du véhicule :

$$\tan(\alpha_i) = \frac{y - y_i}{x - x_i}, \text{ avec } \alpha_i = \theta + \tau_i \quad (i = 1..2). \tag{3.1}$$

L'angle α_i est aussi appelé le relèvement vrai du point L_1 par rapport au point M (*absolute bearing*).

A partir de l'équation (3.1) on peut construire le système d'équations

$$x\sin(\alpha_i) - y\cos(\alpha_i) = x_i\sin(\alpha_i) - y_i\cos(\alpha_i), \tag{3.2}$$

ou sous forme matricielle $\mathbf{H}\cdot\mathbf{X} = \mathbf{b}$:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sin(\alpha_1) & -cos(\alpha_1) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(\alpha_N) & -cos(\alpha_N) \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_1\sin(\alpha_1) - y_1 cos(\alpha_1) \\ \vdots \\ x_N\sin(\alpha_N) - y_N cos(\alpha_N) \end{bmatrix}}_{\mathbf{b}}. \tag{3.3}$$

La position du véhicule est enfin obtenue à partir de la matrice pseudo-inverse du système. Néanmoins, dans le cas de deux ancres on peut écrire la solution du système d'une manière directe [10] :

$$\begin{aligned} x &= x_2 + \cos(\alpha_2)\frac{y_2 - y_1 - \tan(\alpha_1)(x_2 - x_1)}{\cos(\alpha_2)\tan(\alpha_1) - \sin(\alpha_1)} = x_2 + f(x_i, y_i, \alpha_i)\cdot\cos(\alpha_2) \\ y &= y_2 + \sin(\alpha_2)\frac{y_2 - y_1 - \tan(\alpha_1)(x_2 - x_1)}{\cos(\alpha_2)\tan(\alpha_1) - \sin(\alpha_1)} = y_2 + f(x_i, y_i, \alpha_i)\cdot\sin(\alpha_2) \end{aligned} \tag{3.4}$$

Par souci de simplicité et de rapidité nous préférerons l'équation (3.4) à l'équation (3.3). Pour un aperçu complet et comparatif des techniques de moindres carrés pour la localisation par angles d'incidence, on peut se référer à [118].

3.1.2 Radiogoniométrie bruitée

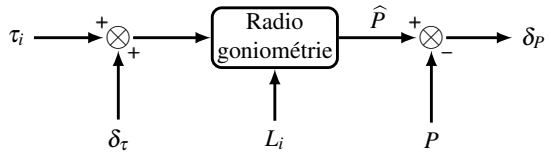


FIGURE 3.3 – Dilution de précision (GDOP)

Les mesures d'angles étant naturellement noyées dans du bruit, il est primordial de connaître l'effet du bruit de mesure sur la qualité de l'estimation de la position. Le problème de localisation en question peut être formulé comme un problème d'observabilité de la forme $\overrightarrow{z} = h(\overrightarrow{x})$, où $\overrightarrow{x} = (x, y)$ est la position du nœud mobile, et $\overrightarrow{z}$ dénote le vecteur d'observation reliant la position physique

aux mesures d'angle. Une manière habituelle de quantifier l'effet du bruit est d'examiner le déterminant de la matrice jacobienne de h ($H = \frac{\delta h}{\delta x}$), souvent référencée comme la dilution de précision géométrique (GDOP). Une intéressante dérivation est effectuée dans [57] pour le cas de navigation robotique à partir de deux ancres. Dans ce dernier cas, la GDOP est donnée par :

$$GDOP = \frac{r_1 r_2}{sin(\phi_{12})}. \tag{3.5}$$

Par conséquent, la GDOP nous indique que l'erreur sur la position tend vers l'infini lorsque le nœud mobile est proche de la droite passant par les ancres (ϕ_{12} tend vers 0). D'une manière similaire, l'erreur est plus élevée lorsque le produit de distances par rapport aux ancres ($r_1 r_2$) est grand. Enfin, l'erreur la plus faible est obtenue lorsque l'angle visuel ϕ_{12} est droit.

Enfin, il est important de souligner que lorsque le nœud mobile est colinéaire avec les ancres, une troisième ancre est en théorie nécessaire afin de lever l'ambiguïté. Dans une ville, ce cas peut être fréquent et arrive lorsque le véhicule traverse un rond-point ou lorsque les luminaires observés ne se situent pas sur la même rangée. Ce cas particulier nous aurait amené à résoudre un système d'équations ou à rechercher avec une méthode type *maximum de vraisemblance*, ce qui aurait augmenté la complexité de la solution. Dans notre approche hybride, une autre alternative est possible pour lever l'ambiguïté : l'utilisation du plan de la route et de la direction courante du véhicule. Dans une phase de raffinement, pour ce cas précis, on prend comme estimation de la position l'intersection du segment de route courant (extrait du plan de route) avec le segment des luminaires observés $[L1, L2]$. Notons l'influence de l'intégration du contexte applicatif sur la localisation, en contraste avec la localisation dans le cas général.

3.1.3 Algorithme de localisation

Le procédé de localisation du véhicule est décrit dans l'algorithme (3.1) et se déroule en deux phases successives : initialisation et localisation. Dans la phase d'initialisation, on attend la détection et la goniométrie de deux voisins communiquant sur la même bande de fréquence. Dans la phase de localisation, on utilise la triangulation décrite dans l'équation (3.4).

A cause des collisions lors de l'accès au canal (couche MAC), le deuxième voisin peut être observé tardivement, et donc biaiser l'estimation de la position. Afin de limiter cet effet, il suffit de prendre en compte l'horodatage local des paquets (ligne 3 de l'algorithme) et de supprimer le voisin le plus ancien.

Enfin, comme discuté précédemment, la dilution de précision peut fausser

l'estimation de la position dans certains cas. Pour y remédier, nous utilisons la connaissance de la portée radio maximale des nœuds afin de vérifier la consistance de l'estimation (ligne 5 de l'algorithme). En outre, lorsqu'on reçoit un paquet d'un nœud déjà observé, les informations le concernant sont juste rafraîchies.

Algorithme 3.1 L'algorithme de localisation du véhicule à base d'une radiogoniométrie.

Initialisation

ÉTAPE-1 : *Attente* d'un nouveau paquet.

ÉTAPE-2 : *Mesure* de l'angle d'incidence du signal τ_1 véhiculant le paquet et horodatage t_1 (couche Physique).

ÉTAPE-3 : *Identification* de l'émetteur L_1 à partir du paquet (couche MAC).

ÉTAPE-4 : *Récupération* de la position de l'émetteur (x_1, y_1) à partir d'une base locale (méta-données du plan).

ÉTAPE-5 : *Répétition* des étapes **1 à 4** pour un nouveau paquet (τ_2, t_2 et L_2).

Algorithme

1: **fonction** LOCALISATION(L_i,τ_i, t_i, θ)
2: $\hat{P} := [\cdot]$
3: **si** $|t_1 - t_2| < timeout$ **alors**
4: $\hat{P} :=$ TRIANGULATION(L_i, τ_i, t_i, θ) ▹ Avec équation (3.4)
5: **si** $\|\overrightarrow{\hat{P}L_1}\|_2 > R_{max}$ **ou** $\|\overrightarrow{\hat{P}L_2}\|_2 > R_{max}$ **alors**
6: $\hat{P} := [\cdot]$
7: **fin si**
8: **fin si**
9: **retourne** $\hat{P}$
10: **fin fonction**

3.2 Méthodologie d'évaluation

Afin de refléter la topologie d'un réseau déployé dans une ville intelligente, nous adoptons la méthodologie suivante pour la simulation (figure 3.4) :

1. Sélection d'une route ou zone d'intérêt dans une ville via le moteur Google Maps.
2. Détection manuelle des luminaires en plaçant des marqueurs. Chaque marqueur se voit attribuer des coordonnées (*Longitude*, *Latitude*).
3. Tracé de la trajectoire du véhicule sur la route. Le tracé est échantillonné par un ensemble de marqueurs à chaque changement de direction.
4. Exportation du plan au format standard KML dans un fichier, par ex. *scenario.kml*.
5. Analyse automatique (script) du fichier .kml et extraction des coordonnées des lampes et de la trajectoire.
6. Projection des coordonnées avec une projection de Mercator (Universal Transverse Mercator ou UTM) et centrage sur le centre du plan.
7. Génération des fichiers de mobilité pour le simulateur WSN.

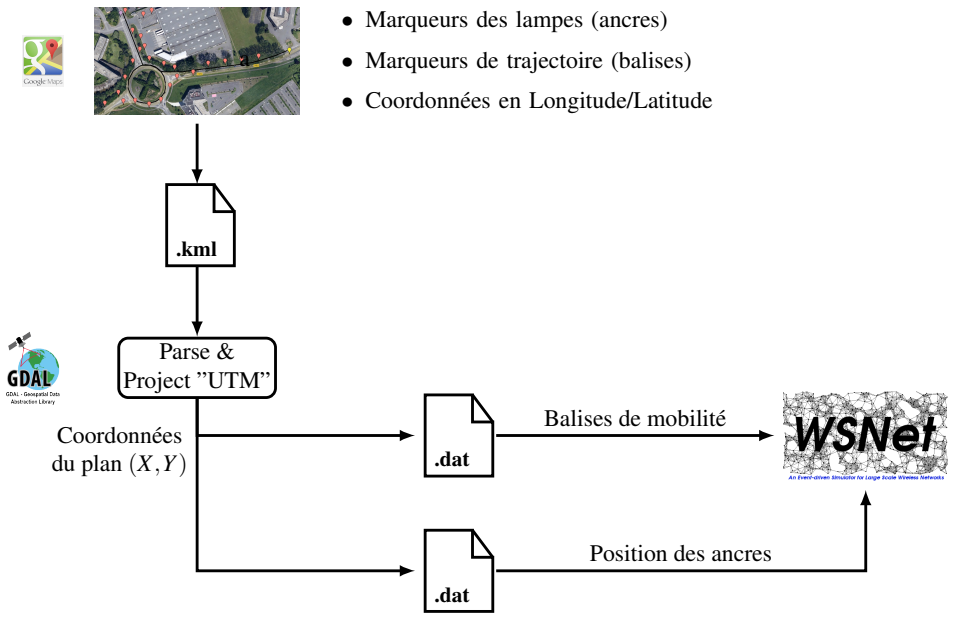


FIGURE 3.4 – Méthodologie de simulation

3.2.1 Modèle du réseau

Nous considérons un réseau de capteurs sans fils (WSN) en distinguant deux types de nœuds : *nœuds fixes* ou ancres et *nœud(s) mobile(s)*. Les ancres, attachées aux luminaires, transmettent périodiquement un message de type *beacon* contenant leurs positions et ce avec une période T_{beacon}. Le nœud mobile est toujours en réception et n'effectue aucune transmission.

La topologie du réseau est dictée par la distribution spatiale des luminaires dans la ville, alors que la position du nœud mobile varie le long d'une trajectoire prédéfinie (par le modèle de mobilité section 3.2.2). Le réseau opère avec une portée de communication R_{max} supposée la même pour tous les nœuds du réseau. Afin d'assurer la connectivité du réseau, R_{max} doit vérifier

$$R_{max} \geq S, \tag{3.6}$$

où S est l'espacement maximal inter-luminaires. Ici, nous prenons $R_{max} = S$, ce qui est un bon compromis pour minimiser les collisions au niveau MAC.

Enfin, pour le contrôle d'accès au canal (couche MAC), les nœuds utilisent l'algorithme *unslotted CSMA/CA* conformément au standard IEEE 802.15.4 [54]. La couche physique est supposée idéale avec une couverture circulaire de rayon R_{max} (disque).

3.2.2 Modèle de mobilité

Afin de simuler la mobilité du nœud attaché sur le véhicule, nous adoptons un modèle de mobilité simple basé sur une trajectoire connue à vitesse constante. Une trajectoire est modélisée (échantillonnage spatial) par un ensemble de points balises $\{W_1 \dots W_n\}$, où chaque paire de balises successives forme un segment de route. Chaque segment S_j a donc une direction

$$\theta_j = \tan^{-1} \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j}. \tag{3.7}$$

Clairement, le nombre de points pour une trajectoire donnée dépend de la géométrie de la route. Typiquement, une balise est nécessaire à chaque changement de direction. Afin de se mouvoir le long d'une trajectoire W avec une vitesse constante v, nous proposons un modèle de mobilité récursif décrit dans l'algorithme (3.2). A chaque période échantillonnage spatial T_s, la position du nœud mobile est mise à jour avec un déplacement $ds = v \times Ts$ dans la direction θ_j du segment courant S_j.

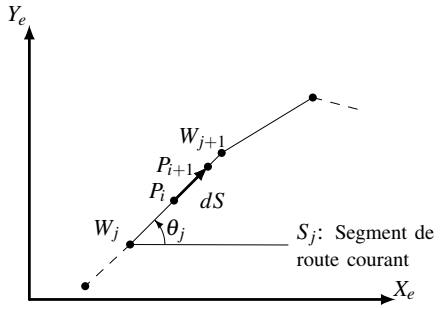


FIGURE 3.5 – Modèle de mobilité du nœud

Algorithme 3.2 Algorithme de mobilité du nœud

Entrées: Données de trajectoire (W_i, θ_i) $\quad i = 1 \cdots N$

1: **fonction** MOVE(P_i,W_j,θ_j,ds)
2: **si** $j \geq N$ **alors** ▹ Fin de trajectoire
3: $P_{i+1} := W_N$
4: **sinon si** $ds \leq \| \overrightarrow{P_i W_{j+1}} \|$ **alors** ▹ Segment de route courant
5: $P_{i+1} := P_i + ds.[\cos\theta_j, \sin\theta_j]^T$
6: **sinon** ▹ Segment de route suivant
7: $\delta s := \| \overrightarrow{P_i W_{j+1}} \|$
8: $P_{i+1} :=$ MOVE(W_{j+1},W_{j+1},θ_{j+1},$ds - \delta s$)
9: **fin si**
10: **retourne** P_{i+1}
11: **fin fonction**

3.3 Résultats de simulations

Comme scénario nous choisissons une zone d'intérêt près du centre Inria Lille – Nord Europe, à la Haute Borne. Le plan de la zone est fourni en entrée du processus de la figure 3.4, ce qui donne la trajectoire et le réseau de la figure 3.6. Nous avons choisi un rond-point avec des situations de GDOP comme discuté dans la section 3.1.2, comme par exemple lors du passage entre les nœuds 5 et 7.

Pour la simulation du réseau WSN, nous choisissons le simulateur WSNET [20]. WSNET est un simulateur à événements discrets modulaire capable de simuler des réseaux sans-fils et multi-sauts. Il fournit une implémentation réaliste des couches physique et liaison (MAC). La programmation des couches se fait en langage C, ce qui est un avantage pour une réutilisation du code sur des nœuds réels. Nous avons implémenté un module de mobilité conformément

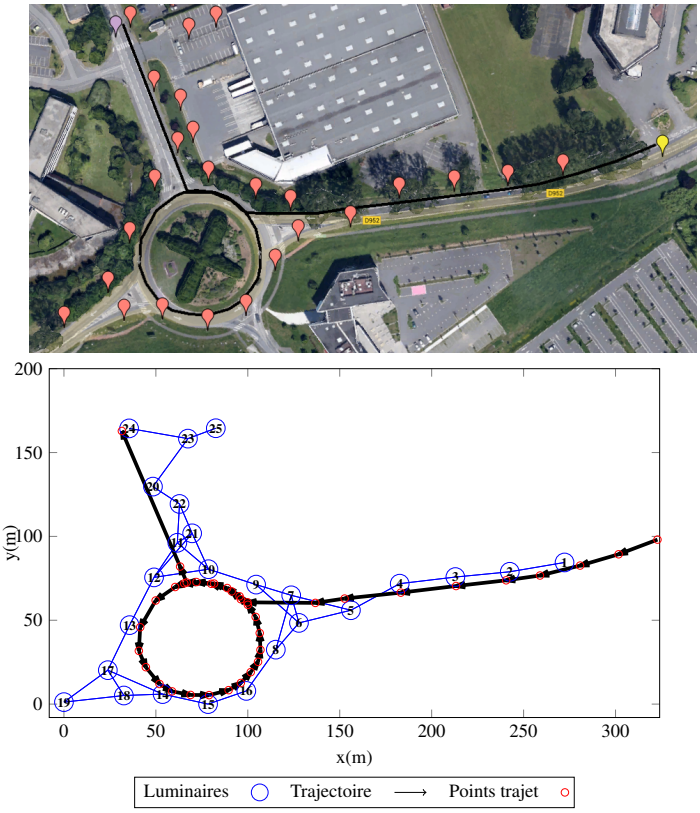


FIGURE 3.6 – Scenario d'évaluation extrait de la zone d'intérêt ($R_{max} = S = 35m$).

à la section 3.2.2, ainsi que deux modules applicatifs respectivement pour les nœuds fixes et les nœuds mobiles. La période d'échantillonnage du module de mobilité T_s a été fixée à $200ms$. Le nœud mobile, représentant le véhicule, est capable de s'auto-localiser avec l' algorithme (3.1).

La stratégie de simulation est illustrée par la figure 3.7. La période de transmission du *beacon* T_{beacon} a été fixée à $1s$, ce qui doit contraindre le taux de positionnement moyen à $1s$. La portée de communication, comme discuté dans la section 3.2.1, a été fixée à $R_{max} = S = 35m$; ce qui correspond à l'espacement inter-lampes maximal du scenario en question (figure 3.6). La vitesse du véhicule v a été fixée à $40km/h$. Les bruits de mesure sur les angles d'incidence sont modélisés par un bruit gaussien additif avec un écart-type σ_{AoA}.

Dans cette configuration, nous étudions l'effet des collisions au niveau MAC, ainsi que le niveau de bruit sur les mesures d'angles d'incidence σ_{AoA}, sur la performance de la localisation en termes de taux de positionnement et précision.

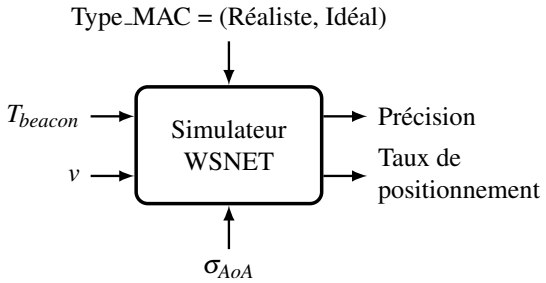


FIGURE 3.7 – Paramètres et sorties de simulation

3.3.1 L'effet des collisions (couche MAC)

Lorsqu'un nœud ancre transmet un message de type *beacon*, des collisions peuvent avoir lieu et ainsi retarder voir rendre impossible la localisation du nœud mobile se déplaçant dans le voisinage des luminaires malgré sa présence physique à proximité. Par conséquent, le taux de positionnement est affecté par ce phénomène. Afin d'en évaluer l'impact, nous comparons le cas d'une couche MAC parfaite (pas de collisions) avec celui de la couche MAC réaliste i.e de type IEEE 802.15.4 unslotted CSMA/CA avec une configuration standard [1]. Nous avons effectué 500 simulations avec un bruit de mesure d'angle d'incidence nul $\sigma_{AoA} = 0$, et nous observons le taux de positionnement moyen. La distribution du taux de positionnement est fournie dans la figure 3.8. Ce résultat nous suggère

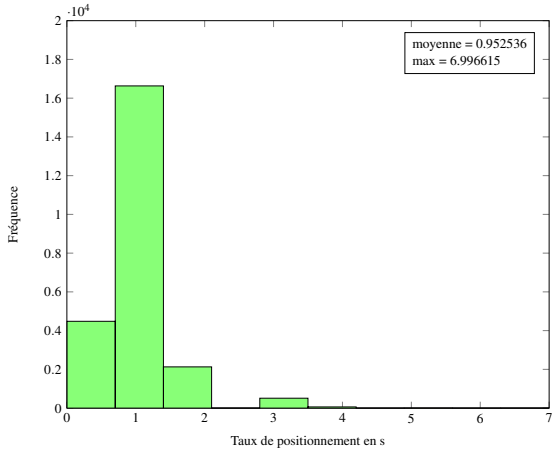


FIGURE 3.8 – Effet des collisions sur le taux de positionnement

que, même sur une trajectoire relativement courte comme dans la figure 3.6,

1. max-csma-backoff=4,min-backoff-exponent=3, max-backoff-exponent=5

la perte de paquets *beacon* au niveau du nœud mobile dégrade le taux de positionnement de 1 à $7s$ en présence de collisions. Dans la configuration choisie, cela signifie que le véhicule pourrait parcourir approximativement 78 mètres sans information de positionnement radio. La connaissance de la variabilité du taux de positionnement est clé dans une approche hybride comme la nôtre, car pendant ce laps de temps la navigation inertielle devrait prendre le relais pour extrapoler la position du véhicule à partir de sa dynamique mesurée.

3.3.2 Effet du bruit de radiogoniométrie

Maintenant nous nous intéressons au bruit de mesure des angles d'incidence. En effet, à cause de la dilution de précision (GDOP), même un faible bruit peut engendrer une erreur triangulation élevée. Afin d'étudier ce phénomène indépendamment des collisions, nous choisissons une couche MAC idéale et nous analysons l'effet de la GDOP ainsi que de la puissance du bruit σ_{AoA}.

Effet de la dilution de précision

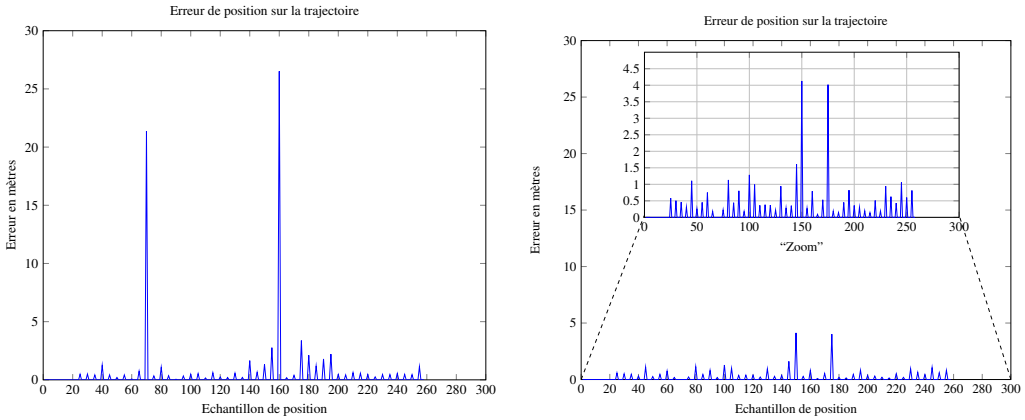
Afin de montrer l'effet de la GDOP, nous avons effectué deux simulations avec une faible puissance de bruit $\sigma_{AoA} = 1°$. Dans la première nous avons activé la détection de la GDOP (ligne 5 de l' algorithme (3.1)) et l'avons désactivée dans la seconde. Les résultats en terme d'erreur de positionnement instantanée sont montrés dans la figure 3.9. Nous observons par exemple, qu'aux positions 70 and 160, des erreurs élevées apparaissent. En revanche, lorsque la détection de GDOP est activée, les points aberrants sont détectés et éliminés et baissent considérablement l'erreur de positionnement moyenne (figure 3.9(b)).

Performance de l'algorithme de localisation

Afin d'évaluer la performance globale de l'algorithme de localisation, nous effectuons *500* simulations indépendantes et nous calculons l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sur l'ensemble des positions de la trajectoire en fonction de l'écart-type du bruit de mesure sur l'angle d'incidence σ_{AoA} :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\hat{P}_i - P_i\right\|_2^2}, \tag{3.8}$$

où n est le nombre de positions estimées par l'algorithme. La figure 3.10 montre l'évolution de la RMSE avec le l'écart-type σ_{AoA}. Comme on pouvait s'y attendre, l'erreur croit avec l'écart-type du bruit de mesure. Ce qui est cohérent avec des



(a) Sans détection de GDOP (b) Avec détection de GDOP

FIGURE 3.9 – Effet de la dilution de précision (GDOP) sur l'erreur de positionnement

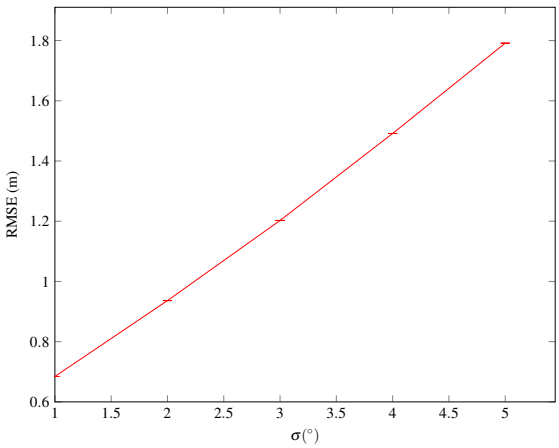


FIGURE 3.10 – Erreur moyenne quadratique (RMSE) de l'algorithme de localisation

résultats de la littérature [118] traitant le cas général. En terme de précision, la qualité de l'estimation est satisfaisante pour le contexte véhiculaire.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons confronté une radiogoniométrie passive à notre problématique de radiolocalisation véhiculaire opportuniste dans le contexte des villes intelligentes. Nous avons proposé une technique adaptée aux conditions de navigation qui en découlent ; notamment en termes de topologie de réseau non maîtrisée et de communications sur un seul canal avec un contrôle d'accès pour la gestion des collisions.

