

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Électroniques des systèmes embarqués

présenté par

Mlle. ANANE Kaouthar

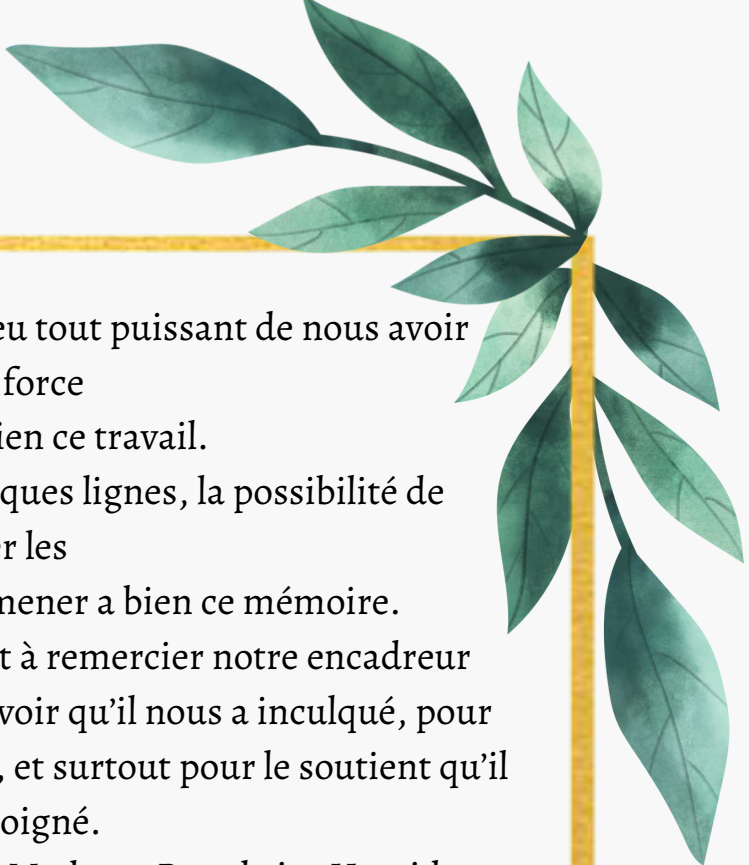
&

Mlle. BOUHAFS Fella

Contribution à la réalisation d'un système de localisation indoor d'un UAV basé sur l'UWB

Proposé par : Mr.Benrezki Rabie Riadh & Mme. Boughrira Hamida

Année Universitaire 2020-2021



Avant tout, nous remercions le dieu tout puissant de nous avoir
donner la force
afin de mener à bien ce travail.

Il nous est offert ici, par ces quelques lignes, la possibilité de
remercier les
personnes qui ont contribué mener a bien ce mémoire.

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre encadreur
Dr.Rabie Riadh Benrezki pour le savoir qu'il nous a inculqué, pour
les précieux conseils et orientations, et surtout pour le soutien qu'il
nous a témoigné.

Nous exprimons notre gratitude à Madame Boughrira Hamida,
notre
enseignante et co-promotrice, pour sa recommandation auprès du
CDTA et les conseils qu'elle nous a prodigués.

Nous remercions également toute l'équipe technique du centre de
développement et des technologies avancées CDTA qui nous ont
aidés lors de notre stage citons, Mr.Brahim chef de projet pour ses
précieuses
informations et ses connaissances du terrain.

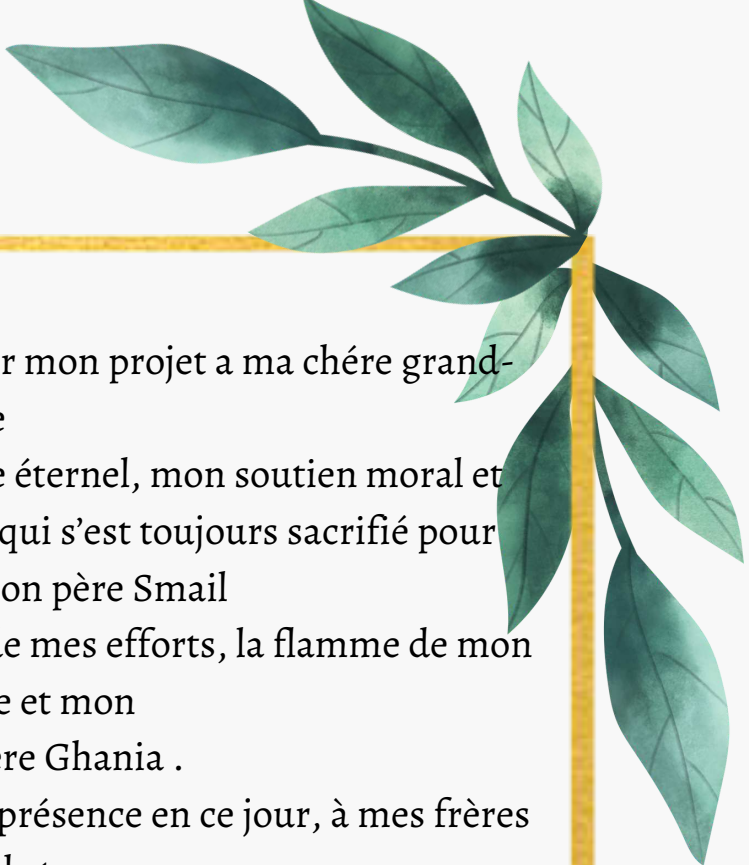
Nous tenons également à remercier ceux qui ont accepté d'évaluer ce
travail et

de contribuer à l'améliorer par leurs commentaires constructifs.

Et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à
l'aboutissement de ce travail

Nous vous exprimons notre gratitude et notre profond respect, pour
tous cela on vous dit « Merci ».

Nous remercions aussi nos familles et amis (e), qui nous ont
aidé,soutenue durant tout le cursus .



En premier lieu je souhaiterais dédier mon projet a ma chère grand-
mère

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et
source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour
me voir réussir, mon père Smail