Clairement, la communication sur un seul canal est une limitation de l'approche du fait qu'il faut gérer le temps inter-paquets lors de l'attente des messages *beacon* pour la localisation. A cause des collisions, un paquet reçu peut être ignoré si le second arrive plus tard, ce qui représente une perte d'information au sens que le signal reçu n'a pas pu être exploité à des fins de localisation.

Outre les problèmes de collision, la topologie du réseau n'est pas maîtrisée et est souvent liée au contexte applicatif dans la ville intelligente (luminaires intelligents, compteurs intelligents...etc). De ce fait, des phénomènes de dilution de précision apparaissent régulièrement et viennent invalider des estimations de position sur des paquets reçus correctement. Là aussi, il s'agit d'une perte d'information supplémentaire.

Malgré toutes ces limitations, cette analyse s'est avérée très instructive sur les particularités du contexte visé. Elle nous a permis de faire un premier pas vers la navigation opportuniste dans les villes intelligentes [2].

Suite à cette analyse préliminaire, nous nous sommes intéressés à la couche physique et en particulier aux algorithmes de radiogoniométrie à base de réseaux d'antennes linéaires à petite ouverture (par rapport à la longueur d'onde). En étudiant le traitement du signal qui lui est propre, nous avons pu mobiliser des résultats récents sur les réseaux d'antennes à large ouverture, qui vont nous permettre de mesurer non seulement l'angle d'incidence mais aussi la distance par rapport à un luminaire. Cette particularité nous permettra de simplifier le problème d'un point de vue *communications* en n'utilisant qu'une seule ancre pour l'auto-localisation du véhicule. Dans cette perspective, un procédé de localisation à base de réseau d'antennes à large ouverture sera développé dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

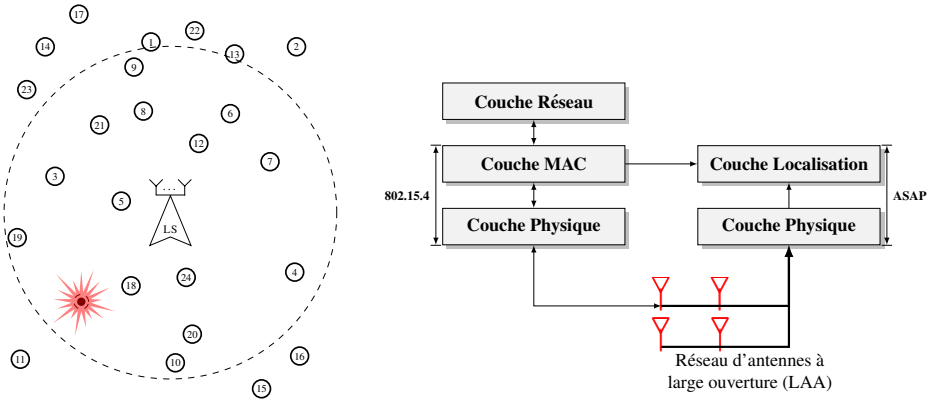
ASAP : RADIOLOCALISATION PASSIVE ET MONO-ANCRE POUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FILS

Après avoir confronté une radiogoniométrie standard à notre problématique, nous nous intéressons à la conception d'un système de localisation "passif" et "mono-ancre" nommé ASAP (Arrayed Single-Anchor Positioning). Nous présentons d'abord son architecture à base de réseau d'antennes à large ouverture ainsi que son fonctionnement global. Nous formulons ensuite le problème de localisation en termes de traitement du signal, puis nous prouvons un théorème spécifique aux réseaux d'antennes circulaires. Cette preuve constitue le fondement théorique d'ASAP qui justifie sa phase de fusion des métriques qui lui est spécifique. Les performances de la localisation sont ensuite évaluées dans toute la zone de localisation du système, afin d'en évaluer l'impact du rapport signal sur bruit et la topologie du réseau. Les résultats obtenus montrent une amélioration notable par rapport à la méthode analytique de l'état de l'art. L'erreur de localisation croît avec la distance par rapport à l'ancre ainsi qu'avec le rapport signal sur bruit (SNR). Globalement, l'approche est très efficace pour un SNR relativement élevé et admet une meilleure précision lorsque la source émet à proximité de l'ancre.

4.1 Approche retenue (*ASAP*) et état de l'art

La particularité des réseaux de capteurs sans fils réside dans les ressources limitées des nœuds du réseau et par le fait que les nœuds passent la majorité de leur temps en veille (du moins radio) afin d'économiser l'énergie. Lorsqu'on adresse le problème de localisation dans ce contexte, il est primordial d'en tenir compte. En particulier, il est préférable de ne pas interférer avec la fonction applicative du réseau à des fins de localisation.

Dans cette optique, le système *ASAP* qui sera détaillé plus loin, s'intègre bien dans un tel réseau. En effet, l'ancre est dotée d'un réseau d'antennes à large ouverture (par rapport à la longueur d'onde) ce qui lui permet à la fois d'écouter le canal et d'analyser le trafic. Dès qu'un paquet est détecté au niveau de la couche MAC (IEEE 802.15.4 par ex.), l'émetteur est identifié avec l'adresse source du paquet. En parallèle, les signaux démodulés et enregistrés sur toutes les antennes de l'ancre sont utilisés par la couche localisation pour localiser le nœud. La seule contrainte sur le nœud émetteur est d'émettre dans la zone de localisation (ZL) de l'ancre. Le procédé est illustré par la figure 4.1.



(a) Ancre et zone de localisation

(b) Architecture logicielle

FIGURE 4.1 – Système de localisation *ASAP*

La majorité des techniques de localisation utilise au moins trois ancres pour localiser le nœud source [75, 70]. Néanmoins, grâce à sa simplicité de déploiement et son effet limité sur le réseau, la localisation mono-ancre a fait l'objet de plusieurs recherches sur la localisation, en particulier dans le contexte des réseaux de capteurs sans fils.

Meissner *et al.* [80] ont proposé une technique de localisation mono-ancre en environnement intérieur qui exploite les composantes multi-chemins d'un signal Ultra-Large Bande (ULB). En utilisant la connaissance de la géométrie de la zone

d'intérêt (comme un appartement), les signaux réfléchis peuvent être vus comme des sources secondaires. Ainsi, à partir d'une seule ancre physique on peut construire plusieurs ancres virtuelles correspondant aux multi-chemins. L'idée directrice est qu'avec des signaux ULB, on peut séparer les signaux réfléchis du signal en vision directe. A l'aide de filtres adéquats, leur système est capable de traquer un agent mobile au sein d'un bâtiment. A part les aspects coûts (en comparaison à des radios en bande ISM), l'inconvénient majeur d'une telle approche est l'hypothèse de la disponibilité de la géométrie exacte de la zone d'intérêt, nécessaire pour la définition des ancres virtuelles.

Khan *et al.* [58] ont proposé l'utilisation d'antennes directives pour la construction d'une solution mono-ancre pour les WSNs. Ils proposent deux approches soit avec plusieurs antennes réparties sur la périphérie de l'ancre, soit une seule antenne rotative avec une vitesse de rotation fixe et connue. La première méthode est dite à grain grossier alors que la seconde est plus fine. L'inconvénient de ces solutions réside dans l'aspect actif de la localisation. En effet, la technique repose sur une synchronisation par échange de paquets entre l'ancre et la source. En outre, elle se base sur des mesures de RSSI, qui sont peu fiables à cause de leur dépendance à l'environnement [128, 52].

Giorgetti *et al.* [45] ont conçu et évalué une solution mono-ancre à base de réseau d'antennes commutées, de forme générale hexagonale. Le procédé se base sur des mesures d'angles d'incidence du signal reçu. Il fait en outre l'hypothèse que les nœuds du réseau qu'on cherche à localiser se situent tous dans le même plan, et que l'ancre se trouve à une hauteur fixe et connue par rapport à ce plan. Cette hypothèse sur le déploiement des nœuds est limitative et ne peut toujours être vérifiée.

Enfin, Rashid *et al.* [93] proposent une solution mono-ancre pour des nœuds déployés en grille. Leur méthode utilise des estimations de distances à base de mesures de RSSI. Des nœuds spéciaux, qui sont perpendiculaires à l'ancre, se localisent localement avec des mesures de distance. Le reste de réseau se localise ensuite, de proche en proche, avec une trilatération avec son voisinage précédemment localisé. Par construction, cette approche est limitée à un déploiement en grille, ce qui est nécessaire pour démarrer le processus avec la localisation des nœuds dits spéciaux.

Comparé aux approches existantes précédemment discutées, le système ASAP se distingue par son caractère passif et non-intrusif vis-à-vis des nœuds du réseau en termes de synchronisation et déploiement. Il s'agit d'une solution autonome qui opère indépendamment du réseau de capteurs que l'on cherche à localiser.

4.2 Formulation du problème de localisation

Dans cette section, nous formulons le problème de traitement de signal et localisation avec des réseaux d'antennes à large ouverture avec une modélisation pour le cas d'un signal en bande étroite à partir du cadre théorique de Manikas *et al.* [71, 72] : une méthode des sous-espaces [64, 78] formulée en champ proche.

4.2.1 Modèle du canal en zone de Fresnel

Considérons un réseau d'antennes à large ouverture (LAA) formé de N antennes omnidirectionnelles, avec un point de référence commun (origine de phase pris comme origine du système de coordonnées). La position des éléments de l'antenne, étant connue, peut être définie par

$$\mathbf{r} = [\underline{r}_1, \underline{r}_2, \ldots, \underline{r}_N] = \left[\underline{r}_x, \underline{r}_y, \underline{r}_z\right]^T \tag{4.1}$$

où $\underline{r}_i \in \mathcal{R}^{3\times 1}$ pour $i = 1 \ldots N$ est la position de la $i^{ème}$ antenne du réseau et $\underline{r}_x, \underline{r}_y, \underline{r}_z \in \mathcal{R}^{N\times 1}$ dénote ses coordonnées x, y and z. L'ouverture du réseau d'antenne est donc définie par (figure 4.2)

$$D = \max_{\forall i,j} \left\| \underline{r}_i - \underline{r}_j \right\|. \tag{4.2}$$

Supposons que le réseau d'antennes reçoive un signal, avec une porteuse de fréquence F_c véhiculant un message $m(t)$ (enveloppe complexe), d'une source se trouvant dans sa zone de Fresnel, à une position [1] $\underline{r}_m$ mesurée par rapport au point de référence

$$\underline{r}_m = [x, y, z]^T = \rho \cdot \underline{u}(\theta, \phi), \tag{4.3}$$

avec le vecteur directionnel pointant dans la direction de la source $\underline{u}(\theta, \phi) = [\cos\theta\cos\phi, \sin\theta\cos\phi, \sin\phi]^T$. Dans ces conditions, la zone de Fresnel du réseau d'antennes est délimitée par

$$\rho < \frac{2D^2 F_c}{c}. \tag{4.4}$$

Dans cette zone, la propagation de l'onde est sphérique, en contraste avec la propagation plane en champ lointain. Par conséquent, la réponse du réseau, outre sa dépendance à l'angle d'incidence, dépend aussi de la distance entre la source et les éléments du réseau.

1. L'azimut θ étant mesuré dans le sens contraire des aiguilles d'une montre par rapport à l'axe des x positifs, et l'angle d'élévation ϕ est mesuré dans le même sens à partir du plan $x - y$.

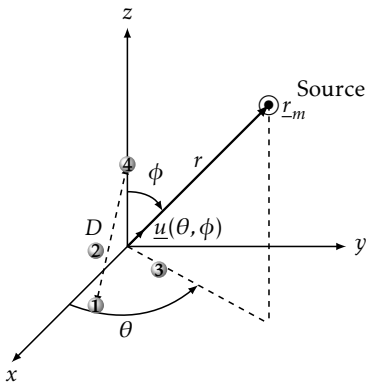


FIGURE 4.2 – Réseau d'antenne et source

Sous l'hypothèse de bande étroite, le signal reçu [2] $\underline{x}(t) \in \mathcal{C}^{N\times 1}$, démodulé en bande de base, par l'ensemble du réseau peut être modélisé comme suit

$$\underline{x}(t) = \underline{q} \odot \underline{S} m(t) + \underline{n}(t), \tag{4.5}$$

avec $\underline{q} \in \mathcal{C}^{N\times 1}$ modélisant l'effet inconnu d'affaiblissement du canal (fading). Le vecteur directionnel du réseau $\underline{S} \triangleq \underline{S}(\theta, \phi, \rho, \mathbf{r}, F_c)$ représente la réponse du réseau d'antennes. Enfin, le vecteur $\underline{n}(t) \in \mathcal{C}^{N\times 1}$ dénote un bruit blanc gaussien additif avec comme puissance σ^2 et matrice de covariance

$$\mathbb{R}_{nn} = \sigma_n^2 \mathbb{I}_N \in \mathcal{C}^{N\times N}. \tag{4.6}$$

Dans la direction (θ, ϕ, ρ), le vecteur directionnel du réseau dans la zone de Fresnel, peut être modélisé par

$$\underline{S} = (\rho \cdot \underline{1}_N \oslash \underline{\rho})^a \odot \exp(-j\frac{2\pi F_c}{c} \cdot (\rho \cdot \underline{1}_N - \underline{\rho})) \tag{4.7}$$

où a est une constante connue ou estimée au préalable modélisant le coefficient d'atténuation du canal (path loss exponent ou PLE). Le vecteur $\underline{\rho}$ dénote les distances (inconnues) entre la source et chacune des antennes du réseau

$$\underline{\rho} = [\rho_1, \rho_2, \ldots, \rho_N]^T \in \mathcal{R}^{N\times 1}. \tag{4.8}$$

2. Il s'agit de la composante du signal en vision directe. En présence de multi-chemins, cette dernière peut être efficacement extraite (pré-traitement) à partir des signaux reçus [121].

A partir de l'équation (4.5), la matrice de covariance du signal reçu s'écrit

$$\mathbb{R}_{xx} = \mathcal{E}\{\underline{x}(t)\underline{x}(t)^H\} = \mathbb{R}_{ss} + \mathbb{R}_{nn} \tag{4.9}$$

où $\mathbb{R}_{nn} = \sigma^2 \mathbb{I}_n$ est la matrice de covariance du bruit, et la matrice de covariance du signal (utile) est :

$$\mathbb{R}_{ss} = P_m \left(\underline{q} \odot \underline{S}\right) \cdot \left(\underline{q} \odot \underline{S}\right)^H \tag{4.10}$$

où P_m est la puissance du message $m(t)$. La matrice $\mathbb{R}_{ss}$ étant hermitienne et de rang unité, elle admet une seule valeur propre réelle non nulle (cf. Annexe A.)

$$\lambda = \|\underline{q} \odot \underline{S}\|^2 = P_m \rho^{2a} \underline{1}_N^T \left(\underline{q} \odot \underline{q}^* \odot \underline{\rho}^{-2a}\right). \tag{4.11}$$

En pratique, on n'observe qu'un nombre limité d'échantillons L du signal qu'on range comme suit

$$\mathbb{X} = [\underline{x}(t_1), \underline{x}(t_2), \ldots, \underline{x}(t_L)] \in \mathcal{C}^{N \times L}. \tag{4.12}$$

Dans ce cas, la matrice de covariance peut être approximée par

$$\mathbb{R}_{xx} \approx \mathbb{R} = \frac{1}{L} \mathbb{X} \cdot \mathbb{X}^H. \tag{4.13}$$

Ainsi, en cohérence avec l'équation (4.9), la valeur propre du signal peut être approximée à partir de la valeur propre principale de $\mathbb{R}$ comme suit

$$\lambda \approx max(eig(\mathbb{R})) - \hat{\sigma}^2, \tag{4.14}$$

avec $\hat{\sigma}^2$ comme approximation de la puissance du bruit. Cette dernière s'estime directement en prenant la moyenne des valeurs propres non principales de $\mathbb{R}$.

4.2.2 Phase d'association et métriques

Sans perte de généralité, supposons que le point de référence du réseau d'antennes soit placé à la $i^{ème}$ antenne. Dans ce cas, toutes les mesures $\mathbb{X}$ seront prises par rapport à ce nouveau point de référence (changement d'origine). Le modèle correspondant s'écrit donc :

— Vecteur directionnel du réseau $\underline{S}_i$ avec une géométrie d'antennes $\mathbf{r_i} = \mathbf{r} - \underline{r}_i \underline{1}_N^T$ et une source à $(\theta_i, \phi_i, \rho_i)$ par rapport à ce nouveau point de référence.

— L'observation $\mathbb{X}_i$ avec comme matrice de covariance $\mathbb{R}_i$ et valeur propre λ_i.

Arbitrairement, prenons la première antenne $\underline{r}_1$ comme point de référence *primaire*. En changeant le point de référence vers la $i^{ème}$ antenne, et en répétant

le processus pour toutes les $N-1$ antennes, on peut prouver [72] à partir de (4.11) que le rapport des valeurs propres ainsi construites est relié aux distances antennes-source comme suit :

$$\mathcal{K}_i = \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\right)^{\frac{1}{2a}} = \frac{\rho_i}{\rho_1} \quad \forall i = 2 \ldots N. \tag{4.15}$$

4.2.3 La fusion des métriques *Analytique*

Il est prouvé dans [72] que les métriques dans (4.15) génèrent des lieux circulaires dont l'intersection correspond à la position de la source $\underline{r}_m$. Plus précisément, à partir de l'estimation des valeurs propres du signal, on peut construire $N-1$ lieux circulaires définis par

$$\mathcal{C}_i = \mathcal{C}(\underline{r}_1, \underline{r}_i, \mathcal{K}_i) \triangleq \mathcal{C}(\underline{r}_{c_i}, R_{c_i}). \tag{4.16}$$

Cette définition, connue sous la définition d'Apollonius d'un cercle [86, §18.3], permet de définir un cercle avec deux foyers $(\underline{r}_1, \underline{r}_i)$ et un rapport constant $\mathcal{K}_i$.

Définition 1 (Cercle d'Apollonius)**.** *Selon la définition d'Apollonius, un cercle peut être décrit d'une manière unique à partir d'un couple de points* $(\underline{r}_1, \underline{r}_i)$ *et un rapport constant* $\mathcal{K}_i$ *:*

$$\mathcal{C}_i = \mathcal{C}(\underline{r}_1, \underline{r}_i, \mathcal{K}_i) \triangleq \left\{ \underline{r}_m \in \mathcal{R}^2, \frac{\|\underline{r}_m - \underline{r}_i\|}{\|\underline{r}_m - \underline{r}_1\|} = \mathcal{K}_i \right\}.$$

Lorsque $\mathcal{K}_i \neq 1$*, le centre et le rayon du cercle sont donnés par*

$$\begin{cases} \underline{r}_{c_i} = \dfrac{1}{1-\mathcal{K}_i^2}\underline{r}_i - \dfrac{\mathcal{K}_i^2}{1-\mathcal{K}_i^2}\underline{r}_1 \\ R_{c_i} = \left|\dfrac{\mathcal{K}_i}{1-\mathcal{K}_i^2}\right| \cdot \|\underline{r}_1 - \underline{r}_i\| \end{cases}$$

et lorsque $\mathcal{K}_i = 1$*, le cercle dégénère en la médiatrice du segment* $(\underline{r}_1 - \underline{r}_i)$*.*

A partir de l'équation (4.15), la méthode de fusion de métrique dans [72], référencée ici comme *méthode analytique*, résout un système d'équations de la

forme $\mathbb{H}\underline{r}'_m = \underline{b}$:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 2(\underline{r}_1 - \underline{r}_2)^T, & (1-\mathcal{K}_2^2) \\ 2(\underline{r}_1 - \underline{r}_3)^T, & (1-\mathcal{K}_3^2) \\ \vdots & \vdots \\ 2(\underline{r}_1 - \underline{r}_N)^T, & (1-\mathcal{K}_N^2) \end{bmatrix}}_{\mathbb{H}} \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{r}_m \\ \rho_1^2 \end{bmatrix}}_{\underline{r}'_m} = \underbrace{\begin{bmatrix} \|\underline{r}_1\|^2 - \|\underline{r}_2\|^2 \\ \|\underline{r}_1\|^2 - \|\underline{r}_3\|^2 \\ \vdots \\ \|\underline{r}_1\|^2 - \|\underline{r}_N\|^2 \end{bmatrix}}_{\underline{b}}. \tag{4.17}$$

4.2.4 Les sources d'erreurs

Par ailleurs, les sources d'erreurs ont été étudiées dans [71, 72] et montrent que la borne supérieure de l'erreur moyenne quadratique de localisation (RMSE) prend la forme suivante :

$$\text{RMSE} \leq \underbrace{\frac{N}{2a\lambda_1\sqrt{SNR \times L}}}_{1^{er}terme} \cdot \underbrace{\sqrt{trace\,(\mathbb{F}^T(\mathbb{F}\mathbb{F}^T)^{-2}\mathbb{F}((\mathbb{Z}^T\mathbb{Z}) \odot \mathbb{I}_{N-1}))}}_{2^{ème}terme}, \tag{4.18}$$

avec

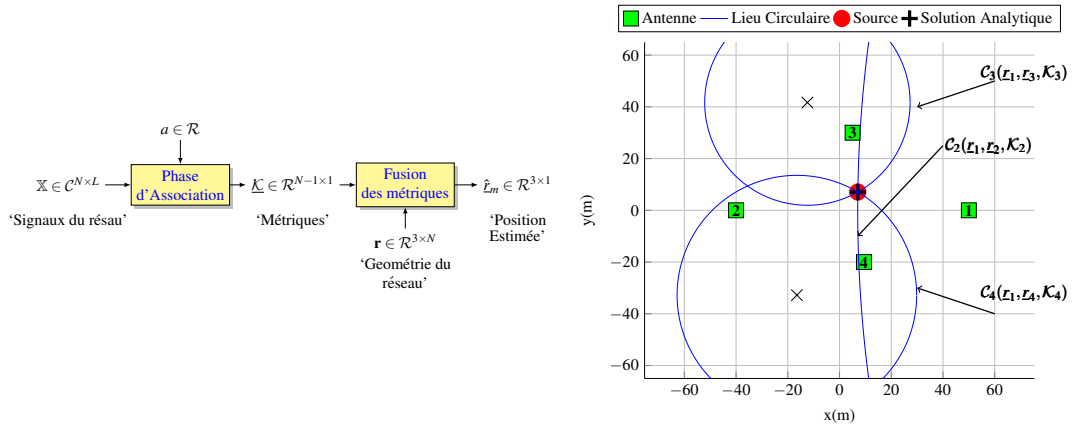
$$\begin{aligned}
&\mathbb{Z}^T = diag(\underline{K}) \cdot \left(\underline{1}_{N-1}\underline{r}_1^T - \tilde{\mathbf{r}}^T\right) \in \mathcal{R}^{(N-1)\times 3} \\
&\mathbb{F} = \left[\underline{\mathcal{F}}_2, \underline{\mathcal{F}}_3, \ldots, \underline{\mathcal{F}}_N\right] \in \mathcal{R}^{3\times(N-1)} \\
&\text{où :} \\
&\underline{K} = \left(\underline{1}_{N-1} - \underline{\mathcal{K}}^{2a}\right) \odot ((\underline{1}_{N-1} - \underline{\mathcal{K}})^2 \odot \underline{\mathcal{K}}^{2a-1})^{-1} \in \mathcal{R}^{(N-1)\times 1} \\
&\underline{\mathcal{F}}_i = \frac{1}{R_{ci}}(\underline{r}_m - \underline{r}_{c_i}) \in \mathcal{R}^{3\times 1}.
\end{aligned}$$

La matrice $\mathbb{F}$ est aussi appelée la matrice focale du système (*focusing matrix*), avec ses colonnes $\underline{\mathcal{F}}_i$ appelées les vecteurs focaux (*focusing vectors*). Ces derniers sont unitaires et pointent depuis les centres des lieux circulaires $\underline{r}_{c_i}$ (définition 1) vers le point focal (*focusing point*) du système à la position $\underline{r}_m$.

L'erreur de localisation est donc affectée par la taille du réseau d'antennes, le rapport signal sur bruit (SNR), ainsi que le nombre d'échantillons (L). Plus important, cette erreur dépend de la géométrie du réseau d'antennes vis-à-vis de la position de la source i.e pour une position donnée, une géométrie de réseau fournit de bons résultats alors que pour une autre position l'erreur peut être plus élevée. On peut citer les auteurs dans [72] : "It is important to note that a good array geometry for one source location may be bad for another.".

4.2.5 Synthèse

La méthode de localisation à base d'un réseau d'antennes à large ouverture (LAA) se divise donc en deux phases : *association* et *fusion des métriques*. Elle est illustrée par la figure 4.3 pour un réseau d'antennes de N éléments positionnés par la matrice $\mathbf{r}$ et en réception d'un signal de L échantillons transmis par une source à une position $\underline{r}_m$.



(a) Principe (b) Exemple

FIGURE 4.3 – Localisation par réseaux d'antennes à large ouverture (LAA)

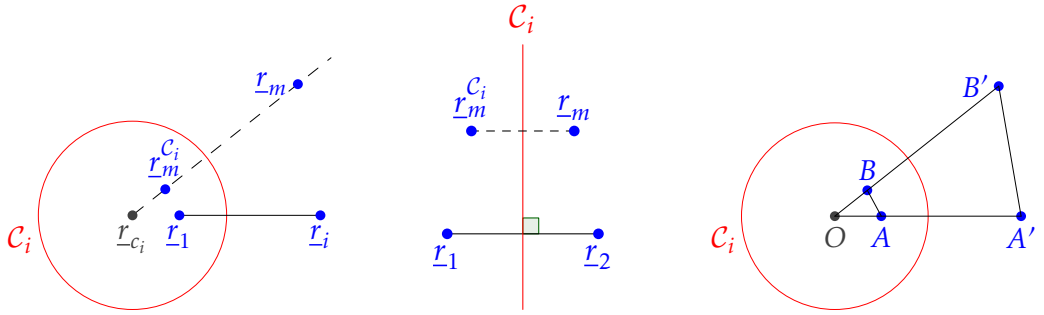
La méthode de localisation LAA admet les caractéristiques suivantes :

1. Elle utilise le signal en vision directe. En présence de multi-chemins, le signal de vision directe peut être extrait dans une phase de prétraitement comme dans [121].
2. Elle suppose que le coefficient d'atténuation du canal (coefficient a dans l'équation (4.7)) est connu.
3. Elle suppose que le réseau d'antennes est calibré. La calibration du réseau d'antennes a été traitée dans la thèse de Willerton dans [129], mais suppose aussi que le coefficient a est connu.
4. Son erreur de localisation dépend de la géométrie du réseau : une géométrie peut être bonne pour une position et s'avérer mauvaise pour une autre.
5. Elle a été validée expérimentalement pour une configuration (réseau d'antenne et source) dans [130, 7].

La géométrie du réseau joue donc un rôle clé dans ce type d'approche, c'est la raison pour laquelle dans la section qui suit nous nous intéressons au cas de réseaux d'antennes circulaires (voire presque-circulaires). Quant à l'estimation du coefficient a, ce problème est traité dans le chapitre 5.

4.3 Les ambiguïtés des réseaux d'antennes circulaires

Nous prouvons que pour une géométrie circulaire, les cercles de la définition 1 admettent deux points d'intersection qui sont inverses par rapport au cercle du réseau d'antennes.



(a) Normal (b) Dégénéré en droite (c) Propriété **P.5**

FIGURE 4.4 – Inversion par rapport à un cercle

Définition 2 (Inversion par rapport à un cercle, figure 4.4)**.** *Soient un point $\underline{r}_m$ et un cercle $\mathcal{C}_i$ de centre $\underline{r}_{c_i}$ et de rayon R_{c_i}. L'inverse de $\underline{r}_m$ par rapport à $\mathcal{C}_i$ est définit avec l'opérateur $(\cdot)^{\mathcal{C}_i}$ comme suit :*

$$\underline{r}_m^{\mathcal{C}_i} = \underline{r}_{c_i} + \frac{R_{c_i}^2}{\|\underline{r}_m - \underline{r}_{c_i}\|^2} \cdot \left(\underline{r}_m - \underline{r}_{c_i}\right).$$

Le centre de $\mathcal{C}_i$ est appelé le pôle ou le centre de l'inversion. Dans le cas dégénéré ($\mathcal{K}_i = 1$), $\underline{r}_m^{\mathcal{C}_i}$ devient le symétrique de $\underline{r}_m$ par rapport à la médiatrice du segment $[\underline{r}_1 - \underline{r}_i]$ (cf.[86, §20.3]).
Cette transformation admet de nombreuses propriétés, voici celles qui nous intéressent ici.

- ***P.1*** *L'inversion par rapport à un cercle est une involution i.e $(\underline{r}_m^{\mathcal{C}_i})^{\mathcal{C}_i} = \underline{r}_m$.*
- ***P.2*** *Inverser le pôle l'envoie à l'∞ i.e il disparaît du plan Euclidien.*
- ***P.3*** *Tous les points sur le cercle d'inversion sont invariants i.e $\underline{r}_m^{\mathcal{C}_i} = \underline{r}_m$.*
- ***P.4*** *L'inverse de tout point à l'intérieur du cercle se trouve obligatoirement à l'extérieur de celui-ci et vice-versa.*
- ***P.5*** *Étant donné un triangle OAB, un cercle $\mathcal{C}_i$ centré en O, et deux points $A' = A^{\mathcal{C}_i}, B' = B^{\mathcal{C}_i}$, alors les triangles OAB and OA'B' sont semblables [86, §23.1].*

Définition 3 (Réseau à géométrie circulaire)**.** *Un réseau d'antennes* **r** *est dit à géométrie* circulaire *lorsque tous ces éléments* $\underline{r}_i$ *sont* cocycliques.

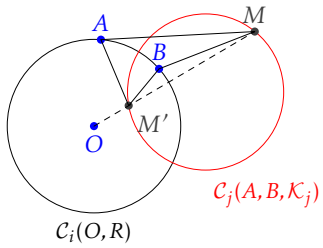
Définition 4 (Réseau à géométrie linéaire)**.** *Un réseau d'antennes* **r** *est dit à géométrie* linéaire *lorsque tous ces éléments* $\underline{r}_i$ *sont* colinéaires.

4.3.1 Ambiguïtés dans le plan (2D)

Lemme 1. *Soit $\mathcal{C}_i$ un cercle de centre O et de rayon R, et deux points distincts A et B de ce cercle. Notons $\mathcal{C}_j = \mathcal{C}(A, B, \mathcal{K}_j)$ un cercle d'Apollonius, alors la relation suivante est vraie pour tout point du plan M :*

$$M \in \mathcal{C}_j \Longleftrightarrow M' = M^{\mathcal{C}_i} \in \mathcal{C}_j.$$

Démonstration. Il suffit de démontrer le rapport $\frac{MA}{MB} = \frac{M'A}{M'B}$.



En effet, grâce aux propriétés **P.3** et **P.5** de l'inversion par rapport au cercle (cf. Définition 2), le triangle OAM (resp.OBM) est semblable au triangle OAM' (resp. OBM'). Par conséquent :

$$\frac{MA}{M'A} = \frac{OM}{OM'} \text{ et } \frac{MB}{M'B} = \frac{OM}{OM'}.$$

Or, par définition de l'inversion nous avons $OM \cdot OM' = R^2$, ce qui donne

$$MA = \left(\frac{OM}{R}\right)^2 \cdot M'A \text{ et } MB = \left(\frac{OM}{R}\right)^2 \cdot M'B,$$

et donc le ratio recherché $\frac{MA}{MB} = \frac{M'A}{M'B}$, ce qui prouve que M et M' appartiennent au même cercle $\mathcal{C}(A, B, \mathcal{K}_j)$. Il est aussi important de noter que ce ratio est indépendant du rayon du cercle $\mathcal{C}_i$, et demeure donc valable lorsque ce dernier dégénère en une droite. ■

Théorème 1. *Soient une source $\underline{r}_m$ et un réseau d'antennes circulaire (resp. linéaire)* $\mathbf{r}$. *L'ensemble des lieux circulaires $\mathcal{C}_i = \mathcal{C}(\underline{r}_1, \underline{r}_i, \mathcal{K}_i)$ admet toujours deux points d'intersections $\underline{r}_m$ et $\underline{r}_m^{\mathcal{C}_r}$ qui sont inverses par rapport au cercle $\mathcal{C}_r$ (resp. symétriques par rapport à la droite) passant par les éléments du réseau.*

Démonstration. Par construction des métriques $\mathcal{K}_i$ et le lemme 1, nous avons respectivement

$$\underline{r}_m \in \mathcal{C}_i \quad \text{et} \quad \underline{r}_m^{\mathcal{C}_r} \in \mathcal{C}_i \quad \forall i = 2 \ldots N.$$

Par conséquent, les lieux circulaires $\mathcal{C}_i$ se coupent en deux points inverses par rapport au cercle du réseau d'antennes $\mathcal{C}_r$:

$$\bigcap_{i=2\ldots N} \mathcal{C}_i = \left\{\underline{r}_m, \underline{r}_m^{\mathcal{C}_r}\right\}$$

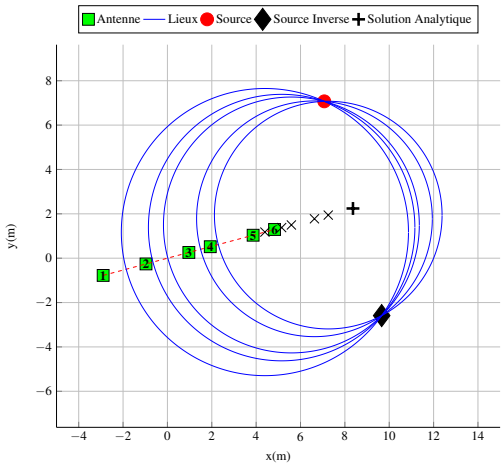
■

Corollaire 1. *Lorsque la source se trouve sur le cercle (resp. la droite) du réseau $\mathcal{C}_r$, il y a exactement une solution (propriété P.3 de l'inversion, définition 2). Dans le cas d'un réseau circulaire, lorsque la source se trouve au centre du cercle, son inverse est envoyé à l'infini, ce qui donne une seule solution dans une géométrie Euclidienne.*

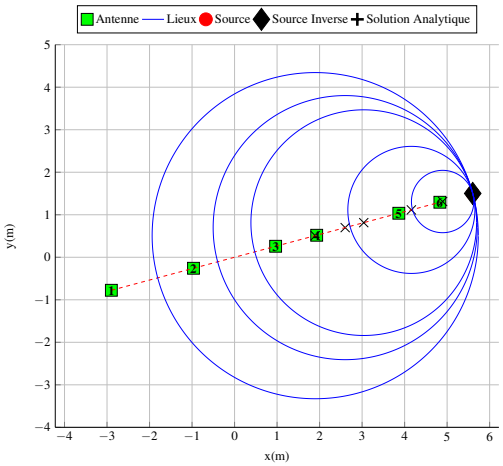
Afin d'observer les ambiguïtés de localisation et leurs symétries par rapport au réseau d'antennes, nous avons choisi deux géométries de réseau respectivement linéaire (passant par l'origine) et circulaire (centrée à l'origine) :

$$\begin{aligned}
\mathbf{r}_1 &= \begin{bmatrix} \cos(15°) & -\sin(15°) & 0 \\ \sin(15°) & \cos(15°) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -3 & -1 & 1 & 2 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{r}_2 &= \begin{bmatrix} 2 & -2 & -2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & -2 & -2 & 2\sqrt{2} & -2\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{4.19}$$

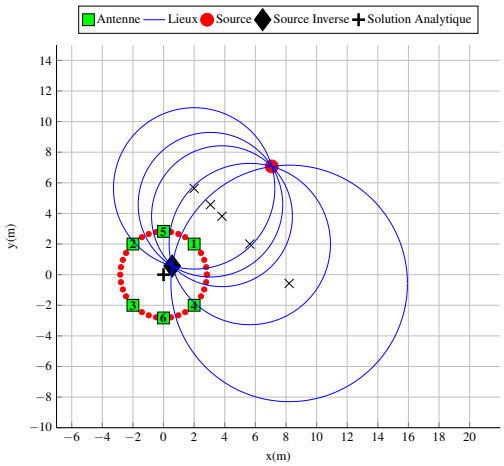
Les résultats sont affichés dans la figure 4.5. L'existence de deux solutions inverses par rapport au cercle du réseau (ou symétriques par rapport à la droite du réseau) ne fait aucun doute. Il est intéressant d'observer dans la figure 4.5(e), que lorsque la source se trouve au centre du réseau (centre d'inversion), les lieux circulaires dégénèrent en des droites se coupant au centre du réseau et envoyant la deuxième solution à l'∞.



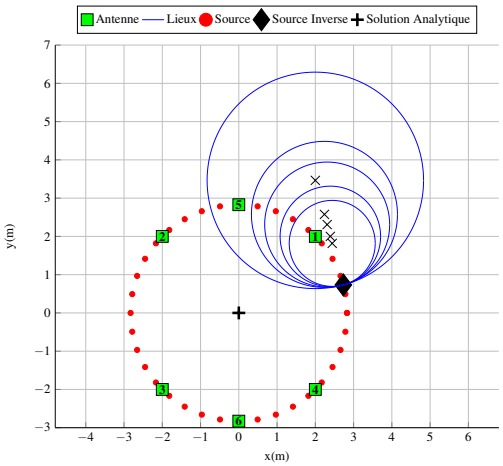
(a) Réseau linéaire avec deux solutions inverses



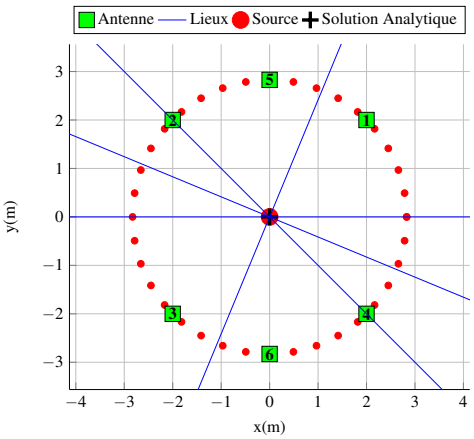
(b) Réseau linéaire avec deux solutions inverses et confondues



(c) Réseau circulaire avec deux solutions inverses



(d) Réseau circulaire avec deux solutions inverses et confondues



(e) Réseau circulaire avec une solution à l'∞

FIGURE 4.5 – Ambiguïtés de la la localisation LAA en 2D

4.3.2 Ambiguïtés dans l'espace (3D)

Dans l'espace, l'inversion par rapport à un cercle devient une inversion par rapport à une sphère [17, §5.1], et se construit de la même manière que dans le plan (cf. définition 2). Par conséquent, tous les résultats précédents restent valables dans l'espace à une formulation près :

— Les ambiguïtés apparaissent pour les réseaux sphériques et planaires.

— L'inversion par rapport au cercle devient l'inversion par rapport à la sphère

— La symétrie par rapport à une droite devient la symétrie par rapport au plan

En somme, les ambiguïtés apparaissent lorsque la source n'est pas coplanaire avec les éléments du réseau (pour les réseaux planaires) et lorsqu'elle n'est pas sur la même sphère du réseau (pour les réseaux sphériques).

4.3.3 Ambiguïtés dans la *méthode analytique*

Comme expliqué dans la section 4.2.3, la méthode analytique résout un système d'équations linéaires de la forme $\mathbb{H}\underline{r}'_m = \underline{b}$ avec la matrice pseudo-inverse $\mathbb{H}^{\#}$:

$$\underline{r}'_m = \mathbb{H}^{\#}\underline{b}. \tag{4.20}$$

Cela suppose que la matrice $\mathbb{H}$ est de rang 3 en 2D et 4 en 3D. Or, les simulations ont révélé que pour les géométries de réseau source d'ambiguïtés, la matrice $\mathbb{H}$ avait un rang 2 en 2D et 3 en 3D, ce qui fournissait une estimation erronée. Etant donné que nous avons opté pour une approche de localisation géométrique, nous ne sommes pas intéressés à la preuve de cette assertion et nous la laissons pour des travaux futurs.

4.4 La fusion de métriques d'*ASAP*

En vertu du Théorème 1, si l'on prend un réseau d'antennes circulaire (voire presque-circulaire) nous obtiendrons toujours deux solutions au problème de localisation : une à l'intérieur (englobée par les antennes du réseau) et l'autre à l'extérieur du cercle du réseau d'antennes. Si l'on réduit suffisamment l'ouverture du réseau d'antennes, on peut physiquement éliminer une des deux solutions : celle qui se trouve à l'intérieur. Comparé à la méthode de localisation analytique, qui se trouve fortement perturbée avec ce type de réseaux, le gain en qualité de localisation est considérable. C'est l'idée fondatrice de l'algorithme *ASAP* qui propose de classer les points d'intersection des lieux circulaires en deux catégories : intérieur et extérieur du cercle du réseau d'antennes. L'ouverture étant

réduite, l'estimation de la position de la source est prise comme le barycentre des points d'intersection dits extérieurs. L'algorithme *ASAP* est détaillé dans l'algorithme (4.1), avec comme origine du système de coordonnées le centre du cercle du réseau. En bref, l'algorithme ASAP constitue une fusion de métriques *géométrique* en contraste avec la fusion de métriques analytique dans (4.17). Enfin, les grappes (*clusters*) d'intersection et leurs barycentres sont illustrés dans la figure 4.6.

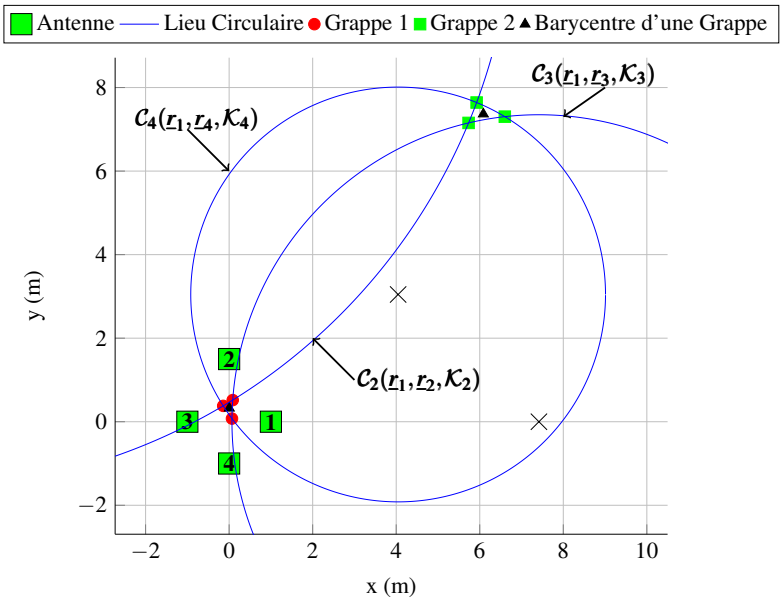


FIGURE 4.6 – Exemple d'intersections de lieux circulaires et barycentres. Il est important de noter que le lemme 1 nous garantit que les points du cluster intérieur sont inverses des points du cluster extérieur quelle que soit la position de la source.

Algorithme 4.1 L'algorithme de localisation *ASAP*.

Initialisation

ÉTAPE-1 : Une source gagne l'accès au canal et émet un message dans la zone de localisation (ZL).

ÉTAPE-2 : L'ancre, équipée d'un réseau d'antennes $N - aire$, détecte le message et mesure les signaux par rapport au point de référence primaire.

ÉTAPE-3 : Rotation du point de référence du réseau d'antennes sur l'ensemble des antennes du réseau pour construire N matrices $\mathbb{X}_i$ avec leurs statistiques du second ordre $\mathbb{R}_i$.

ÉTAPE-4 : Construction du vecteur de métriques $\underline{\mathcal{K}}$ via (4.15) via une décomposition en valeurs propres des matrices $\mathbb{R}_i$.

ÉTAPE-5 : Construction des lieux $\mathcal{L} = \left\{r_{c_i}, R_{c_i}\right\}_{i=2\ldots N}$, conformément à la définition 1, à partir de la géométrie du réseau d'antennes $\mathbf{r}$ et l'estimation du vecteur $\underline{\mathcal{K}}$.

Algorithme

fonction Localisation(r_{c_i}, R_{c_i})
  $[\mathfrak{C}_1, \mathfrak{C}_2] :=$ Clustering(r_{c_i}, R_{c_i}) ;
  si $est_vide(\mathfrak{C}_1)$ **et** $est_vide(\mathfrak{C}_2)$ **alors**
    $\underline{\hat{r}}_m =$ barycentre$(\underline{r}_{c_i})$ ▹ Pas d'intersection
  sinon si est_vide$(\mathfrak{C}_1)$ **alors**
    $\underline{\hat{r}}_m =$ barycentre$(\mathfrak{C}_2)$ ▹ Une seule intersection
  sinon si $est_vide(\mathfrak{C}_2)$ **alors**
    $\underline{\hat{r}}_m =$ barycentre$(\mathcal{C}_1)$ ▹ Une seule intersection
  sinon ▹ Deux intersections
    $\underline{\hat{c}}_1 =$ barycentre$(\mathfrak{C}_1)$
    $\underline{\hat{c}}_2 =$ barycentre$(\mathfrak{C}_2)$
    si $(\|\underline{\hat{c}}_1\| > \|\underline{\hat{c}}_2\|)$ **alors**
      $\underline{\hat{r}}_m = \underline{\hat{c}}_1$;
    sinon
      $\underline{\hat{r}}_m = \underline{\hat{c}}_2$;
    fin si
  fin si
  retourne $\underline{\hat{r}}_m$
fin fonction
fonction Clustering(r_{c_i}, R_{c_i})
  $\mathbb{P}_i = \bigcap_{i=2}^{N} \mathcal{C}_i\left(\underline{r}_{c_i}, R_{c_i}\right)$; ▹ intersection des lieux circulaires
  $\mathfrak{C}_1 \triangleq 1^{er}$ sous-ensemble de $\mathbb{P}_i$ les plus proches entre eux.
  $\mathfrak{C}_2 \triangleq 2^{nd}$ sous-ensemble de $\mathbb{P}_i$ les plus proches entre eux.
  retourne $[\mathfrak{C}_1, \mathfrak{C}_2]$
fin fonction

4.5 Résultats des simulations numériques

Dans cette section, nous étudions l'erreur de localisation de l'approche avec une simulation numérique sous Matlab [3]. Pour ce faire, nous considérons un réseau d'antennes planaire comportant $N = 4$ éléments, ce qui représente le nombre minimal d'antennes pour une localisation dans l'espace $\mathcal{R}^2$. Nous avons choisi deux géométries de réseau à ouverture réduite, respectivement presque-circulaire et circulaire comme suit :

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1.5 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} 1.25 & 0 & -1.25 & 0 \\ 0 & 1.25 & 0 & -1.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{4.21}$$

Ces géométries ont les même ouvertures et rayons de la zone de localisation (ZL)

$$D = 2.5m, \quad rayon(\text{ZL}) = 101.25m. \tag{4.22}$$

Il faut noter que l'ouverture est petite comparée à celle dans [72] ayant une ouverture de 90m, dans le cas de la géométrie nommée "*good* array geometry".

Nous simulons un canal avec un coefficient d'atténuation (path loss) $a = 2$, ainsi qu'un affaiblissement modélisé par une variable aléatoire complexe dont le module suit une loi log-normale de moyenne 0 dB et d'écart-type 8 dB et la phase suit une distribution uniforme sur l'intervalle $0 - 2\pi$ radians.

Étant donné que le contexte ciblé est celui des WSNs, nous adoptons le standard IEEE 802.15.4 [54] pour la sélection de la fréquence, la modulation du message, ainsi que pour les valeurs typiques du SNR. Par conséquent, nous supposons que la source transmet avec une porteuse $F_c = 2.43$GHz (i.e canal 16) de la bande ISM (2.4GHz). Dans cette bande, une modulation O-QPSK est utilisée avec des symboles sur 4-bits. Chaque symbole est ensuite associé à une séquence (en anglais chip) de 32 bits à partir d'un dictionnaire de 16 séquences (16-array DSSS spreading). Pour mémoire, le débit est de $62.5Ksymboles/s$ soit $2Mchip/s$. Ainsi, si la source transmet un paquet de 16 bits (2 octets), on aura comme nombre d'échantillons $L = 128$: 16 bits $\rightarrow$ 16/4 = 4 symboles $\rightarrow 4 \times 32 =$ 128 échantillons. Ici, nous avons généré les octets du paquet à partir d'une distribution uniforme sur l'intervalle $0 - 255$, et fixé le nombre d'échantillons à $L_{max} = 8128$; ce qui correspond à la taille maximale d'un paquet de 127 octets (type DATA et taille *aMaxPHYPacketSize*).Pour le SNR, à des fins d'évaluation, nous considérons les valeurs suivantes :

— $\text{SNR}_{low} = 0$ dB : autant de signal que de bruit

— $\text{SNR}_{good} = 5$ dB : bon dans le contexte des WSNs

3. http ://www.mathworks.com/products/matlab/

— $\text{SNR}_{high} = 20$ dB : élevé dans le contexte des WSNs.

Enfin, nous utilisons la métrique suivante pour l'erreur de localisation

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\underline{r}_m - \underline{\hat{r}}_m\right\|^2}. \tag{4.23}$$

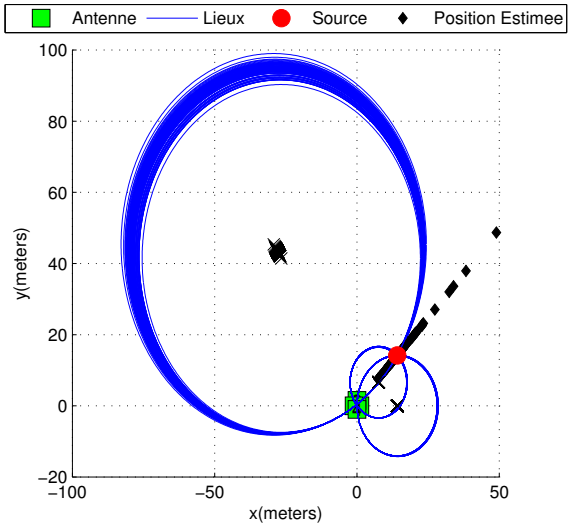
4.5.1 Comparaison avec la méthode analytique

Afin d'illustrer le mauvais conditionnement de la méthode analytique, nous choisissons la géométrie $\mathbf{r}_1$ presque circulaire de (4.21). Le canal est simulé avec des SNR acceptables $SNR = 20dB$ puis $SNR = 5dB$ avec une source émettant un message de L_{max} échantillons depuis la position : $\rho_m = 20m, \theta_m = 45°, \phi_m = 0°$.

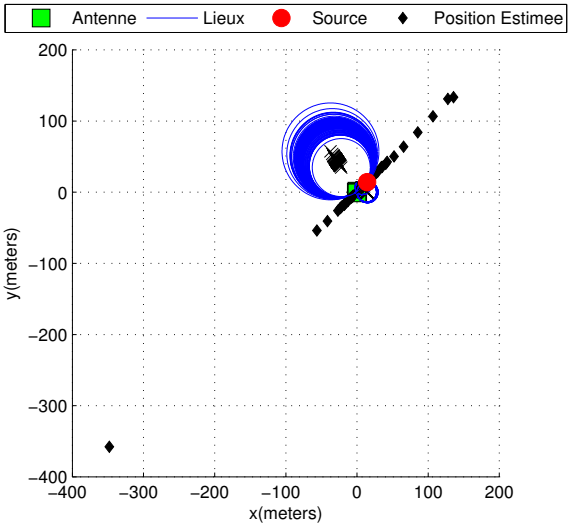
Les simulations ont été répétées 100 fois, puis nous examinons les lieux circulaires générés ainsi que l'estimation de la position par la méthode analytique pour chaque simulation. Les résultats obtenus sont affichés dans les figures 4.7(a) et 4.7(b). Il est clair à partir de ces résultats, que la méthode analytique est fortement perturbée par la géométrie du réseau qui ramène une ambiguïté entre deux solutions possibles. En revanche, les lieux circulaires sont toujours porteurs d'informations (partiellement) pertinentes sur la position de la source. En guise de comparaison, les résultats obtenus avec *ASAP* sont listés dans la table de la figure 4.7(c). Ces derniers montrent bien le gain obtenu avec une approche géométrique.

4.5.2 Etude de l'erreur dans la zone de localisation

Étant donné que l'erreur de localisation dépend de la position de la source, nous avons étudié cette erreur dans toute la zone de localisation (ZL) avec la géométrie circulaire $\mathbf{r}_2$ de (équation (4.21)). Nous avons donc échantillonné cette zone avec un pas radial de $3m$ et un pas azimutal de 3°. La zone ZL ayant un rayon de $101.25m$, nous obtenons 3391 échantillons. Pour chacune de ces positions, sur 100 réalisations, nous avons évalué l'erreur de localisation dite *erreur spatiale*. L'erreur est dite radiale lorsqu'elle est évaluée en fonction de la distance de la source (ρ) et ce dans toutes les directions (θ). Les résultats obtenus pour différentes valeurs du SNR sont présentés dans la figure 4.8. Globalement, l'erreur croît avec le SNR et la distance de la source par rapport à l'ancre. Globalement, dans une région de l'ordre $40 - 50m$ autour de l'ancre, l'erreur est bonne. Au delà de cette distance, des erreurs plus élevées commencent à apparaître. Ces résultats laissent penser qu'il vaudrait mieux avoir une ancre mobile qui pourra visiter le réseau et affiner la localisation avec le temps.



(a) Lieux circulaires pour $\mathrm{SNR}_{high} = 20$ dB

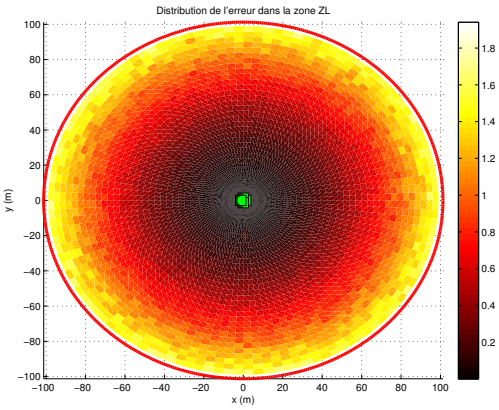


(b) Lieux circulaires pour $\mathrm{SNR}_{good} = 5$ dB

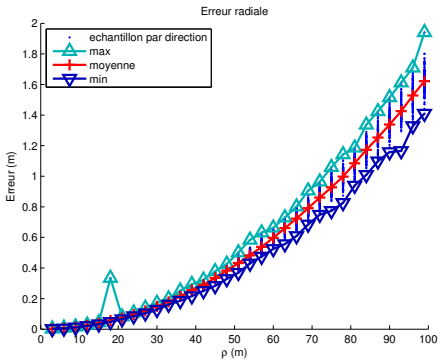
SNR (dB)	Méthode analytique	*ASAP*
20	8.751 m	0.070 m
5	64.338 m	0.410 m

(c) Erreur quadratique moyenne (RMSE)

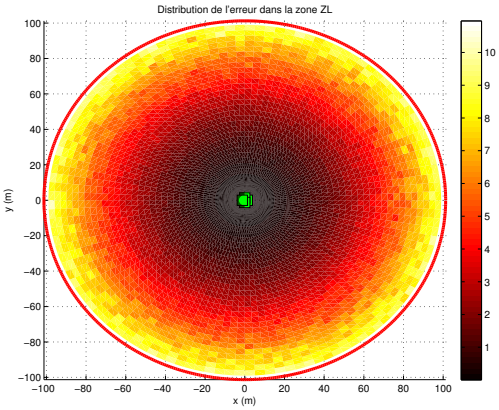
FIGURE 4.7 – Lieux de positionnement avec le réseau $\mathbf{r}_1$ (presque-circulaire) à ouverture $D = 2.5$m et $L = L_{max} = 8128$ échantillons.



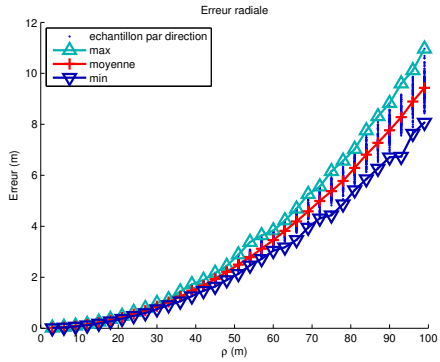
(a) Performance spatiale, $\mathrm{SNR}_{high} = 20$ dB



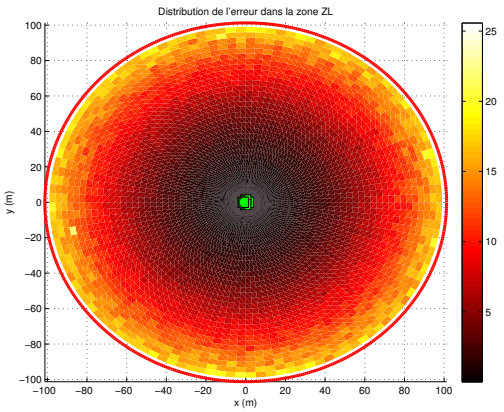
(b) Performance radiale, $\mathrm{SNR}_{high} = 20$ dB



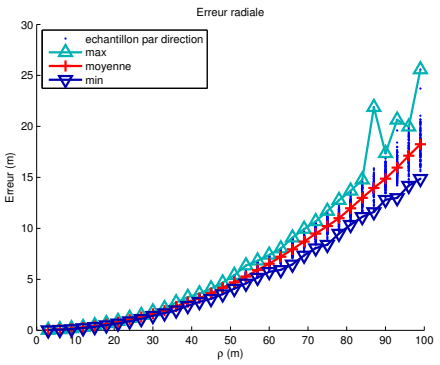
(c) Performance spatiale, $\mathrm{SNR}_{good} = 5$ dB



(d) Performance radiale, $\mathrm{SNR}_{good} = 5$ dB



(e) Performance spatiale, $\mathrm{SNR}_{low} = 0$ dB



(f) Performance radiale, $\mathrm{SNR}_{low} = 0$ dB

FIGURE 4.8 – Erreur quadratique moyenne (RMSE) avec *ASAP* dans toute la zone de localisation.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé deux contributions sur la localisation avec les réseaux d'antennes à large ouverture :

1. Preuve de l'ambiguïté de la localisation pour les réseaux d'antennes circulaires (et linéaires), i.e l'existence de deux solutions inverses par rapport au cercle du réseau [5].
2. Technique de localisation passive et mono-ancre, avec une approche géométrique qui exploite la relation d'inversion entre les solutions dans le cas des réseaux circulaires [3, 6].

L'ancre ainsi construite est capable, grâce à l'algorithme *ASAP*, de s'immiscer dans n'importe quel réseau sans fils, et localiser un nœud qui émet dans sa zone de localisation.

Les résultats de simulation montrent une amélioration notable par rapport à la méthode de localisation dite *analytique*. L'erreur de localisation croît avec la distance par rapport à l'ancre ainsi qu'avec le rapport signal sur bruit (SNR). Enfin, l'approche est très efficace pour un SNR relativement élevé et admet une meilleure précision lorsque la source émet à proximité de l'ancre.

Néanmoins, la phase d'association de la méthode repose sur la connaissance du coefficient d'atténuation du canal (le paramètre a, en anglais *Path Loss Exponent* ou *PLE*). Afin d'y pallier, une méthode d'estimation de ce paramètre, par le réseau d'antennes lui-même, est développée dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 5

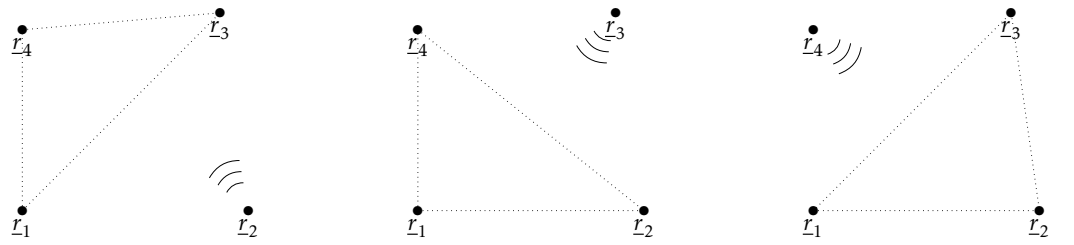
AUTO-CALIBRATION DANS UN RÉSEAU D'ANTENNES À LARGE OUVERTURE

La phase d'association de l'algorithme ASAP, présentée dans le chapitre précédent, nécessite la connaissance du coefficient d'atténuation du canal (en anglais Path Loss Exponent ou PLE). Dans ce chapitre, nous présentons une méthode nouvelle permettant d'estimer ce paramètre d'une manière automatique par le réseau d'antennes lui-même. La particularité de l'approche est d'utiliser le même formalisme dans la phase d'association, et elle ne requiert que la connaissance des distances entre les éléments du réseau d'antennes. L'estimation peut être conduite hors ligne, dans une phase de calibration du système, mais aussi en ligne à tout instant vu qu'elle est complètement pilotée par le réseau d'antennes lui-même.
A notre connaissance, il s'agit de la première solution de ce problème par rapport à la littérature dans ce domaine. Les résultats de simulation montrent une bonne qualité de l'estimation du PLE, ainsi qu'un très faible impact sur l'algorithme de localisation (LAA) utilisant l'estimation de ce paramètre dans sa phase d'association.

5.1 L'approche retenue

L'estimation du coefficient d'atténuation du canal est un problème essentiel dans la localisation à base de RSSI [14, 73, 74, 15, 9, 89] qui se résume en général à effectuer une série de mesures de RSSI et d'en tirer le modèle de propagation dans l'environnement. Bien qu'on pourrait, en théorie, chercher à appliquer ce genre de méthodes de la littérature, nous préférons une approche alternative qui soit plus adaptée à la localisation LAA et qui utilise le formalisme du problème de localisation à base de réseau d'antennes à large ouverture. En ce sens, notre approche est nouvelle et plus simple à implémenter en marge de l'algorithme de localisation *LAA* ou *ASAP*.

L'idée directrice de l'approche est de fixer le point de référence du réseau à l'antenne 1, et de faire émettre à la chaîne le reste des éléments du réseau. Alors qu'un des éléments est en mode transmission – on parle alors d'antenne *pilote*– le reste des éléments du réseau d'antenne est en réception formant ainsi un sous-réseau. Si l'on connaît les distances entre l'antenne pilote et le reste des antennes du réseau, on peut inverser la phase d'association décrite dans la section 4.2.2 (équation (4.15)) pour retrouver le PLE. Le procédé est illustré dans la figure 5.1 et sera formulé puis décrit dans les sections suivantes.



(a) Antenne 2 comme pilote (b) Antenne 3 comme pilote (c) Antenne 4 comme pilote

FIGURE 5.1 – Séquence de transmission $(a) \Rightarrow (b) \Rightarrow (c)$ pour l'estimation automatique du PLE par le réseau d'antennes

5.2 Formulation du problème

Le problème peut être formulé de la même manière que dans la section 4.2.1 du chapitre 4, nous rappelons l'essentiel de la formulation ici. On considère donc un réseau d'antennes calibré avec une géométrie $\mathbf{r} \in \mathcal{R}^{3\times N}$ et une ouverture D, en présence d'une source émettant à la position $\underline{r}_m \in \mathcal{R}^{3\times 1}$. La source émet un signal à la fréquence de porteuse F_c véhiculant un message $m(t)$ dans la zone de

Fresnel du réseau :

$$\rho < \frac{2D^2 F_c}{c}. \tag{5.1}$$

Sous l'hypothèse de bande étroite, le signal en bande de base $\underline{x}_i(t) \in \mathcal{C}^{N\times 1}$ reçu par le réseau d'antennes lorsque le point de référence du réseau est à l'antenne $\underline{r}_i$ s'écrit :

$$\underline{x}_i(t) = \underline{q} \odot \underline{S}_i m(t) + \underline{n}(t). \tag{5.2}$$

La valeur propre du signal (cf. équation (4.11)) est de la forme

$$\lambda_i = \|\underline{q} \odot \underline{S_i}\|^2 = P_m \rho_i^{2a} \underline{1}_N^T \left(\underline{q} \odot \underline{q}^* \odot \underline{\rho}^{-2a}\right). \tag{5.3}$$

Arbitrairement, et sans perte de généralité, prenons la première antenne $\underline{r}_1$ comme point de référence *primaire*. En changeant le point de référence vers la $i^{ème}$ antenne, et en répétant le processus pour toutes les $N-1$ antennes, on peut construire le vecteur de métriques $\underline{\mathcal{K}}$ qui relie les valeurs propres du signal aux distances antennes-source comme suit :

$$\underline{\mathcal{K}} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \\ \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \\ \vdots \\ \frac{\lambda_N}{\lambda_1} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2a}} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ \frac{\rho_3}{\rho_1} \\ \vdots \\ \frac{\rho_N}{\rho_1} \end{bmatrix}. \tag{5.4}$$

5.3 Estimation du coefficient d'atténuation (*PLE*)

Le procédé d'estimation retenu utilise les antennes du réseaux comme des sources *pilotes*. Nous distinguons donc deux cas de figure pour l'estimation du PLE : avec une seule source pilote et automatique. Dans les deux cas, nous conservons l'hypothèse de bande étroite, mais ce n'est pas une obligation. En effet, le vecteur de métrique peut aussi être construit sous l'hypothèse de large bande, à une modification près de la construction du vecteur propre du signal [72].

5.3.1 Estimation avec une source pilote

Prenons le cas d'une seule source pilote, dont on connaît sa distance par rapport aux antennes du réseau (figure 5.2) :

$$\underline{\rho} = [\rho_1, \rho_2, \ldots, \rho_N]^T \in \mathcal{R}^{N\times 1}. \tag{5.5}$$

En déroulant la phase d'association de l'algorithme *LAA*, on peut construire un vecteur de valeurs propres comme suit

$$\underline{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_N]^T \in \mathcal{R}^{N\times 1}. \tag{5.6}$$

En accord avec l'équation (5.4), les métriques suivantes peut être obtenues :

$$\underline{\mathcal{K}} = (\underline{\lambda} \oslash (\underline{1}_N \cdot \lambda_1))^{\frac{1}{2a}} = \underline{\rho} \oslash (\underline{1}_N \cdot \rho_1). \tag{5.7}$$

Et comme on connaît le vecteur de distances $\underline{\rho}$, le coefficient d'atténuation (PLE) peut être estimé comme suit :

$$a = \frac{1}{2} \cdot \frac{\|\log(\underline{\lambda} \oslash (\underline{1}_N \cdot \lambda_1))\|}{\|\log(\underline{\rho} \oslash (\underline{1}_N \cdot \rho_1))\|}. \tag{5.8}$$

Cette équation est la clé pour l'estimation automatique du PLE par le réseau d'antennes lui-même en choisissant ces éléments comme source pilote.

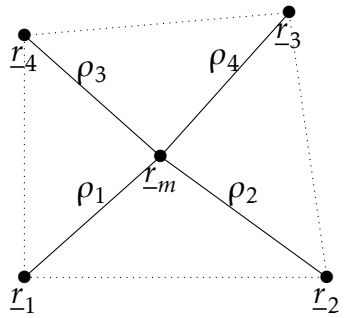


FIGURE 5.2 – Estimation du PLE avec une source pilote.

5.3.2 Estimation automatique

Maintenant, prenons un réseau d'antennes de N éléments avec comme point de référence primaire l'antenne $\underline{r}_1$, où l'on suppose connue la distance inter-antennes. En faisant transmettre les $N-1$ éléments à la chaîne, pour chaque transmission i nous avons un cas d'un sous-réseau de $N-1$ antennes en présence d'une source pilote l'antenne r_j. Par conséquent, on peut construire la matrice

de valeurs propres $\mathbf{\Lambda} \in \mathcal{R}^{(N-1)\times(N-1)}$ comme suit :

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \underline{\lambda}_2 & \underline{\lambda}_3 & \cdots & \underline{\lambda}_N \end{array} \\ \left[\begin{array}{c|c|c|c} \lambda_{12} & \lambda_{13} & \cdots & \lambda_{1N} \\ \lambda_{32} & \lambda_{23} & & \lambda_{2N} \\ \lambda_{42} & \lambda_{43} & & \lambda_{3N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \lambda_{N2} & \lambda_{N3} & \cdots & \lambda_{(N-1)N} \end{array}\right] \end{array}, \tag{5.9}$$

où $\underline{\lambda}_j \in \mathcal{R}^{(N-1)\times 1}$ est le vecteur de valeurs propres λ_{ij} obtenues lorsque la source pilote est l'antenne $\underline{r}_j$, et le point de référence du réseau est placé à l'antenne $\underline{r}_i$ $(i = 1 \ldots N, i \neq j)$. On peut maintenant introduire la matrice des métriques $\mathbb{K} \in \mathcal{R}^{(N-1)\times(N-1)}$ sous la forme :

$$\mathbb{K} = \left(\mathbf{\Lambda} \oslash \left(\underline{1}_{N-1} \cdot \left(\underline{\delta}_1^T \cdot \mathbf{\Lambda}\right)\right)\right)^{\frac{1}{2a}}, \tag{5.10}$$

où $\underline{\delta}_i \in \mathcal{R}^{(N-1)\times 1}$ dénote un vecteur nul ayant son $i^{ème}$ élément à 1. En prenant l'antenne r_1 comme point de référence primaire, en accord avec l'équation (5.7) la matrice $\mathbb{K}$ correspond à

$$\mathbb{K} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \underline{\mathcal{K}}_2 & \underline{\mathcal{K}}_3 & \underline{\mathcal{K}}_4 & \cdots & \underline{\mathcal{K}}_N \end{array} \\ \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \frac{\rho_{23}}{\rho_{21}} & \frac{\rho_{32}}{\rho_{31}} & \frac{\rho_{42}}{\rho_{41}} & \cdots & \frac{\rho_{N2}}{\rho_{N1}} \\ \frac{\rho_{24}}{\rho_{21}} & \frac{\rho_{34}}{\rho_{31}} & \frac{\rho_{43}}{\rho_{41}} & & \frac{\rho_{N3}}{\rho_{N1}} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \frac{\rho_{2N}}{\rho_{21}} & \frac{\rho_{3N}}{\rho_{31}} & \frac{\rho_{4N}}{\rho_{41}} & \cdots & \frac{\rho_{N(N-1)}}{\rho_{N1}} \end{array}\right] \end{array}, \tag{5.11}$$

où $\rho_{ij} = \|\underline{r}_j - \underline{r}_i\|$. Nous introduisons maintenant la matrice de distances $\boldsymbol{\rho} \in \mathcal{R}^{(N-1)\times(N-1)}$ définie par

$$\boldsymbol{\rho} = \left[\underline{\rho}_2, \underline{\rho}_3, \ldots, \underline{\rho}_N\right], \tag{5.12}$$

avec $\underline{\rho}_i \in \mathcal{R}^{(N-1)\times 1}$ défini pour $i = 2 \ldots N$ comme suit

$$\underline{\rho}_i = \left[\rho_{i1}, \rho_{i2}, \ldots, \rho_{i(i-1)}, \rho_{i(i+1)}, \ldots, \rho_{iN}\right]^T. \tag{5.13}$$

Sous cette notation, le vecteur $\underline{\rho}_i$ correspond alors à la distance entre l'antenne pilote $\underline{r}_i$ et le reste des antennes (le sous-réseau d'antennes). L'équation (5.11)

devient donc

$$\mathbb{K} = \boldsymbol{\rho} \oslash \left(\underline{1}_{N-1} \cdot \left(\underline{\delta}_1^T \cdot \boldsymbol{\rho} \right) \right) \tag{5.14}$$

Enfin, le coefficient d'atténuation a peut être estimé avec la formule suivante :

$$a = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left\| \log \left(\boldsymbol{\Lambda} \oslash \left(\underline{1}_{N-1} \cdot \left(\underline{\delta}_1^T \cdot \boldsymbol{\Lambda} \right) \right) \right) \right\|}{\left\| \log \left(\boldsymbol{\rho} \oslash \left(\underline{1}_{N-1} \cdot \left(\underline{\delta}_1^T \cdot \boldsymbol{\rho} \right) \right) \right) \right\|}, \tag{5.15}$$

où $\| \cdot \|$ est une norme matricielle, qu'on peut prendre ici comme la valeur singulière maximale de la matrice.

Enfin, le processus d'estimation automatique du coefficient d'atténuation est résumé par l'algorithme (5.1).

Algorithme 5.1 L'algorithme d'estimation du coefficient d'atténuation a

ÉTAPE-1 : Prendre l'antenne $\underline{r}_1$ comme point de référence primaire, et faire transmettre à la chaîne les $N-1$ éléments restants.

ÉTAPE-2 : Pour chaque cycle de transmission (pilote et sous-réseau) changer le point de référence du réseau de l'antenne $\underline{r}_1$ vers les autres éléments du sous-réseau à tour de rôle.

ÉTAPE-3 : Extraire les valeurs propres du signal pour construire la matrice des valeurs propres $\boldsymbol{\Lambda}$ de l'équation (5.9).

ÉTAPE-4 : Construire la matrice des distances à partir des distances inter-antennes $\boldsymbol{\rho}$ en utilisant l'équation (5.12).

ÉTAPE-5 : Estimer le coefficient de propagation a en utilisant l'équation (5.15).

Il est important de noter que l'algorithme (5.1) peut être répété à plusieurs reprises afin de moyenner et donc affiner l'estimation. D'une manière analogue, on peut aussi répéter le processus d'estimation en changeant le point de référence primaire $\underline{r}_1$ vers chacune des autres antennes à tour de rôle.

5.4 Résultats des simulations numériques

Dans cette section, nous évaluons la performance de l'algorithme d'estimation du PLE en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) et le nombre d'échantillons du signal reçu. Nous évaluons également la sensibilité de l'algorithme de localisation LAA aux erreurs d'estimation du PLE, et en particulier celle de notre approche. Par consistance avec la configuration de référence pour l'évaluation de l'algorithme LAA [72], nous prenons un réseau d'antennes planaires avec $N = 4$ éléments placés comme suit

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 50 & -40 & 5.05 & 9.45 \\ 0 & 0 & 30 & -20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{5.16}$$

On suppose également que le canal radio admet un affaiblissement, modélisé par le vecteur aléatoire complexe $\underline{q} \in \mathcal{C}^{N\times 1}$, ayant comme module une loi log-normale de moyenne 0 dB et écart-type 8 dB ainsi qu'une phase avec une loi uniforme sur l'intervalle $0 - 2\pi$ radians. Quant au message $m(t)$ transmis par la source, il est modélisé par une distribution normale complexe de moyenne 0 et de puissance unité.

5.4.1 Performance de l'estimation du PLE

En pratique, l'observation du signal se limite à un nombre d'échantillons fini L, et la matrice de covariance du signal se trouve donc approximée. De ce fait, l'estimation des valeurs propres du signal sera aussi bruitée et donc par définition celle de la matrice $\mathbf{\Lambda}$. Cette dernière est également affectée par le bruit du canal (SNR). Pour ces raisons, nous avons examiné l'erreur quadratique moyenne de l'estimation du PLE sur 200 tirages indépendants avec un produit $SNR \times L$ croissant. La valeur exacte du PLE a été fixée à $a = 3$.

Les résultats de la figure 5.3 montrent que la qualité de l'estimation est très bonne et elle croît avec le SNR et le nombre d'échantillons L. Une autre "vue" des résultats est fournie par la figure 5.4, il s'agit de la distribution de l'estimation du PLE pour des valeurs différentes du couple (SNR, L). Les résultats montrent qu'avec un SNR bas, les estimations deviennent plus dispersées autour de la moyenne et vice versa. En revanche, le nombre d'échantillons L a très peu d'influence sur la dispersion de l'estimation, mais plutôt un effet sur sa valeur moyenne. Ces résultats nous suggèrent qu'il serait plus judicieux de moyenner plusieurs estimations lorsque le SNR est bas, tandis qu'il serait possible d'estimer le PLE avec une seule itération à partir d'un long message (L élevé) lorsque le SNR est élevé.

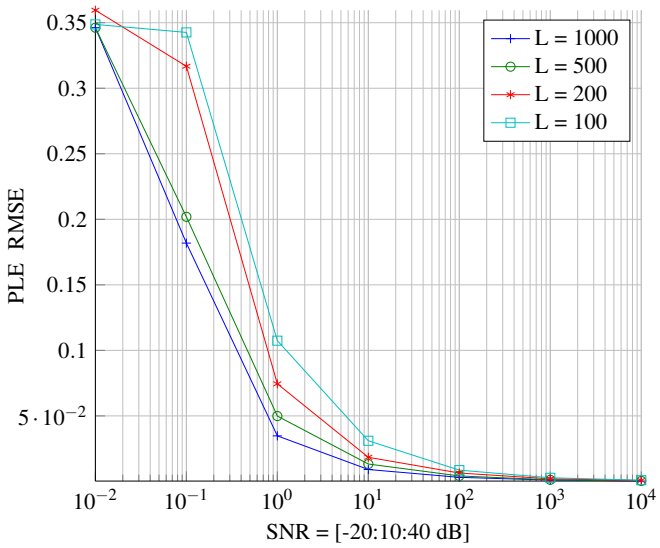


FIGURE 5.3 – Performance de l'estimation du PLE en fonction du SNR et le nombre d'échantillons L – sur 200 triages avec $PLE = 2$.

5.4.2 Sensibilité de la localisation LAA

Étant donné que l'application visée par notre approche d'estimation du coefficient PLE est l'algorithme de localisation LAA avec la méthode *analytique* (cf. synthèse du chapitre précédent, section 4.2.5), il nous a paru essentiel d'étudier la sensibilité de ce dernier aux erreurs d'estimation du PLE. Pour ce faire, nous avons fixé la valeur du PLE à $a = 3$ et examiné l'erreur de localisation en fonction de l'erreur d'estimation du PLE en fonction du SNR et du nombre d'échantillons L, tout en moyennant sur 200 tirages.

Les résultats de la figure 5.5 montrent que l'algorithme de localisation LAA de référence est sensible aux erreurs sur le coefficient de propagation PLE. Clairement, les erreurs sur ce paramètre viennent biaiser la position estimée. La figure 5.6 illustre cet écart par rapport au cas nominal ($a_{err} = 0$) en fonction du SNR et pour $L = 500$ échantillons. Elle montre surtout que lorsqu'on utilise notre approche d'estimation du PLE dans une phase préalable au processus de localisation, la performance est pratiquement la même qu'avec le cas nominal.

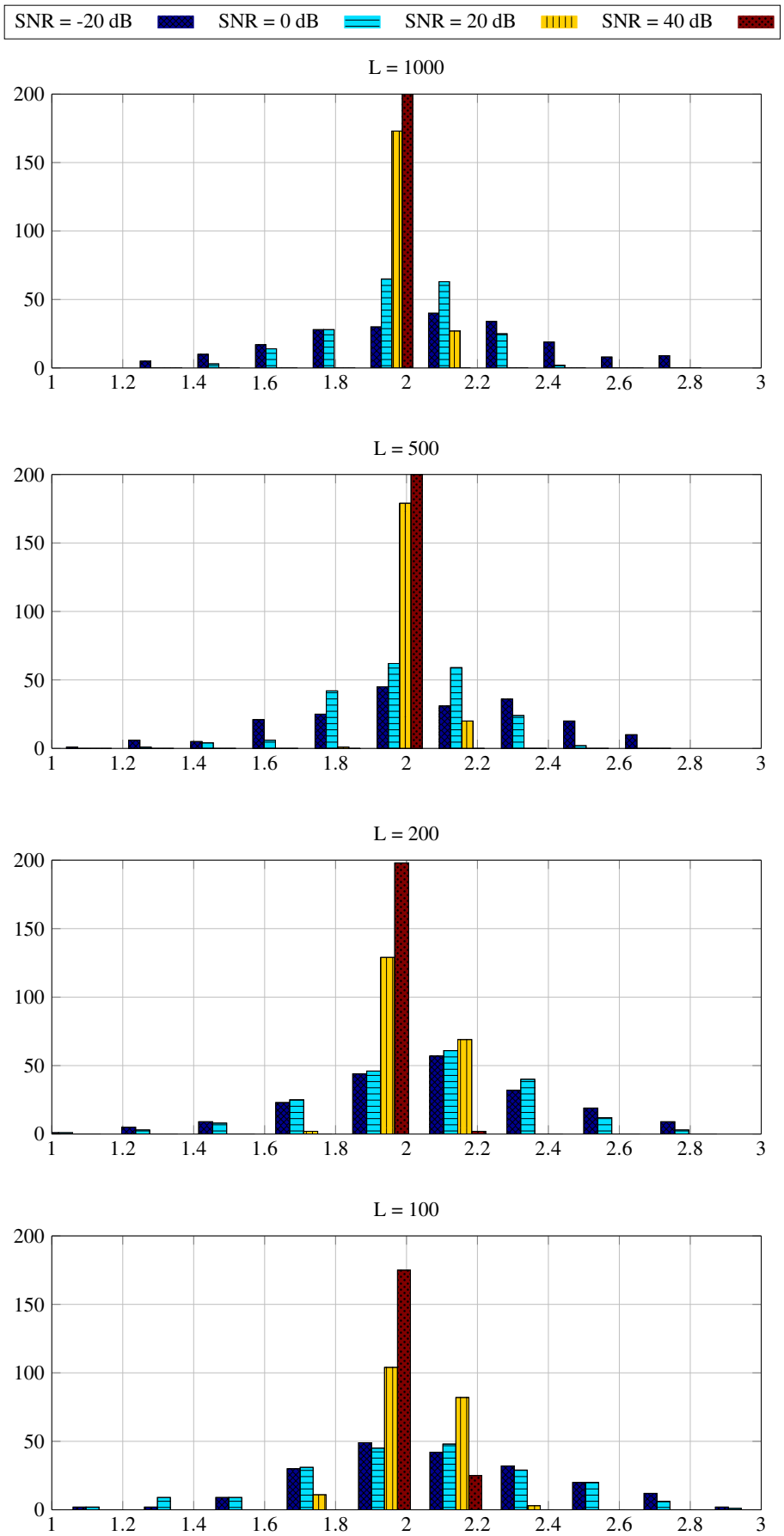


FIGURE 5.4 – Distribution de l'estimation du PLE sur 200 simulations ($PLE = 2$).

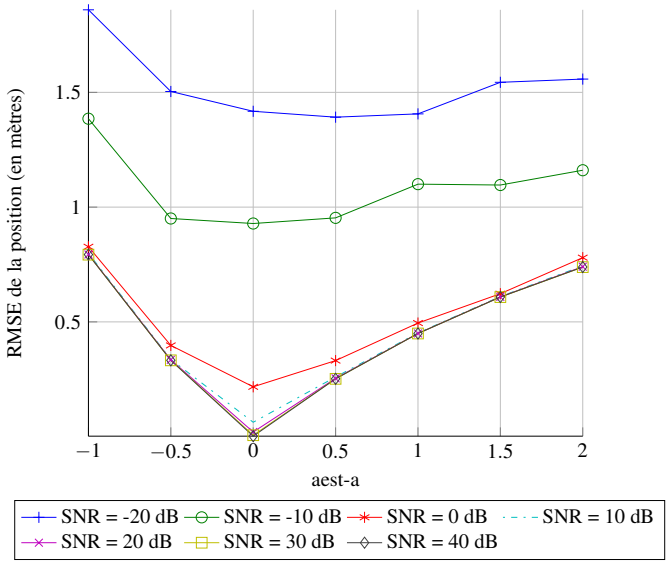


FIGURE 5.5 – Sensibilité de la localisation LAA – sur 200 tirages ($PLE = 3, L = 500$ échantillons).

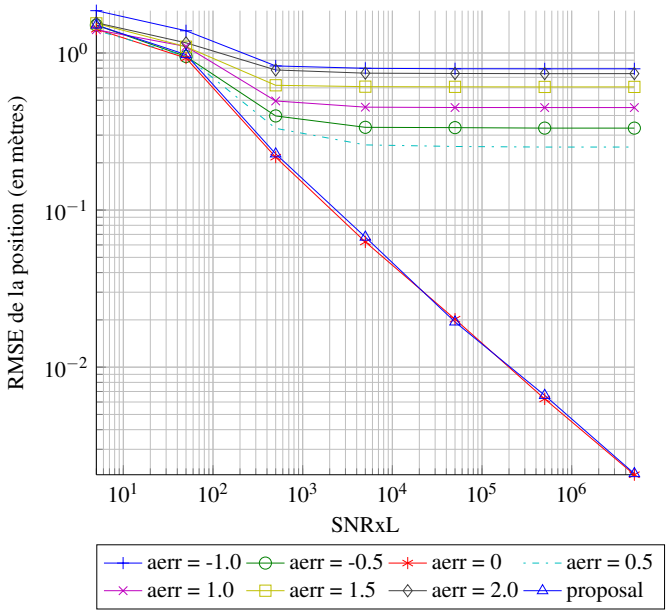


FIGURE 5.6 – Sensibilité de la localisation LAA et approche – sur 200 tirages ($PLE = 3, L = 500$ échantillons).

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode nouvelle pour l'estimation du coefficient de propagation dans l'environnement du réseau d'antennes [1]. Cette estimation est nécessaire dans la phase d'association de l'algorithme de localisation *LAA*. L'estimation pouvant se faire à partir d'une *source pilote* dont on connaît la position ou d'une manière *automatique* par le réseau d'antennes lui-même. Elle peut également être faite hors-ligne, dans une phase de calibration par exemple ; comme elle peut être effectuée en ligne à tout instant par le réseau d'antennes lui-même. La méthode nécessite la connaissance des distances entre les éléments du réseau d'antennes. A notre connaissance, il s'agit de la première solution de ce problème par rapport à la littérature dans ce domaine.

Les résultats de simulations numériques ont montré la pertinence de l'approche en terme de qualité d'estimation, ainsi que son adéquation avec l'algorithme de localisation visé, en terme de formalisme et très faible impact sur les performances de la localisation.

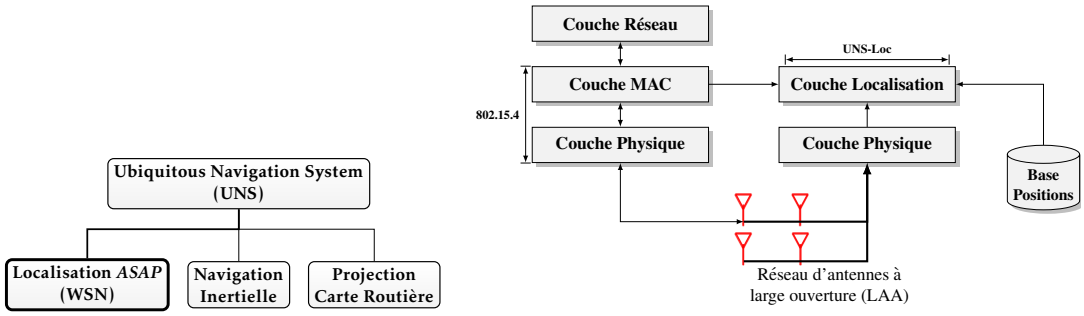
Avec ce chapitre, nous avons proposé une solution à la connaissance du coefficient de propagation, qui était une condition requise pour la phase d'association de l'algorithme *ASAP* présenté dans le chapitre précédent. Dans le chapitre suivant, nous revenons à notre problématique de départ, et nous proposons d'équiper le véhicule intelligent avec un réseau d'antennes à large ouverture. Grâce à l'algorithme *ASAP*, le système *UNS* sera capable d'auto-localiser le véhicule avec une seule source (luminaire) au lieu de deux comme ce fut le cas avec la radiogoniométrie du chapitre 3.

CHAPITRE 6

UNE RADIOLOCALISATION MONO-SOURCE DANS LES VILLES INTELLIGENTES

Avec ASAP, il est possible d'estimer la position d'une source par rapport au référentiel du réseau d'antennes du système. Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle version du système UNS qui nécessite d'en équiper le véhicule. Ceci lui confère la faculté de se localiser d'une manière passive à partir d'une seule source. Lorsque deux sources sont détectées, dans un intervalle de temps suffisamment court, il est aussi possible d'estimer l'orientation du véhicule, on parle alors d'estimation opportuniste. Enfin, nous évaluons l'approche par simulation dans le contexte visé, en utilisant le même scénario que dans l'analyse de la radiogoniométrie du chapitre premier. En comparaison avec la première version d'UNS, les résultats obtenus montrent qu'on peut exploiter tout paquet reçu pour localiser le véhicule, ce qui améliore le taux de positionnement. En ce qui concerne l'erreur de localisation, les résultats montrent que les performances se dégradent avec l'augmentation de la distance véhicule-source et la baisse du rapport signal sur bruit (SNR).

6.1 Le système *UNS* amélioré



(a) Sous-blocs (b) Architecture logicielle

FIGURE 6.1 – Instanciation du système UNS avec le système de localisation *ASAP*

En se basant sur le scénario des luminaires intelligents discuté dans le chapitre 2, nous instancions une nouvelle fois notre approche (section 2.3), mais cette fois avec avec un bloc de localisation utilisant l'algorithme de localisation *ASAP* développé dans le chapitre 4. L'architecture logicielle est identique, mais au niveau matériel nous utilisons un réseau d'antennes à large ouverture (type *LAA*). Grâce à ce type de réseau d'antennes, dès qu'un paquet est reçu la position de l'émetteur peut être estimée par rapport au référentiel du réseau *LAA* du véhicule. En sortie du bloc de navigation inertielle, nous utilisons l'estimation de l'orientation du véhicule. Enfin, le bloc de projection sur la carte routière (Map Matching) a pour fonction de raffiner la position par rapport à la connaissance du plan.

Nous faisons l'hypothèse que l'orientation du véhicule est connue localement grâce à un système à base d'une centrale inertielle ou par odométrie. Cette hypothèse est importante pour localiser le véhicule à partir d'un seul luminaire voisin. Néanmoins, lorsqu'un deuxième voisin est détecté et localisé, nous pouvons également estimer l'orientation du véhicule ainsi que sa position. Cette estimation, de nature opportuniste, peut venir raffiner l'estimation de l'orientation du véhicule faite à partir de la centrale inertielle.

Comparée à la version initiale du système *UNS*, cette instance améliore considérablement le processus de localisation. Cette simplification est due au fait qu'il faut au moins un luminaire voisin (ancre) pour localiser le véhicule au lieu de deux comme c'est le cas dans la première version. En revanche, cette version est plus délicate à mettre en œuvre du fait de la taille du réseau d'antennes qui est de quelques mètres.

6.2 Localisation du véhicule avec l'algorithme *ASAP*

Dans cette section, nous formulons le problème de localisation du véhicule à base de l'algorithme *ASAP*. Précisons d'abord quelques concepts et notations qui seront importants pour la suite.

Comme pour le cas de la radiogoniométrie du chapitre 3, nous distinguons deux référentiels [1] : le référentiel externe au véhicule (X_e, Y_e) centré en O et le référentiel du véhicule (X_b, Y_b) centré en M. Sous cette notation, la position d'un nœud (ou ancre) A est notée par :

— $\underline{r}_A^e = [x_A^e, y_A^e]^T$: position de l'ancre A dans le référentiel externe

— $\underline{r}_A^b = [x_A^b, y_A^b]^T$: position de l'ancre A dans le référentiel du véhicule.

Par conséquent, le problème que l'on cherche à résoudre est donc d'estimer la position du véhicule dans le référentiel externe $\underline{r}_m^e$.

En notant θ la direction du véhicule, nous pouvons définir la matrice de rotation dans le plan autour de l'axe des (Oz) comme

$$\mathbf{R}_b^e(\theta) \overset{3D}{\triangleq} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \overset{2D}{\triangleq} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \tag{6.1}$$

La matrice $\mathbf{R}_b^e$ peut être lue comme la matrice de passage du référentiel (X_b, Y_b) au référentiel (X_e, Y_e). Sous cette notation, nous avons donc les relations géométriques suivantes [35, §2.4] :

G.1 $\mathbf{R}_b^e(\theta) = \mathbf{R}_e^b(-\theta) = \left(\mathbf{R}_e^b(\theta)\right)^T$.

G.2 $\mathbf{R}_b^e(\theta) \cdot \mathbf{R}_e^b(\theta) = \mathbb{I}_3$ (ou $\mathbb{I}_2$ en 2D) : composition de rotations de même angle mais à signe opposé [2].

G.3 $\underline{r}_A^b = \underline{r}_A^e - \underline{r}_m^e$: relation de Chasles (somme vectorielle).

G.4 $\underline{r}_A^e = \mathbf{R}_b^e(\theta) \cdot \underline{r}_A^b$: transformation d'un point ou changement de repère de (X_b, Y_b) vers (X_e, Y_e)

G.5 $\underline{r}_A^b = \left(\mathbf{R}_b^e(\theta)\right)^T \cdot \underline{r}_A^e$: transformation d'un point ou changement de repère de (X_e, Y_e) vers (X_b, Y_b)

Ces relations géométriques sont très importantes pour la suite afin de permettre l'estimation de la position du véhicule à partir d'une seule ancre lorsque son orientation est connue, mais aussi l'estimation de son orientation à partir de deux ancres lorsqu'une deuxième ancre est observable.

1. *External reference frame* et *body reference frame* en anglais
2. La matrice $\mathbf{R}$ est orthogonale i.e $\mathbf{R}^T\mathbf{R} = \mathbb{I}$

6.2.1 Estimation de la position du véhicule

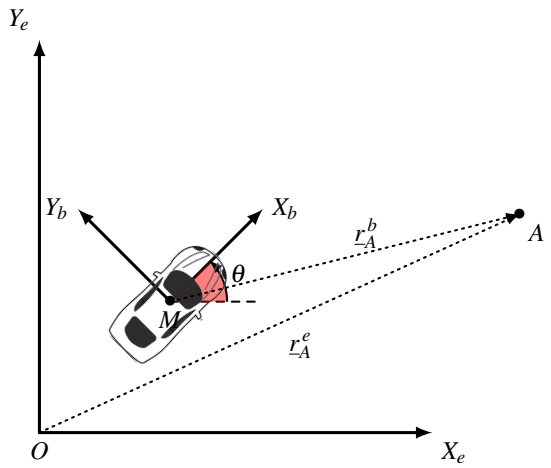


FIGURE 6.2 – Localisation du véhicule avec une seule ancre – orientation connue

Lorsque le système détecte un voisin A, il peut retrouver sa position dans le référentiel global $\underline{r}_A^e$ à partir de la base de donnée locale (méta-données du plan). Grâce à l'algorithme *ASAP*, il est aussi capable de le positionner par rapport au référentiel du véhicule en estimant la position $\underline{r}_A^b$. Or, à partir d'un changement de base entre les deux repères (figure 6.2), on peut retrouver la position du véhicule (propriétés **G.3** et **G.5**) :

$$\underline{r}_m^e = \underline{r}_A^e - \left(\mathbf{R}_b^e(\theta)\right)^T \cdot \underline{r}_A^b, \tag{6.2}$$

où θ est l'orientation du véhicule, supposée disponible grâce à la centrale inertielle ou l'odométrie. Par conséquent, lorsque l'orientation du véhicule est connue, l'algorithme *ASAP* nous permet de localiser le véhicule avec un seul luminaire au lieu de deux, comme c'est le cas avec la radiogoniométrie développée dans le chapitre 3. Cette simplification du problème de localisation du véhicule est très importante, car elle permet réellement d'estimer la position du véhicule d'une manière passive et opportuniste dès qu'un paquet est détecté dans le voisinage du véhicule, et plus précisément dans la zone de Fresnel du réseau d'antennes.

6.2.2 Estimation de l'orientation du véhicule

Dans cette section nous montrons que lorsque deux voisins sont détectés, il est aussi possible d'estimer l'orientation du véhicule. Cette estimation peut être *fusionnée* avec celle du bloc navigation inertielle, ou utilisée directement pour localiser le véhicule comme dans la section précédente.

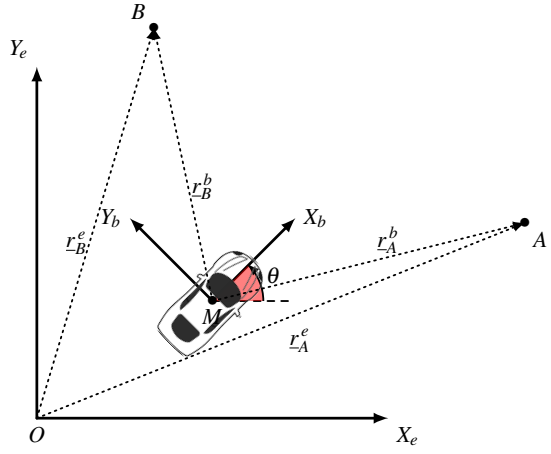


FIGURE 6.3 – Localisation du véhicule avec deux ancres – orientation estimée

Supposons que le système détecte deux voisins A et B, à des positions respectives $\underline{r}_A^e$ et $\underline{r}_B^e$ dans le référentiel externe (figure 6.3). Grâce à l'algorithme *ASAP*, il est aussi capable de les localiser par rapport au référentiel du véhicule en estimant les positions $\underline{r}_A^b$ et $\underline{r}_B^b$.

Or, par définition de la matrice de rotation $\mathbf{R}_b^e$, nous avons :

$$\begin{cases} \underline{r}_A^e = \mathbf{R}_b^e(\theta)\,\underline{r}_A^b \\ \underline{r}_B^e = \mathbf{R}_b^e(\theta)\,\underline{r}_B^b \end{cases} \tag{6.3}$$

En différenciant les deux équations, nous obtenons

$$\begin{cases} x_B^e - x_A^e = \cos(\theta)\left(x_B^b - x_A^b\right) - \sin(\theta)\left(y_B^b - y_A^b\right) \\ y_B^e - y_A^e = \sin(\theta)\left(x_B^b - x_A^b\right) + \cos(\theta)\left(y_B^b - y_A^b\right) \end{cases} \tag{6.4}$$

qu'on peut écrire sous forme matricielle

$$\underbrace{\begin{bmatrix} (x_B^b - x_A^b) & -(y_B^b - y_A^b) \\ (y_B^b - y_A^b) & (x_B^b - x_A^b) \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}}_{\underline{\Theta}} = \underbrace{\begin{bmatrix} (x_B^e - x_A^e) \\ (y_B^e - y_A^e) \end{bmatrix}}_{\underline{b}}. \tag{6.5}$$

Nous pouvons donc calculer le vecteur inconnu $\underline{\Theta}$ à partir des postions connues $(\underline{r}_A^e, \underline{r}_B^e)$ dans le référentiel externe (vecteur $\underline{b}$) et celles estimées dans le référentiel du véhicule $(\underline{r}_A^b, \underline{r}_B^b)$ dans la matrice $\mathbf{H}$ avec la formule

$$\underline{\Theta} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \underline{b}, \tag{6.6}$$

et enfin estimer l'orientation du véhicule avec [3]

$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \frac{\Theta(2)}{\Theta(1)}. \tag{6.7}$$

Il est important de remarquer qu'une condition nécessaire et suffisante pour l'inversion de la matrice $\mathbf{H}$ dans l'équation (6.6) est que les points A et B soient distincts :

$$\det(\mathbf{H}) = (x_B^b - x_A^b)^2 + (y_B^b - y_A^b)^2 = \|\overrightarrow{AB}\|^2. \tag{6.8}$$

Une fois l'orientation du véhicule estimée, sa position peut être obtenue en prenant le barycentre des estimations avec chaque voisin

$$\begin{cases} \underline{r}_m^e = \underline{r}_A^e - \left(\mathbf{R}_b^e(\hat{\theta})\right)^T \cdot \underline{r}_A^b \\ \underline{r}_m^e = \underline{r}_B^e - \left(\mathbf{R}_b^e(\hat{\theta})\right)^T \cdot \underline{r}_B^b. \end{cases} \tag{6.9}$$

Il est important de noter, que le procédé ci-dessus se généralise aisément vers le cas N ancres, soit en moyennant sur plusieurs couples d'ancres soit en construisant un système analogue à celui de l'équation (6.5) mais avec $N(N-1)$ équations à deux inconnues ($\cos\theta$ et $\sin\theta$). Dans ce cas, on pourrait utiliser la matrice pseudo-inverse de $\mathbf{H}$ pour estimer le vecteur $\underline{\Theta}$.

6.2.3 Algorithme de localisation

Le procédé de localisation du véhicule est décrit dans l'algorithme (6.1) pour le cas où l'orientation du véhicule est connue, afin de rester dans les mêmes hypothèses que pour la radiogoniométrie du chapitre 3. Clairement, la nécessité d'une seule ancre simplifie largement l'algorithme de localisation du véhicule. Enfin, le cas de la localisation à partir de deux ancres avec estimation de l'orientation du véhicule sera analysé dans la section suivante lors des simulations numériques. L'algorithme correspondant est donné par l'algorithme (6.2).

3. Pour l'implémentation, il faut utiliser la fonction trigonométrique $atan2(\Theta(2), \Theta(1))$ et rajouter 2π au résultat s'il est négatif pour respecter la convention sur l'orientation des angles d'azimut dans le sens anti-horaire (contraire aux aiguilles d'une montre).

Algorithme 6.1 L'algorithme de localisation du véhicule à base du système *ASAP*.

ÉTAPE-1 : *Attente* d'un nouveau paquet.

ÉTAPE-2 : *Localisation* de l'émetteur dans le référentiel du véhicule $\underline{r}_A^b$ avec l'algorithme ASAP – algorithme (4.1).

ÉTAPE-3 : *Identification* de l'émetteur A à partir du paquet (couche MAC).

ÉTAPE-4 : *Récupération* de la position de l'émetteur $\underline{r}_A^e$ à partir d'une base locale (méta-données du plan).

ÉTAPE-5 : *Localisation* du véhicule avec : $\underline{r}_m^e = \underline{r}_A^e - \left(\mathbf{R}_b^e(\theta)\right)^T \cdot \underline{r}_A^b$.

Algorithme 6.2 L'algorithme de localisation du véhicule à base du système *ASAP* – avec orientation estimée.

ÉTAPE-1 : *Attente* d'un nouveau paquet.

ÉTAPE-2 : *Localisation* de l'émetteur dans le référentiel du véhicule $\underline{r}_A^b$ avec l'algorithme ASAP – algorithme (4.1).

ÉTAPE-3 : *Identification* de l'émetteur A à partir du paquet (couche MAC) et horodatage t_1 (couche Physique).

ÉTAPE-4 : *Récupération* de la position de l'émetteur $\underline{r}_A^e$ à partir d'une base locale (méta-données du plan).

ÉTAPE-5 : *Répétition* des étapes **1 à 4** pour un nouveau paquet d'un nœud B pour obtenir les mesures $(\underline{r}_B^b, t_2)$ et l'information $\underline{r}_B^e$.

Algorithme

1: **fonction** LOCALISATION($\underline{r}_A^e, \underline{r}_A^b, t_A, \underline{r}_B^e, \underline{r}_B^b, t_B$)
2: $\quad \hat{\underline{r}}_m := [\cdot]$
3: $\quad$ **si** $|t_A - t_B| < timeout$ **alors**
4: $\quad\quad \widehat{\theta} :=$ ESTIMERORIENTATION($\underline{r}_A^e, \underline{r}_A^b, \underline{r}_B^e, \underline{r}_B^b$) ▹ Avec équation (6.7)
5: $\quad\quad \hat{\underline{r}}_m :=$ ESTIMERPOSITION($\underline{r}_A^e, \underline{r}_A^b, \underline{r}_B^e, \underline{r}_B^b, \widehat{\theta}$) ▹ Avec équation (6.9)
6: $\quad$ **fin si**
7: $\quad$ **retourne** $\hat{\underline{r}}_m$
8: **fin fonction**

6.3 Méthodologie d'évaluation

Par cohérence, nous conservons la même méthodologie d'évaluation que dans la section 3.2 du chapitre 3 concernant :

— la configuration des positions des nœuds fixes et du nœud mobile.

— le modèle de mobilité.

— le modèle réseau.

Afin d'intégrer les briques logicielles en C développées dans le chapitre 3 avec celles de la localisation avec l'algorithme *ASAP* dans le cadre du chapitre 4, nous avons opté pour une co-simulation WSNET/Matlab. Le processus de simulation global est géré depuis un script Matlab qui réalise les opération suivantes :

1. Génération d'un fichier xml de configuration de la simulation WSNET.
2. Lancement d'une (ou plusieurs) simulation(s) WSNET.
3. Tous les événements utiles (comme RX d'un message) sont tracés avec leurs contextes (horodatage, contenu, position du véhicule...etc) côté WSNET.
4. Côté Matlab, chaque événement est décodé puis transmis à un gestionnaire qui s'exécute avec les mêmes informations disponibles sous WSNET. Pour chaque paquet reçu, le gestionnaire simule les signaux reçus sur le réseau d'antennes du véhicule et déroule l'algorithme de localisation adéquat.

Il est important de noter que cette approche a été préférée pour des raisons de réutilisation du code de simulation Matlab (canal, réseau d'antennes, analyse spectrale et calcul matriciel) produits antérieurement. Une approche alternative aurait été d'implémenter directement dans WSNET une couche physique multi-antennes avec simulation des signaux physiques en bande de base. Bien qu'elle eut été plus fidèle à l'architecture visée, elle est largement plus complexe et laborieuse à mettre en œuvre sur le simulateur WSNET.

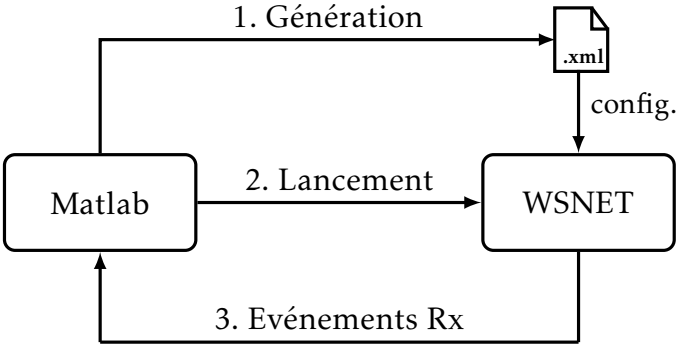


Figure 6.4 – Schéma de co-simulation WSNET/Matlab.

6.4 Résultats des simulations numériques

Comme scénario de simulation, nous reprenons celui du la section 3.3 du chapitre 3 avec le simulateur WSNET configuré de la même manière. A savoir, les modèles de mobilité et de réseau sont conservés avec respectivement les mêmes paramètres spatiaux (positions des ancres et trajectoire), temporels (T_s, v) et réseau (T_{beacon}, R_{max} et couches MAC). Concernant la simulation du réseau d'antennes et l'algorithme *ASAP*, nous fixons la taille des paquets à 127 octets (L_{max} = 8128 échantillons) et nous considérons les mêmes valeurs du SNR que dans la section 4.5, à savoir :

— SNR_{low} = 0 dB : autant de signal que de bruit
— SNR_{good} = 5 dB : bon dans le contexte des WSNs
— SNR_{high} = 20 dB : élevé dans le contexte des WSNs.

Nous adoptons également la même configuration pour le canal et la modulation. A savoir nous supposons que la source transmet avec une porteuse F_c = 2.43GHz (i.e canal 16) de la bande ISM (2.4GHz). Enfin, nous fixons une géométrie de réseau circulaire centrée sur le référentiel du véhicule comme suit :

$$r = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{6.10}$$

Cette géométrie admet respectivement comme ouverture et rayon de la zone de localisation (ZL)

$$D = \sqrt{2}\ \text{m}, \quad rayon(\text{ZL}) = 32.4\ \text{m}. \tag{6.11}$$

Dans cette configuration, nous étudions l'effet du bruit du canal (SNR) sur la qualité de la localisation du véhicule ainsi que l'impact des collisions au niveau MAC sur le taux de positionnement et la précision. A titre d'information, le nombre de voisins détectables le long du parcours du véhicule dans cette configuration est fourni par la figure 6.5. Cette figure montre que le véhicule pourrait détecter au moins un voisin pour se localiser avec connaissance de son orientation, et même estimer son orientation à plusieurs reprises à l'aide de deux voisins. Ces deux cas sont considérés séparément par la suite des observations :

— Orientation connue : supposée idéale, localisation mono-source.
— Orientation estimée : et donc bruitée, localisation bi-sources.

6.4.1 Effet du bruit du canal

La qualité de localisation d'*ASAP* dépend de la distance entre le réseau d'antennes et la source. Globalement, elle se dégrade aussi avec le SNR. Afin

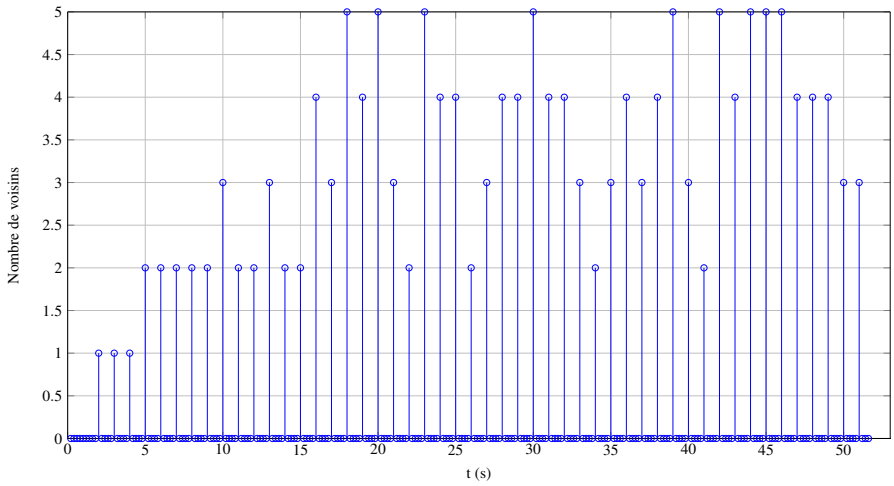


FIGURE 6.5 – Nombre de voisins détectables le long de la trajectoire du véhicule ($T_{beacon} = 1s$).

d'apprécier cet effet dans le scénario visé, nous fixons le SNR = 20 dB côté Matlab avec une couche MAC idéale côté WSNET. Nous examinons l'évolution de l'erreur de localisation le long de la trajectoire , et ce pour une seule réalisation avec deux cas de figure pour la localisation : orientation connue (idéale) et orientation estimée (bruitée).

Orientation connue

Lorsque l'orientation du véhicule est connue localement, le véhicule peut être localisé avec l'algorithme (6.1) et ce dès la réception d'un seul paquet. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 6.6 où l'on affiche à chaque instant l'identifiant du (des) nœud(s) voisins détecté(s) ainsi que l'erreur de localisation correspondante. Il est intéressant de remarquer, par exemple pour le *luminaire 1* détecté en premier, que l'erreur de localisation du véhicule diminue en s'en approchant puis augmente en s'en éloignant. On observe aussi, qu'à des instants très proches on peut détecter plusieurs voisins et avoir des estimations plus ou moins bonnes en fonction de la distance véhicule-source. Cet effet est visible par exemple à $t = 5s$, où l'auto-localisation avec le nœud 1 est nettement plus précise que celle avec le nœud 2 qui est encore loin à cet instant de capture. Cette dernière situation s'inverse deux captures plus loin.

Ces résultats suggèrent que, si l'on veut moyenner plusieurs estimations, il serait judicieux d'intégrer un paramètre de confiance ou de pondération qui tient compte de la distance à la source par rapport à la position précédente et la dynamique de véhicule. Ce résultat serait important dans l'hybridation avec

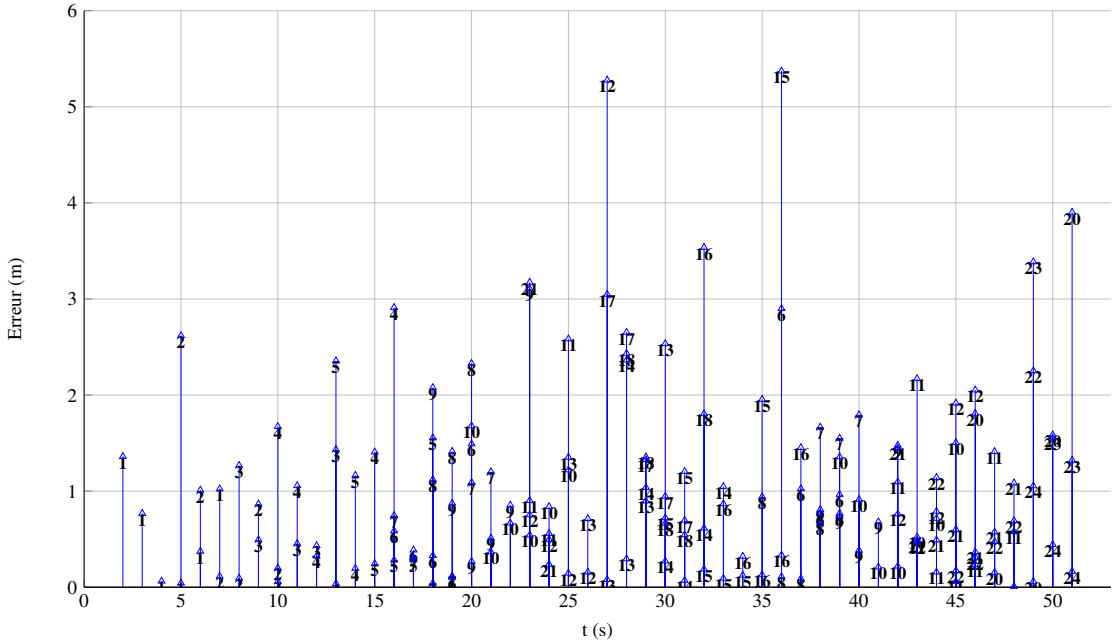


FIGURE 6.6 – Évolution de l'erreur de localisation sur la trajectoire (orientation connue et $SNR = 20$ dB).

la centrale inertielle et la projection sur la carte, comme c'est le cas dans un système de type UNS (cf. chapitre 2).

Orientation estimée

Bien que nous fassions l'hypothèse que l'orientation du véhicule soit connue localement, on peut opportunément l'estimer puis localiser le véhicule à la détection de deux voisins suffisamment proches, et ce en utilisant l'algorithme (6.2). Là aussi, le SNR et la distance à la source influencent la qualité des estimations de l'orientation et de la position. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 6.7 où l'on affiche à chaque instant l'identifiant du (des) nœud(s) voisins détecté(s) ainsi que l'erreur sur l'orientation et la localisation correspondante. L'évolution de l'orientation du véhicule est affichée dans la figure 6.8 avec les estimations d'orientations opportunistes.

Comme pour le cas mono-source, l'effet de la distance aux sources est bien visible, par exemple pour les *luminaires [1,2]* détectés en premier. D'une manière analogue, on observe qu'à des instants très proches on peut détecter plusieurs couples de voisins et avoir des estimations plus ou moins bonnes en fonction de la distance véhicule-sources. Cet effet est visible par exemple à partir de $t = 16s$, où l'auto-localisation avec les nœuds $[4,5]$ est nettement plus précise que celle

avec les nœuds [6,7] qui sont encore loin à cet instant de capture. Alors qu'à l'instant $t = 19s$ la localisation avec les nœuds [6,7] devient plus précise. Il est intéressant de remarquer que dans le cas bi-sources, l'erreur de localisation se trouve globalement meilleure qu'avec le cas mono-source. Cet effet est dû au fait que pour pouvoir observer deux sources dans un laps de temps suffisamment court, le véhicule doit être physiquement présent à des distances plus courtes que celles dans le cas de l'observation mono-source. Cette dernière démarre dès que le véhicule est dans la portée radio de la source.

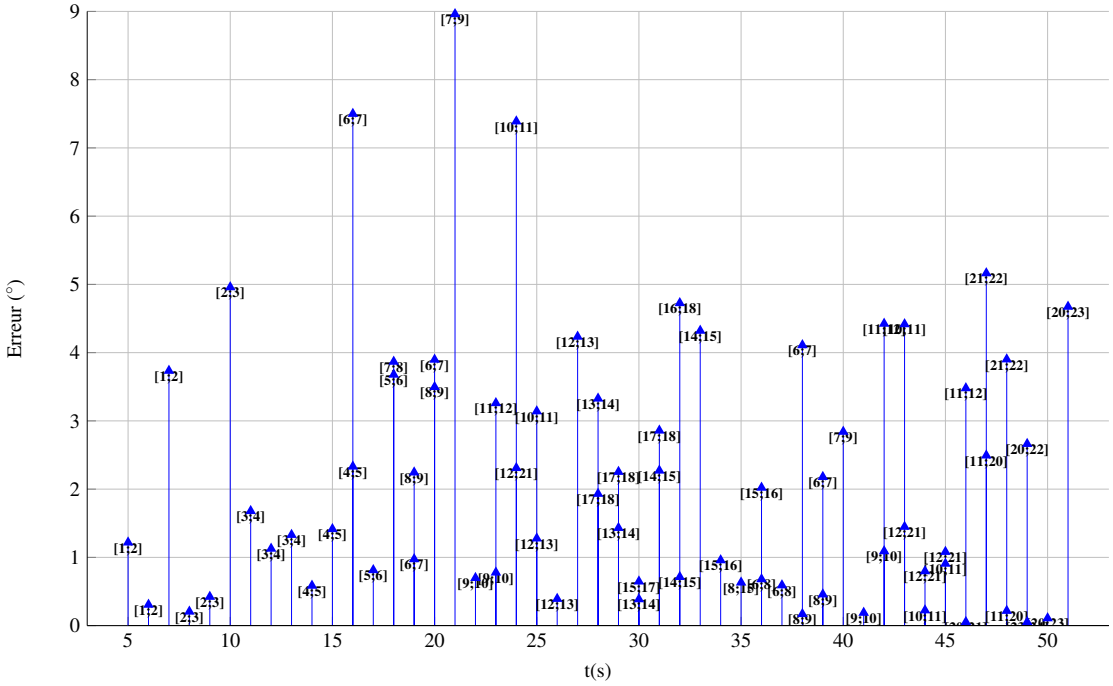
Ces résultats nous permettent de valider la technique d'estimation opportuniste de l'orientation, et permettent de la fusionner avec celle issue de la centrale inertielle au sein du système UNS (cf. chapitre 2).

Erreurs moyennes

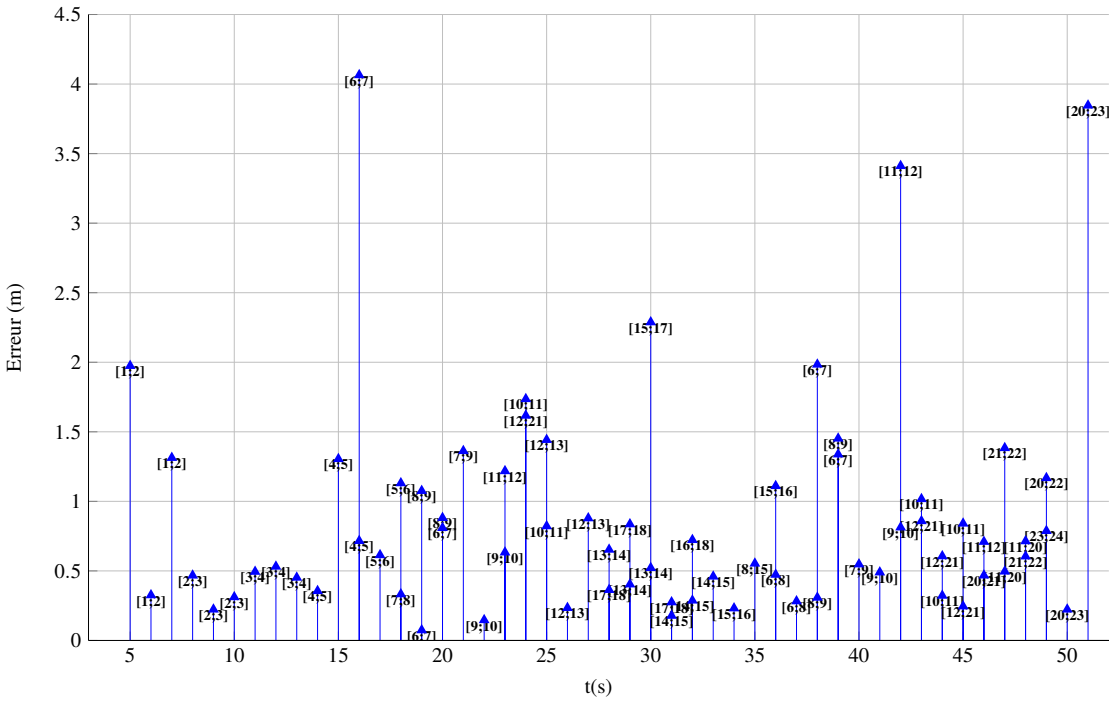
Dans les résultats précédents, nous avons observé les résultats sur une simulation WSNET en fonction de la position du véhicule sur la voie, et ce pour un SNR élevé. Nous nous intéressons maintenant aux erreurs moyennes (RMSE) sur plusieurs simulations et notamment leurs évolution en fonction du SNR.

Nous avons donc répété 500 simulations avec comme SNR : 0, 5, 10 puis 20 dB, et nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des estimations sur tous les échantillons [4]. Sachant que les performances d'ASAP se dégradent avec le SNR et la distance à la source, nous avons ajouté pour ces simulations la même technique de détection de GDOP dans la ligne 5 de l'algorithme (3.1) du 3 : il s'agit d'éliminer toute estimation de position qui ne soit pas cohérente avec la portée radio des nœuds du réseau. Les résultats obtenus sont affichés sur la figure 6.9. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux d'*ASAP* obtenus avec une source à position fixe, à savoir une amélioration globale des performances de localisation avec le SNR. D'un autre côté, il convient de noter que contrairement au cas de radiogoniométrie où la dilution de précision apparaît avec des bruits de mesure d'angle faibles, la dilution de précision n'apparaît ici que pour des SNR bas.

4. L'orientation étant définie modulo 2π et orientée dans le sens anti-horaire, l'erreur d'estimation correspondante est calculée avec $\theta_{err} = \min(2\pi - |\theta - \hat{\theta}|, |\theta - \hat{\theta}|)$.



(a) Erreur d'estimation de l'orientation



(b) Erreur de localisation

FIGURE 6.7 – Évolution de l'erreur de localisation sur la trajectoire (orientation estimée et $SNR = 20$ dB).

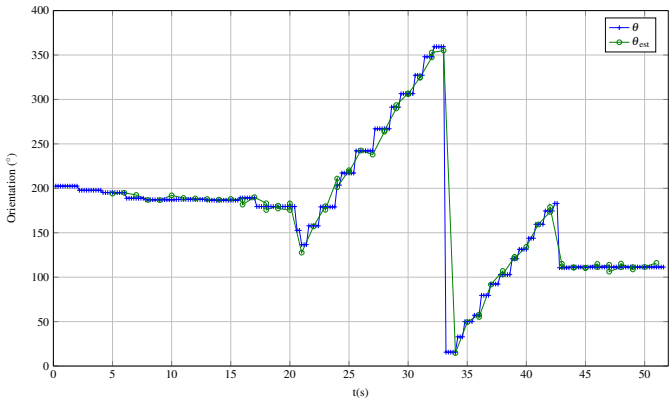
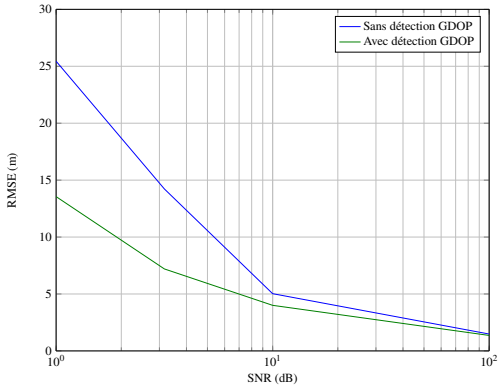
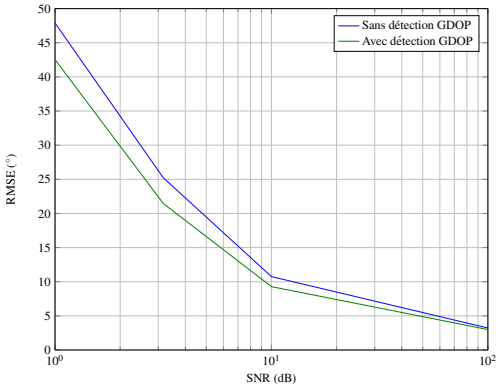


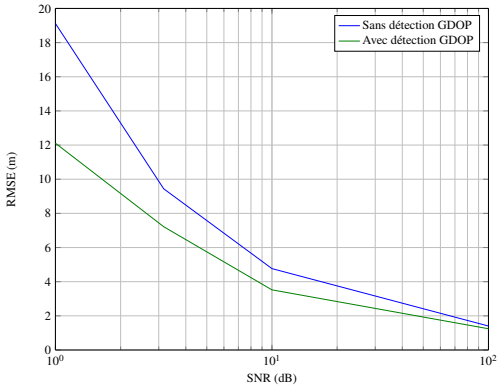
FIGURE 6.8 – Estimation opportuniste de l'orientation ($SNR = 20$ dB).



(a) Localisation mono-source, orientation connue



(b) Estimation de l'orientation

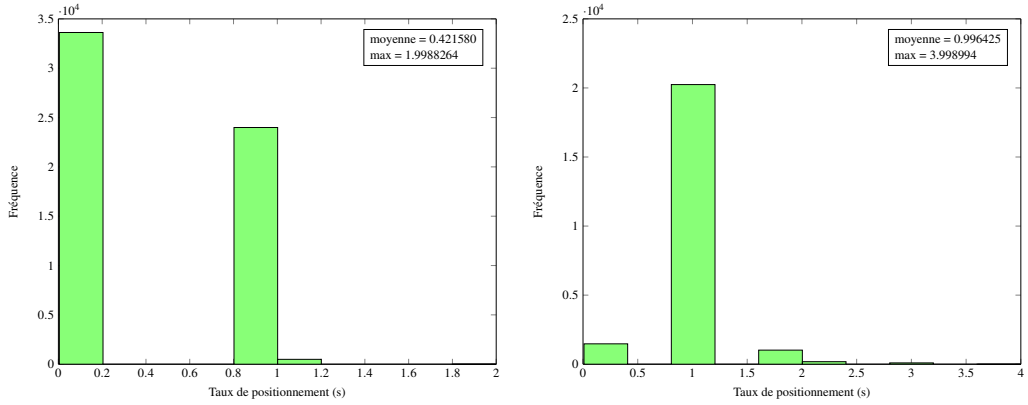


(c) Localisation bi-sources, orientation estimée

FIGURE 6.9 – Erreur de localisation moyenne (RMSE) pour les cas mono-source et bi-sources.

6.4.2 Effet des collisions (couche MAC)

Comme le cas de la radiogoniométrie, le taux de positionnement est affecté par le phénomène des collisions au niveau MAC. En revanche, il faut distinguer deux cas : localisation mono-source et localisation bi-source avec estimation de l'orientation à partir de deux luminaires voisins. Afin d'en évaluer l'impact, nous comparons le cas d'une couche MAC parfaite (pas de collisions) avec celui de la couche MAC réaliste i.e de type IEEE 802.15.4 unslotted CSMA/CA avec une configuration standard [5]. Nous avons effectué 500 simulations en l'absence de bruit du canal (SNR très élevé), et nous observons le taux de positionnement moyen. La distribution du taux de positionnement est fournie dans la figure 6.10.



(a) Cas mono-source (orientation connue) (b) Cas bi-sources (orientation estimée)

FIGURE 6.10 – Effet des collisions sur le taux de positionnement

Dans le cas mono-source (figure 6.10(a)), le taux de positionnement n'est pas réellement affecté car au moins une source gagne l'accès au canal et permet la localisation du véhicule immédiatement ; ce qui explique les taux de positionnement très bas, car le véhicule rencontre souvent plus qu'un luminaire sur la trajectoire (cf.figure 6.5).

Dans le cas bi-sources (figure 6.10(b)), il faut deux luminaires pour aboutir à une estimation de la position du véhicule et on se retrouve dans le même cas que la radiogoniométrie, à savoir les collisions peuvent retarder voir rendre impossible la localisation du nœud mobile se déplaçant dans le voisinage des luminaires malgré sa présence physique à proximité ; ce qui explique la distribution du taux de positionnement autour de $T_{beacon} = 1s$.

5. max-csma-backoff=4,min-backoff-exponent=3, max-backoff-exponent=5

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une deuxième implémentation du bloc de localisation du système *UNS* proposé dans cette thèse. En équipant le véhicule avec un réseau d'antennes à large ouverture (LAA) avec une géométrie circulaire. Grâce à l'algorithme *ASAP*, le véhicule peut se localiser passivement à partir d'une seule source lorsque son orientation est connue – localisation mono-source. Nous avons aussi présenté une technique dite opportuniste pour l'estimation de l'orientation du véhicule aboutissant à une localisation bi-sources. Le système proposé ne suppose aucune contrainte sur les nœuds ancres qui soit spécifique à la technique de localisation utilisée. Grâce à l'algorithme *ASAP*, l'auto-localisation du véhicule peut ainsi se faire d'une manière passive sans interaction avec les ancres comme c'est le cas dans les techniques de la littérature.

Dans le scénario visé par notre problématique, nous avons évalué l'approche proposée en terme de qualité de la localisation et taux de positionnement. En guise de comparaison avec la première version d'UNS, cette version admet des performances comparables mais avec un taux de positionnement plus intéressant. Ceci est dû au fait que tout paquet reçu peut être utilisé dans le processus de localisation du véhicule. D'un autre côté, dans le cas de la localisation bi-sources où l'orientation est d'abord estimée à partir de deux nœuds voisins, on retrouve la même complexité que dans le cas de radiogoniométrie où l'effet des collisions vient perturber le processus de localisation.

Néanmoins, la qualité de l'estimation de la position dépendra de la distance à la source, le SNR et la taille du paquet. Ces paramètres doivent être pris en compte dans les améliorations futures ou même dans l'hybridation avec la centrale inertielle et la projection sur la carte.

CHAPITRE 7

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous présentons une synthèse des contributions de cette thèse, tout en discutant leurs limites en ouvrant des perspectives pour des recherches futures.

7.1 Synthèse

Dans cette thèse, nous avons exploré une nouvelle voie pour la localisation véhiculaire pour les systèmes de transports intelligents dans le contexte émergeant des villes intelligentes. Nous avons proposé un système de radiolocalisation autonome qui permet au véhicule de se localiser d'une manière opportuniste et passive à partir de l'observation de nœuds voisins opérant dans un réseau de capteur sans-fils. Les points forts du système proposé sont les suivants :

1. **Passif** : Le système est toujours en réception et n'interfère pas avec les communications en cours.
2. **Ad-hoc** : Le système ne nécessite pas le déploiement d'un infrastructure dédiée à la localisation. En revanche, il a besoin de connaître la position des nœuds source (géo-référencement) pour les utiliser comme ancre dans le processus de localisation.
3. **Opportuniste** : dès qu'un paquet est reçu, le processus de localisation se déclenche avec une opportunité de localiser le véhicule et éventuellement estimer son orientation.
4. **Intelligent** : au sens ville intelligente, car il exploite le déploiement de systèmes existants (ex. luminaires intelligents) pour créer un service nouveau – la radiolocalisation véhiculaire.

La contrepartie de l'approche présentée est la complexité de sa mise en œuvre. En effet, elle nécessite un matériel dédié et plusieurs antennes de réception qui doivent être en réseau. En terme d'implémentation, nous n'avons pas identifié un matériel directement utilisable et il serait plus judicieux d'adopter une approche de conception mixte matériel-logiciel à base de FPGA pour aboutir à un système embarqué utilisant de l'électronique analogique et numérique ainsi que des algorithmes de traitement du signal (relativement standards). Néanmoins, d'un point de vue logiciel, les algorithmes de localisation présentés sont simples à mettre en œuvre.

7.2 Contributions à l'état de l'art

Dans ce travail, nous avons contribué à l'état de l'art au travers de quelques publications détaillées dans la **Bibliographie personnelle**, page 111.

Dans une première étape, nous avons confronté une radiogoniométrie classique à notre problématique en proposant une première implémentation du système UNS proposé [2]. Nous avons évalué cette implémentation et identifié deux sources d'erreurs. Il s'agit d'abord des collisions sur le canal radio qui rendent la radiogoniométrie plus difficile à mettre en œuvre, du fait qu'il faut attendre la réception de deux paquets de sources distinctes avec un temps inter-paquets suffisamment court par rapport à la dynamique du véhicule. La seconde source d'erreur concerne la dilution de précision (GDOP) qui est due à la non maîtrise de la distribution spatiale des nœuds utilisés comme ancres (les luminaires), ce qui rend souvent inexploitable certaines estimations de position.

Suite à des résultats récents dans la localisation à base de traitement du signal des réseaux d'antennes à large ouverture [72], nous avons investigué la technique de localisation sous-jacente dite LAA. Nous avons traité deux problèmes : l'impact de la géométrie du réseau d'antennes et l'estimation du coefficient d'atténuation du canal (*PLE*). En effet, nous avons prouvé que la technique de localisation LAA admet des ambiguïtés de localisation dans le cas des réseaux circulaires et linéaires. Le résultat clé dans cette démonstration est la relation d'inversion (ou symétrie) entre les deux solutions au problème de localisation en question [5]. Nous avons exploité ce résultat pour construire une solution de localisation mono-ancre appelée *ASAP* qui utilise des réseaux d'antennes circulaires, fixant ainsi la géométrie du réseau, et nous avons étudié ses performances dans toute la zone de localisation du système [3, 6]. Quant au coefficient d'atténuation du canal, nous avons développé une méthode pour l'estimer en utilisant le réseau d'antennes lui-même [1]. Cette méthode utilise les équations des métriques dans la phase d'association et permet une estimation à partir d'une source pilote à position connue, ou à partir des éléments du réseau

d'antennes lui-même.

Après cette phase intermédiaire, nous avons utilisé le système *ASAP* pour implémenter une nouvelle version d'UNS à base de réseaux d'antennes à large ouverture – en contraste avec la première version utilisant un réseau d'antennes à petite ouverture. Avec l'algorithme ASAP, le véhicule peut se localiser en utilisant un seul voisin uniquement. En outre, il peut aussi estimer opportunément l'orientation du véhicule à partir de l'observation de deux nœuds voisins. Les résultats obtenus sont très encourageants par rapport à la première version, mais posent de nouvelles questions qui seront discutées en perspectives.

7.3 Perspectives

Dans ces travaux, nous avons posé un problème nouveau, celui de la radio-localisation opportuniste des véhicules dans une ville intelligente. En se focalisant sur le scénario des luminaires intelligents, nous avons évalué une approche pour aborder ce problème. En contraste avec les approches opportunistes existantes, notre approche cherche à tirer profit non seulement du géo-référencement des nœuds observés mais aussi des signaux reçus au moment de leur observation. Nous pensons que le contexte des villes intelligentes favorise la prolifération des objets communicants et ouvre de nouveaux horizons pour la localisation en général et la localisation véhiculaire en particulier. En ce sens, ce travail de thèse est un déplacement infinitésimal sur une trajectoire qui n'en est qu'à ses débuts. Naturellement, des perspectives s'ouvrent pour améliorer ce qui a été fait, ou pour se projeter dans le futur. Elles sont discutées ci-après.

7.3.1 Système ASAP et coefficient d'affaiblissement

Le système de localisation ASAP présenté dans le chapitre 4 se base sur la phase d'association de l'algorithme de localisation LAA [72] mais avec une phase de fusion de métrique géométrique et spécifique aux réseaux d'antennes à géométrie circulaire. Comme la technique de localisation LAA, dans sa phase d'association, il suppose donc que le coefficient d'affaiblissement du canal (paramètre a) est connu a priori pour le calcul des métriques. Bien que l'estimation de ce paramètre ait été traitée par le chapitre 5, nous ne sommes pas complètement satisfaits du résultat. Afin de préserver l'autonomie du système, nous pensons qu'il serait possible de formuler le problème de localisation en un problème d'optimisation dans lequel le paramètre a est inconnu mais contraint d'appartenir à un intervalle qui reflète les grandeurs physiques possibles par ex. (entre 2 et 5). Ce genre d'approches a été étudié dans la littérature pour localisation à base de RSSI [44, 94, 99, 98, 124, 15, 115, 61]. Des travaux antérieurs ont aussi

été menés pour l'estimation de l'angle d'incidence avec un réseau d'antennes dont les gains et les phases de ces éléments sont inconnus (réseau non calibré), supprimant ainsi la phase de calibration du réseau [39, 127].

D'un autre côté, pour l'estimation des valeurs propres du signal, nous avons supposé un prétraitement du signal avec une technique comme dans [121] pour extraire la composante du signal en vision directe (LOS). Il serait important d'intégrer ce bloc dans le système (en phase de pré-traitement) et étudier son surcoût en terme de complexité ainsi que celui de l'absence de conditions de vision directe (NLOS) sur la qualité de la localisation.

7.3.2 UNS et localisation véhiculaire mono-source

Les résultats du chapitre 6 ont mis en évidence l'effet de la distance sur la qualité de la localisation du véhicule, à savoir l'erreur de localisation décroît lorsque le véhicule s'approche du luminaire. En particulier, à une position donnée le système peut fournir plusieurs estimations à partir de voisins différents. Il serait intéressant de pouvoir identifier l'estimation la plus vraisemblable par rapport à la dynamique du véhicule et de chercher un moyen pour pondérer les estimations pour donner plus de poids aux estimations obtenues avec des nœuds voisins qui soient plus proches de la position courante du véhicule. De telles approches ont été étudiées dans la littérature comme dans [113, 114, 66, 60, 123] pour la localisation à base de RSSI. En effet, dans ce dernier cas l'estimation de la distance est statistiquement meilleure lorsque la source et le récepteur sont proches. Enfin, on peut raisonner d'une manière analogue vis-a-vis de la dégradation de l'estimation de position avec le SNR.

7.3.3 Implémentation et prototypage

La méthode de localisation LAA a été initialement validée par expérience en utilisant du radio logiciel (SDR) dans [7, 130]. Clairement, il s'agit d'une solution idéale pour un prototypage rapide du processus de localisation ASAP (chapitre 4) ainsi que l'estimation du coefficient d'affaiblissement (chapitre 5). Un tel système peut être intégré dans un véhicule de test et effectuer des essais en utilisant le banc d'essai [100, Fig.3] déployé dans la ville de Santander en Espagne. En effet, de nombreux nœuds de type ZigBee sont déployés dans la ville et géo-référencés par le système. Il s'agit d'un cas d'usage idéal pour évaluer l'approche de localisation opportuniste présentée dans le chapitre 6.

7.3.4 Application à d'autres réseaux sans-fils

Dans cette thèse, nous avons restreint le contexte aux réseaux de capteurs sans fils communiquant sur une bande étroite. Or la phase d'association de la localisation LAA a été aussi étendue au cas large bande [72], avec une autre estimation des métriques. Il serait donc intéressant d'investiguer d'autres types de réseaux sans fils où la bande de communication est plus large comme le WiFi (IEEE 802.11). En effet, au niveau physique les trames WiFi sont plus larges que celles dans IEEE 802.15.4, et en général on travaille avec des SNR plus élevés.

7.3.5 A quand la standardisation ?

La mesure de distance (*ranging* en anglais) entre deux nœuds a été introduite par l'amendement du standard IEEE 802.15.4a [56, 55] au travers de la spécification de deux couches physiques alternatives **UWB** et **CSS**. Le mécanisme de mesure de distance se base sur une procédure de calcul du temps aller-retour entre deux nœuds [55, §5.5.7]. Le standard permet également une mesure de distance de type *one-way* ou aller uniquement, en supposant que les nœuds sont synchronisés en suivant un protocole spécifique à l'application (non couvert par le standard).

Nous pensons qu'il serait utile, voire plus simple dans certains cas, de spécifier une trame spécifique au géo-référencement qu'on peut labelliser "trame de type ECHO". Ce type de trame devrait contenir au moins l'adresse MAC source ainsi que des octets de bourrage et ne devrait pas être relayé par les couches supérieures. On peut aussi aller plus loin, en réservant une bande pour le géo-référencement dans laquelle les nœuds envoie un code unique permettant de les identifier.

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

Conférences internationales

[1] Roudy Dagher et Nathalie Mitton. « Online Path Loss Estimation for Localization Using Large Aperture Array Signal Processing ». In : *European Signal Processing Conference 2015 (EUSIPCO 2015)*. Nice, France, août 2015.

[2] Roudy Dagher, Nathalie Mitton et Ibrahim Amadou. « Towards WSN-aided Navigation for Vehicles in Smart Cities : An Application Case Study. » In : *1st International IEEE Percom Workshop on Pervasive Systems for Smart Cities (PerCity 2014)*. Budapest, Hungary, mar. 2014. URL : https://hal.inria.fr/hal-00923611.

Conférences nationales

[3] Roudy Dagher et Nathalie Mitton. « ASAP : Une solution de localisation passive et mono-ancre pour les réseaux de capteurs sans fils ». In : *Joint 16th CFIP & 12th NOTERE (CFIP-NOTERE'15)*. Paris, France, juil. 2015.

Chapitres d'ouvrage

[4] Roudy Dagher et Roberto Quilez. « Localization in Wireless Sensor Networks ». In : *Wireless Sensor and Robot Networks From Topology Control to Communication Aspects*. Sous la dir. de Nathalie Mitton et David Simplot-Ryl. Worldscientific, 2014, p. 203–247. URL : https://hal.inria.fr/hal-00926928.

Rapports de recherche

[5] Roudy Dagher et Nathalie Mitton. *On The Ambiguity of Source Localization Using Large Aperture Arrays*. Research Report RR-8631. Inria Lille, nov. 2014, p. 10. URL : https://hal.inria.fr/hal-01084178.

Brevets

[6] Roudy Dagher et Nathalie Mitton. « Localisation mono-ancre à réseau d'antennes dans un réseau informatique sans fil ». (FR). **Déposé** à l'INPI sous le No 1552747. 31 mar. 2015.

BIBLIOGRAPHIE

[7] Akinbiyi Akindoyin, Marc Willerton et Athanassios Manikas. « Localization and Array Shape Estimation Using Software Defined Radio Array Test Bed ». In : *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2014 IEEE 8th*. To appear. IEEE. Juin 2014.

[8] Ian F Akyildiz et al. « Wireless sensor networks : a survey ». In : *Computer Networks* 38.4 (2002), p. 393–422.

[9] Nima Alam, Asghar Tabatabaie Balaie et Andrew G Dempster. « Dynamic path loss exponent and distance estimation in a vehicular network using doppler effect and received signal strength ». In : *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd*. IEEE. 2010, p. 1–5.

[10] Isaac Amundson et al. « Mobile sensor navigation using rapid rf-based angle of arrival localization ». In : *The 17th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*. Chicago, IL, USA, avr. 2011, p. 316–325.

[11] Sheng-hai An, Byung-Hyug Lee et Dong-Ryeol Shin. « A survey of intelligent transportation systems ». In : *Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN), 2011 Third International Conference on*. IEEE. 2011, p. 332–337.

[12] Luigi Atzori, Antonio Iera et Giacomo Morabito. « The internet of things : A survey ». In : *Computer networks* 54.15 (2010), p. 2787–2805.

[13] Jonathan Bachrach et Christopher Taylor. « Localization in sensor networks ». In : *Handbook of sensor networks : Algorithms and Architectures* 1 (2005). url : http://people.csail.mit.edu/jrb/Projects/poschap.pdf.

[14] Albert Bel, J López Vicario et Gonzalo Seco-Granados. « Real-time path loss and node selection for cooperative localization in wireless sensor networks ». In : *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on*. IEEE. 2010, p. 283–288.

[15] Ana M Bernardos, José R Casar et Paula Tarrío. « Real time calibration for rss indoor positioning systems ». In : *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on*. IEEE. 2010, p. 1–7.

[16] Margrit Betke et Leonid Gurvits. « Mobile robot localization using landmarks ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 13.2 (1997), p. 251–263.

[17] David E Blair. *Inversion theory and conformal mapping*. T. 9. American Mathematical Soc., 2000.

[18] Azzedine Boukerche et al. « Vehicular ad hoc networks : A new challenge for localization-based systems ». In : *Computer Communications* 31.12 (2008), p. 2838–2849.

[19] Nirupama Bulusu, John Heidemann et Deborah Estrin. « GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices ». In : *Personal Communications, IEEE* 7.5 (2000), p. 28–34. url : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=878533&isnumber=19016.

[20] G Chelius, A Fraboulet et E Benhamida. *WSNET : a modular event-driven wireless network simulator*. http://wsnet.gforge.inria.fr/. 2006.

[21] Min Chen, Shiwen Mao et Yunhao Liu. « Big data : A survey ». In : *Mobile Networks and Applications* 19.2 (2014), p. 171–209.

[22] Hafedh Chourabi et al. « Understanding smart cities : An integrative framework ». In : *System Science (HICSS), 2012 45th Hawaii International Conference on*. IEEE. 2012, p. 2289–2297.

[23] RTLS DecaWave. *Product Description and Applications, DecaWave, Dublin, Ireland, 2009*. http://www.decawave.com/technology.

[24] Gustavo W Denardin et al. « Control network for modern street lighting systems ». In : *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Gdańsk - Poland, juin 2011, p. 1282–1289.

[25] BJ Dil et PJM Havinga. « Stochastic radio interferometric positioning in the 2.4 ghz range ». In : *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys' 11)*. ACM, 2011, p. 108–120. url : http://doi.acm.org/10.1145/2070942.2070954.

[26] George Dimitrakopoulos. « Intelligent transportation systems based on internet-connected vehicles : Fundamental research areas and challenges ». In : *ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on*. IEEE. 2011, p. 145–151.

[27] George Dimitrakopoulos et Panagiotis Demestichas. « Intelligent transportation systems ». In : *Vehicular Technology Magazine, IEEE* 5.1 (2010), p. 77–84.

[28] Susanne Dirks et Mary Keeling. « A vision of smarter cities : How cities can lead the way into a prosperous and sustainable future ». In : *IBM Institute for Business Value. June* (2009).

[29] Lance Doherty, Laurent El Ghaoui et al. « Convex position estimation in wireless sensor networks ». In : *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*. T. 3. IEEE. 2001, p. 1655–1663. URL : `http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=916662&isnumber=19795`.

[30] F Domingo-Perez et al. « Lighting control system based on DALI and wireless sensor networks ». In : *The third IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. Berlin, Germany, jan. 2012, p. 1–6.

[31] Chris R Drane et Chris Rizos. *Positioning systems in intelligent transportation systems*. Artech House, Inc., 1998.

[32] Echelon. *Outdoor Street Lighting - Making Lighting more Efficient. Safe and Affordable With Open-Standard Control Networking Technology*. Whitepaper. Echelon, juil. 2014. URL : `http://www.echelon.com/assets/blt7389f5c3032dbbc0/Lighting-making-outdoor-streetlighting-more-efficient-whitepaper.pdf`.

[33] João Sena Esteves, Adriano Carvalho et Carlos Couto. « Generalized geometric triangulation algorithm for mobile robot absolute self-localization ». In : *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE))*. T. 1. Rio de Janeiro, Brasil, juin 2003, p. 346–351.

[34] Shahin Farahani. *ZigBee wireless networks and transceivers*. newnes, 2011.

[35] Jay Farrell. *Aided navigation : GPS with high rate sensors*. McGraw-Hill, Inc., 2008.

[36] Sébastien Faye, Claude Chaudet et Isabelle Demeure. « Un algorithme distribué de contrôle des feux de circulation sur plusieurs intersections par un réseau de capteurs sans fil ». In : *Nouvelles Technologies de la Répartition/Colloque francophone sur l'ingénierie des protocoles (NOTERE/CFIP)*. 2012, p. 1.

[37] Lino Figueiredo et al. « Towards the development of intelligent transportation systems ». In : *Intelligent transportation systems*. T. 88. 2001, p. 1206–1211.

[38] Andreas Fink et Helmut Beikirch. « Analysis of RSS-based Location Estimation Techniques in Fading Environments ». In : *2nd IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. 2011, p. 1–6. URL : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6071943&isnumber=6071904.

[39] Benjamin Friedlander et Anthony J Weiss. « Eigenstructure methods for direction finding with sensor gain and phase uncertainties ». In : *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988. ICASSP-88., 1988 International Conference on*. IEEE. 1988, p. 2681–2684.

[40] Mario Gerla et al. « Internet of vehicles : From intelligent grid to autonomous cars and vehicular clouds ». In : *Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on*. IEEE. 2014, p. 241–246.

[41] Sinan Gezici. « A survey on wireless position estimation ». In : *Wireless Personal Communications* 44.3 (2008), p. 263–282.

[42] Sinan Gezici et H Vincent Poor. « Position estimation via ultra-wideband signals ». In : *Proceedings of the IEEE* 97.2 (2009), p. 386–403. URL : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4796279&isnumber=4802183.

[43] Sinan Gezici et al. « Localization via ultra-wideband radios : a look at positioning aspects for future sensor networks ». In : *Signal Processing Magazine, IEEE* 22.4 (2005), p. 70–84. URL : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1458289&isnumber=31384.

[44] Mohammad Reza Gholami, Reza Monir Vaghefi et Erik G Strom. « RSS-based sensor localization in the presence of unknown channel parameters ». In : *Signal Processing, IEEE Transactions on* 61.15 (2013), p. 3752–3759.

[45] Gianni Giorgetti et al. « Single-anchor indoor localization using a switched-beam antenna ». In : *IEEE Communications Letters* 13.1 (2009), p. 58–60.

[46] Nanotron Technologies GmbH. *Real Time Location Systems (RTLS)*. White Paper, NA-06-0148-0391-1.02. Berlin, Germany : Nanotron Technologies GmbH, avr. 2007. URL : http://www.nanotron.com/EN/pdf/WP_RTLS.pdf.

[47] Gerhard P Hancke, Gerhard P Hancke Jr et al. « The role of advanced sensing in smart cities ». In : *Sensors* 13.1 (2012), p. 393–425.

[48] Colin Harrison et Ian Abbott Donnelly. « A theory of smart cities ». In : *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the ISSS-2011, Hull, UK*. T. 55. 1. 2011.

[49] Hannes Hartenstein et Kenneth Laberteaux. *VANET vehicular applications and inter-networking technologies*. T. 1. John Wiley & Sons, 2009.

[50] Hannes Hartenstein et Kenneth P Laberteaux. « A tutorial survey on vehicular ad hoc networks ». In : *Communications Magazine, IEEE* 46.6 (2008), p. 164–171.

[51] Tian He et al. « Range-free localization schemes for large scale sensor networks ». In : *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM. 2003, p. 81–95. url : http://doi.acm.org/10.1145/938985.938995.

[52] Karel Heurtefeux et Valois Fabrice. « De la pertinence du rssi pour la localisation dans les réseaux de capteurs ». In : *AlgoTel*. 2012, p. 1.

[53] Anthony T Holdener. *HTML5 Geolocation*. " O'Reilly Media, Inc.", 2011.

[54] *IEEE 802.15.4 MAC standard, 2006 revision*. http://www.ieee.org/. 2008.

[55] « IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) ». In : *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)* (2007), p. 1–203. doi : 10.1109/IEEESTD.2007.4299496.

[56] Eirini Karapistoli et al. « An overview of the IEEE 802.15. 4a standard ». In : *Communications Magazine, IEEE* 48.1 (2010), p. 47–53.

[57] Alonzo Kelly. « Precision dilution in triangulation based mobile robot position estimation ». In : *Intelligent Autonomous Systems*. 2003.

[58] Haseebulla M Khan, Stephan Olariu et Mohamed Eltoweissy. « Efficient single-anchor localization in sensor networks ». In : *Dependability and Security in Sensor Networks and Systems, 2006. DSSNS 2006. Second IEEE Workshop on*. IEEE. 2006, p. 43–52.

[59] Chee Wee Kim, FPS Chin et HK Garg. « Selection of Frequency for Near Field Electromagnetic Ranging (NFER) Based on its Cramer–Rao Bound ». In : *Signal Processing Letters, IEEE* 14.12 (2007), p. 1000–1003. url : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4358007&isnumber=4380451.

[60] Eunchan Kim et Kiseon Kim. « Distance estimation with weighted least squares for mobile beacon-based localization in wireless sensor networks ». In : *Signal Processing Letters, IEEE* 17.6 (2010), p. 559–562.

[61] Sunghun Kim, Hyoungsuk Jeon et Joongsoo Ma. « Robust localization with unknown transmission power for cognitive radio ». In : *Military Communications Conference, 2007. MILCOM 2007. IEEE*. IEEE. 2007, p. 1–6.

[62] Horst Kloeden et al. « Vehicle localization using cooperative RF-based landmarks ». In : *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*. IEEE. 2011, p. 387–392.

[63] Charles Knapp et Glifford Carter. « The generalized correlation method for estimation of time delay ». In : *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on* 24.4 (1976), p. 320–327. URL : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1162830&isnumber=26119.

[64] Hamid Krim et Mats Viberg. « Two decades of array signal processing research : the parametric approach ». In : *Signal Processing Magazine, IEEE* 13.4 (1996), p. 67–94.

[65] B Kusy et J Sallai. *Analytical solution for radio-interferometric localization of mobile sensors*. Rapp. tech. ISIS-06-710. vanderbilt : ISIS, déc. 2006. URL : http://www.isis.vanderbilt.edu/node/3479.

[66] Mohamed Laaraiedh, Stéphane Avrillon et Bernard Uguen. « Enhancing positioning accuracy through RSS based ranging and weighted least square approximation ». In : *POCA 2009*. 2009, p. 31–35.

[67] *Les Transports Intelligent*. http://www.transport-intelligent.net. Dernier accès : 09 juillet 2015. Affilié au Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

[68] Kai Liu et Hock Beng Lim. « Positioning accuracy improvement via distributed location estimate in cooperative vehicular networks ». In : *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*. IEEE. 2012, p. 1549–1554.

[69] Kai Liu et al. « Improving positioning accuracy using gps pseudorange measurements for cooperative vehicular localization ». In : *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 63.6 (2014), p. 2544–2556.

[70] Yunhao Liu et al. « Location, localization, and localizability ». In : *Journal of Computer Science and Technology* 25.2 (2010), p. 274–297.

[71] Athanassios Manikas, Yousif I Kamil et P Karaminas. « Positioning in wireless sensor networks using array processing ». In : *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*. IEEE. 2008, p. 1–5.

[72] Athanassios Manikas, Yousif I Kamil et Marc Willerton. « Source localization using sparse large aperture arrays ». In : *Signal Processing, IEEE Transactions on* 60.12 (2012), p. 6617–6629.

[73] Guoqiang Mao, Brian DO Anderson et Baris Fidan. « Online calibration of path loss exponent in wireless sensor networks ». In : *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM'06. IEEE*. IEEE. 2006, p. 1–6.

[74] Guoqiang Mao, Brian DO Anderson et Barış Fidan. « Path loss exponent estimation for wireless sensor network localization ». In : *Computer Networks* 51.10 (2007), p. 2467–2483.

[75] Guoqiang Mao, Barış Fidan et Brian Anderson. « Wireless sensor network localization techniques ». In : *Computer Networks* 51.10 (2007), p. 2529–2553.

[76] Frédéric Marguet. *Histoire générale de la navigation*. 1931. url : http://devill.net/Infos/navigation/histoire_nav_marguet.pdf.

[77] Miklós Maróti et al. « Radio interferometric geolocation ». In : *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM. 2005, p. 1–12. url : http://doi.acm.org/10.1145/1098918.1098920.

[78] Cherian P Mathews et Michael D Zoltowski. *Signal subspace techniques for source localization with circular sensor arrays*. ECE Technical Reports TR-EE 94-3. West Lafayette, Indiana 47907-1285 : Purdue University, jan. 1994. url : http://docs.lib.purdue.edu/ecetr/172/.

[79] Clare D Mcgillem et Theodore S Rappaport. « A beacon navigation method for autonomous vehicles ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 38.3 (1989), p. 132–139.

[80] Paul Meissner et Klaus Witrisal. « Multipath-assisted single-anchor indoor localization in an office environment ». In : *Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2012 19th International Conference on*. IEEE. 2012, p. 22–25.

[81] Dragos Niculescu. « Positioning in ad hoc sensor networks ». In : *Network, IEEE* 18.4 (2004), p. 24–29. url : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1316758&isnumber=29182.

[82] Amitangshu Pal. « Localization algorithms in wireless sensor networks : Current approaches and future challenges ». In : *Network Protocols and Algorithms* 2.1 (2010), p. 45–73. URL : http://www.macrothink.org/journal/index.php/npa/article/view/279.

[83] Panos Papadimitratos et al. « Vehicular communication systems : Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation ». In : *Communications Magazine, IEEE* 47.11 (2009), p. 84–95.

[84] Ryan Parker et Shahrokh Valaee. « Vehicle localization in vehicular networks ». In : *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*. IEEE. 2006, p. 1–5.

[85] Neal Patwari et al. « Relative location estimation in wireless sensor networks ». In : *Signal Processing, IEEE Transactions on* 51.8 (2003), p. 2137–2148.

[86] Dan Pedoe. *Geometry : A comprehensive course*. Courier Dover Publications, 2013.

[87] Charith Perera et al. « Sensing as a service model for smart cities supported by internet of things ». In : *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 25.1 (2014), p. 81–93.

[88] Andrei Popescu. « Geolocation api specification ». In : *World Wide Web Consortium, Candidate Recommendation CR-geolocation-API-20100907* (2010).

[89] Chuan Chin Pu, Soo Yong Lim et Pei Cheng Ooi. « Measurement arrangement for the estimation of path loss exponent in wireless sensor network ». In : *Computing and Convergence Technology (ICCCT), 2012 7th International Conference on*. IEEE. 2012, p. 807–812.

[90] Kashif Naseer Qureshi et Abdul Hanan Abdullah. « A survey on intelligent transportation systems ». In : *Middle-East Journal of Scientific Research* 15.5 (2013), p. 629–642.

[91] Theodore S Rappaport. *Wireless communications : principles and practice*. 2nd. Prentice Hall PTR, 2001.

[92] Theodore S Rappaport, Jeffrey H Reed et Brian D Woerner. « Position location using wireless communications on highways of the future ». In : *Communications Magazine, IEEE* 34.10 (1996), p. 33–41.

[93] Haroon Rashid et Ashok Kumar Turuk. « Localization of wireless sensor networks using a single anchor node ». In : *Wireless personal communications* 72.2 (2013), p. 975–986.

[94] Imtiaz Rasool, Naveed Salman et AH Kemp. « RSSI-based positioning in unknown path-loss model for WSN ». In : *Sensor Signal Processing for Defence (SSPD 2012)*. IET. 2012, p. 1–5.

[95] Priyanka Rawat et al. « Wireless sensor networks : a survey on recent developments and potential synergies ». In : *The Journal of Supercomputing* 68.1 (2014), p. 1–48.

[96] Peng Rong et Mihail L Sichitiu. « Angle of arrival localization for wireless sensor networks ». In : *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON'06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on*. T. 1. 2006, p. 374–382.

[97] Zafer Sahinoglu et Sinan Gezici. « Ranging in the IEEE 802.15.4a standard ». In : *Wireless and Microwave Technology Conference, 2006. WAMICON'06. IEEE Annual*. IEEE. 2006, p. 1–5. URL : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4161059&isnumber=4141009.

[98] Naveed Salman, Mounir Ghogho et Andrew H Kemp. « On the joint estimation of the RSS-based location and path-loss exponent ». In : *Wireless Communications Letters, IEEE* 1.1 (2012), p. 34–37.

[99] Naveed Salman, AH Kemp et Mounir Ghogho. « Low complexity joint estimation of location and path-loss exponent ». In : *Wireless Communications Letters, IEEE* 1.4 (2012), p. 364–367.

[100] Luis Sanchez et al. « SmartSantander : IoT experimentation over a smart city testbed ». In : *Computer Networks* 61 (2014), p. 217–238.

[101] Peter Volgyesi Sandor Szilvasi. « Interferometry - Research and Applications in Science and Technology ». In : sous la dir. d'Ivan Padron. InTech, 2012. Chap. Interferometry in Wireless Sensor Networks, p. 32–43. URL : http://www.intechopen.com/books/interferometry-research-and-applications-in-science-and-technology/interferometry-in-wireless-sensor-networks.

[102] Tapan K Sarkar et al. « A survey of various propagation models for mobile communication ». In : *Antennas and Propagation Magazine, IEEE* 45.3 (2003), p. 51–82.

[103] Andreas Savvides et al. « Localization in sensor networks ». In : *Wireless sensor networks*. Springer, 2004, p. 327–349.

[104] Hans G Schantz. « A real-time location system using near-field electromagnetic ranging ». In : *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*. IEEE. 2007, p. 3792–3795. URL : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4396365&isnumber=4395410.

[105] Hans Gregory Schantz. « Near field phase behavior ». In : *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*. T. 3. IEEE. 2005, p. 134–137. URL : http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1552452&isnumber=33059.

[106] Hans Schantz et James Fluhler. « Near-Field Technology–An Emerging RF Discipline ». In : *The European Conference on Antennas and Propagation : EuCAP 2006*. T. 626. 2006, p. 2. URL : http://www.q-track.com/documentation/IEEE-APS-2006.pdf.

[107] Andreas Schindler. « Vehicle Self-localization with High-Precision Digital Maps ». Thèse de doct. University of Passau, fév. 2013.

[108] Andreas Schindler. « Vehicle self-localization with high-precision digital maps ». In : *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*. IEEE. 2013, p. 141–146.

[109] Ralph O Schmidt. « Multiple emitter location and signal parameter estimation ». In : *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 34.3 (1986), p. 276–280.

[110] Scott Y Seidel et Theodore S Rappaport. « 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings ». In : *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 40.2 (1992), p. 207–217.

[111] Isaac Skog et Peter Handel. « In-car positioning and navigation technologies—A survey ». In : *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 10.1 (2009), p. 4–21.

[112] Guolin Sun et al. « Signal processing techniques in network-aided positioning : a survey of state-of-the-art positioning designs ». In : *Signal Processing Magazine, IEEE* 22.4 (2005), p. 12–23.

[113] Paula Tarrío, Ana M Bernardos et José R Casar. « Weighted least squares techniques for improved received signal strength based localization ». In : *Sensors* 11.9 (2011), p. 8569–8592.

[114] Paula Tarrio, Ana M Bernardos, José R Casar et al. « A new positioning technique for RSS-Based localization based on a weighted least squares estimator ». In : *Wireless Communication Systems. 2008. ISWCS'08. IEEE International Symposium on*. IEEE. 2008, p. 633–637.

[115] Paula Tarrío et al. « Dynamic channel model LMS updating for RSS-based localization ». In : *Hybrid Artificial Intelligent Systems*. Springer, 2011, p. 127–135.

[116] Malik Tubaishat et al. « Wireless sensor networks in intelligent transportation systems ». In : *Wireless communications and mobile computing* 9.3 (2009), p. 287–302.

[117] Philip TURNER. « Le défi des villes intelligentes ». In : *Public transport international* 62.4 (2013), p. 10–11.

[118] Reza M Vaghefi, Mohammad Reza Gholami et EG Strom. « Bearing-only target localization with uncertainties in observer position ». In : *The 21st IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops)*. Istanbul, Turkey, sept. 2010, p. 238–242.

[119] Jose Vallet et al. « Simultaneous RSS-based localization and model calibration in wireless networks with a mobile robot ». In : *Procedia Computer Science* 10 (2012), p. 1106–1113.

[120] James A Van Allen. « Basic principles of celestial navigation ». In : *American journal of physics* 72.11 (2004), p. 1418–1424.

[121] Evangelos Venieris et Athanassios Manikas. « Preprocessing algorithm for source localisation in a multipath environment ». In : *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2014 IEEE 8th*. Juin 2014, p. 41–44.

[122] Fei-Yue Wang, C Herget et Deze Zeng. « Guest editorial developing and improving transportation systems : the structure and operation of IEEE intelligent transportation systems society ». In : *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 6.3 (2005), p. 261–264.

[123] Gang Wang et Kehu Yang. « A new approach to sensor node localization using RSS measurements in wireless sensor networks ». In : *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 10.5 (2011), p. 1389–1395.

[124] Gang Wang et al. « On received-signal-strength based localization with unknown transmit power and path loss exponent ». In : *Wireless Communications Letters, IEEE* 1.5 (2012), p. 536–539.

[125] Jing Wang, RK Ghosh et Sajal K Das. « A survey on sensor localization ». In : *Journal of Control Theory and Applications* 8.1 (2010), p. 2–11. URL : http://dx.doi.org/10.1007/s11768-010-9187-7.

[126] T. Watteyne et K. S. J. Pister. « Smarter Cities Through Standards-based Wireless Sensor Networks ». In : *IBM Journal of Research and Development* 55.1&2 (2011), p. 80–89.

[127] Anthony J Weiss et Benjamin Friedlander. « Array shape calibration using eigenstructure methods ». In : *Signal Processing* 22.3 (1991), p. 251–258.

[128] Kamin Whitehouse, Chris Karlof et David Culler. « A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization ». In : *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 11.1 (2007), p. 41–52.

[129] Marc Willerton. « Array Auto-calibration ». Thèse de doct. Imperial College London, juin 2013.

[130] Marc Willerton et al. « Experimental characterization of a large aperture array localization technique using an SDR testbench ». In : *Wireless Innovation Forum Conf. on Comms Technologies and Software Defined Radio*. 2011.

[131] JED Williams. *From sails to satellites : the origin and development of navigational science*. Oxford [etc.] : Oxford University Press, 1992.

[132] Geng Wu et al. « M2M : From mobile to embedded internet ». In : *Communications Magazine, IEEE* 49.4 (2011), p. 36–43.

[133] Tingcong Ye et al. « Experimental impulse radio IEEE 802.15. 4a UWB based wireless sensor localization technology : Characterization, reliability and ranging ». In : *ISSC 2011, 22nd IET Irish Signals and Systems Conference, Dublin, Ireland. 23-24 Jun 2011*. Insitution of Engineering et Technology. 2011.

[134] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee et Dipak Ghosal. « Wireless sensor network survey ». In : *Computer networks* 52.12 (2008), p. 2292–2330.

[135] Arkady Zaslavsky, Charith Perera et Dimitrios Georgakopoulos. « Sensing as a service and big data ». In : *arXiv preprint arXiv :1301.0159* (2013).

ANNEXE A

DIAGONALISATION D'UNE MATRICE HERMITIENNE PARTICULIÈRE

Proposition 1. *Soit* $\underline{a} = (a_i)_{1 \leq i \leq n} \in \mathcal{C}^{n \times 1}$*, alors la matrice* $\mathbf{A} = \underline{a} \cdot \underline{a}^H$ *est hermitienne et admet une seule valeur propre non nulle comme suit*

$$\mathbf{A} = \mathbf{E} \cdot \begin{bmatrix} \|\underline{a}\|_2^2 & 0 \\ 0 & \mathbb{O}_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{E}^H,$$

avec $\|\underline{a}\|_2^2 = trace(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot \bar{a}_i = \underline{1}_n^T \cdot (\underline{a} \odot \underline{a}^*)$.

Démonstration. La matrice $\mathbf{A}$ est hermitienne car

$$\mathbf{A}^H = \left(\underline{a} \cdot \underline{a}^H\right)^H = (\underline{a}^H)^H \cdot \underline{a}^H = \underline{a} \cdot \underline{a}^H = \mathbf{A}$$

Ensuite, il suffit de remarquer que $rang(\mathbf{A}) = 1$, ce qui est dû au fait que ses colonnes vérifient :

$$\underline{A}_i = \bar{a}_i \cdot \underline{a} \quad \forall i = 1 \ldots n.$$

Par conséquent, la matrice $\mathbf{A}$ admet une seule valeur singulière non nulle et sa

décomposition en valeurs singulières est

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \mathbb{O}_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{V}^H.$$

Or, étant hermitienne, la matrice **A** admet un spectre lié à ses valeurs singulières comme suit

$$\lambda(\mathbf{A}) = \left\{ \lambda_i = \sigma_i^2 \in \mathcal{R} \right\}.$$

Ainsi la matrice **A** admet une seule valeur propre non nulle et sa décomposition en valeurs propres est

$$\mathbf{A} = \mathbf{E} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \mathbb{O}_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{E}^H.$$

Finalement, on a

$$trace(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = \lambda_1 \quad \text{, sachant que } trace(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot \bar{a}_i = \|\underline{a}\|_2^2.$$

■

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements **vii**

Sommaire **ix**

Liste des tableaux **xi**

Liste des figures **xiii**

Liste des algorithmes **xvii**

Liste des acronymes **xix**

Notations **1**

Introduction générale **3**
Contexte 3
Thèse 4
Organisation du manuscrit 5

1 État de l'art **7**
1.1 Les techniques de radiolocalisation 8
1.1.1 Le procédé de localisation 8
1.1.2 Les principales métriques 10
1.2 La localisation opportuniste dans les villes 20
1.2.1 BigData et géo-référencement 20
1.2.2 Services de géolocalisation 21
1.3 Les systèmes de transport intelligents (STI) 22
1.3.1 Les applications et problématiques 23
1.3.2 Les technologies de communication 24

1.3.3 La localisation véhiculaire dans les STI 25
1.4 Synthèse 27

2 Vers la radionavigation opportuniste dans les villes intelligentes 29
2.1 Contexte - les réseaux de capteurs sans fils dans les villes intelligentes 30
2.1.1 Les villes intelligentes 30
2.1.2 Les réseaux de capteurs sans-fils 31
2.1.3 Les luminaires intelligents 33
2.2 Problématique - radiolocalisation opportuniste et passive . . . 34
2.2.1 Hypothèses et contraintes 35
2.2.2 Discussion des approches existantes 35
2.3 Approche - cross layer avec des réseaux d'antennes 37
2.3.1 Processus de localisation 38

3 Analyse d'une radiogoniométrie opportuniste dans les villes intelligentes 41
3.1 Le système *UNS* à base d'angles d'incidence 42
3.1.1 Radiogoniométrie idéale 42
3.1.2 Radiogoniométrie bruitée 44
3.1.3 Algorithme de localisation 45
3.2 Méthodologie d'évaluation 47
3.2.1 Modèle du réseau 48
3.2.2 Modèle de mobilité 48
3.3 Résultats de simulations 49
3.3.1 L'effet des collisions (couche MAC) 51
3.3.2 Effet du bruit de radiogoniométrie 52
3.4 Conclusion 54

4 *ASAP* : radiolocalisation passive et mono-ancre pour les réseaux de capteurs sans fils 55
4.1 Approche retenue (*ASAP*) et état de l'art 56
4.2 Formulation du problème de localisation 58
4.2.1 Modèle du canal en zone de Fresnel 58
4.2.2 Phase d'association et métriques 60
4.2.3 La fusion des métriques *Analytique* 61
4.2.4 Les sources d'erreurs 62
4.2.5 Synthèse 63
4.3 Les ambiguïtés des réseaux d'antennes circulaires 64
4.3.1 Ambiguïtés dans le plan (2D) 65
4.3.2 Ambiguïtés dans l'espace (3D) 68

4.3.3 Ambiguïtés dans la *méthode analytique* 68
4.4 La fusion de métriques d'*ASAP* 68
4.5 Résultats des simulations numériques 71
4.5.1 Comparaison avec la méthode analytique 72
4.5.2 Etude de l'erreur dans la zone de localisation 72
4.6 Conclusion 75

5 Auto-Calibration dans un réseau d'antennes à large ouverture 77
5.1 L'approche retenue 78
5.2 Formulation du problème 78
5.3 Estimation du coefficient d'atténuation (*PLE*) 79
5.3.1 Estimation avec une source pilote 79
5.3.2 Estimation automatique 80
5.4 Résultats des simulations numériques 83
5.4.1 Performance de l'estimation du PLE 83
5.4.2 Sensibilité de la localisation LAA 84
5.5 Conclusion 87

6 Une radiolocalisation mono-source dans les villes intelligentes 89
6.1 Le système *UNS* amélioré 90
6.2 Localisation du véhicule avec l'algorithme *ASAP* 91
6.2.1 Estimation de la position du véhicule 92
6.2.2 Estimation de l'orientation du véhicule 92
6.2.3 Algorithme de localisation 94
6.3 Méthodologie d'évaluation 96
6.4 Résultats des simulations numériques 97
6.4.1 Effet du bruit du canal 97
6.4.2 Effet des collisions (couche MAC) 103
6.5 Conclusion 104

7 Conclusion et Perspectives 105
7.1 Synthèse 105
7.2 Contributions à l'état de l'art 106
7.3 Perspectives 107
7.3.1 Système ASAP et coefficient d'affaiblissement 107
7.3.2 UNS et localisation véhiculaire mono-source 108
7.3.3 Implémentation et prototypage 108
7.3.4 Application à d'autres réseaux sans-fils 109
7.3.5 A quand la standardisation ? 109

Bibliographie personnelle 111

Bibliographie **113**

A Diagonalisation d'une matrice hermitienne particulière **125**

Table des matières **127**

Sur la radionavigation dans les villes intelligentes du futur
Le cas des réseaux de capteurs sans fils

Résumé

Avec l'essor de l'internet des objets, le nombre d'objets communicants dans nos villes est en pleine croissance, et notamment avec l'émergence du concept des "Villes Intelligentes". A l'instar des points d'accès Wifi, beaucoup de ces objets sont placés à des positions initialement connues, et pouvant être partagées dans le "Cloud" dans une démarche "BigData" ; on parle alors de géo-référencement. Dans ce contexte, nous posons le problème de la radiolocalisation véhiculaire opportuniste basée sur la découverte de voisinage et l'exploitation des signaux reçus. Nous proposons une approche novatrice pour l'auto-localisation véhiculaire dans le domaine des systèmes de transport intelligents. La méthode proposée est opportuniste, passive et non-intrusive vis-a-vis des réseaux et des applications. La thèse défendue propose un système de localisation qui s'intègre aisément dans une pile de communication standard et qui s'étend sur deux niveaux protocolaires : couche physique et couche de liaison. Au niveau physique, nous utilisons un réseau d'antennes pour collecter les signaux à des fins d'identification et de localisation. Dès qu'un paquet est détecté au niveau MAC, les signaux physiques correspondants sont exploités pour estimer la position de l'émetteur dans le référentiel du véhicule. En utilisant l'identifiant de l'émetteur, on peut retrouver sa position dans un référentiel externe (ou global) depuis une base de données construite hors ligne et accessible localement ou à distance. En connaissant l'orientation du véhicule, la position du véhicule dans le référentiel externe peut être ensuite estimée par changement de base.

Mots clés : auto-localisation, systèmes de transports intelligents, villes intelligentes, réseaux de capteurs sans fils, réseaux d'antennes, traitement du signal.

Abstract

With the development of the internet of things, the number of communicating objects is rapidly increasing especially with the emergence of the "Smart City" concept. As in the case of WiFi access points, many of these objects would operate at fixed and known positions. Such information is made available in the Cloud under the Big Data paradigm, thus leading to the so called geo-referencing of the nodes. In such a context, we pose the problem of opportunistic vehicular radio-localization by means of neighborhood discovery and signal processing of received neighboring signals. We propose a novel approach for vehicle self-localization as a contribution to the field of intelligent transportation systems. The proposed solution is opportunistic, passive and non-intrusive regarding the network operations and deployed applications. The thesis defends a localization system that seamlessly integrates with a standard communication stack and covers two layers : physical and link. At physical level, we use an antenna array for collecting and processing the received signals for both identification and localization. As soon as a packet is detected at MAC layer, the corresponding signals are exploited to localize the source with respect to the vehicle body frame. By using the source identifier, its position in the external (or global) frame is looked up in a database that was previously built off-line and made accessible locally or remotely. By assuming that the vehicle orientation is known, the position of the vehicle is then estimated using basis change equations.

Keywords: self-localization, intelligent transportation systems, smart cities, wireless sensor networks, antenna arrays, signal processing.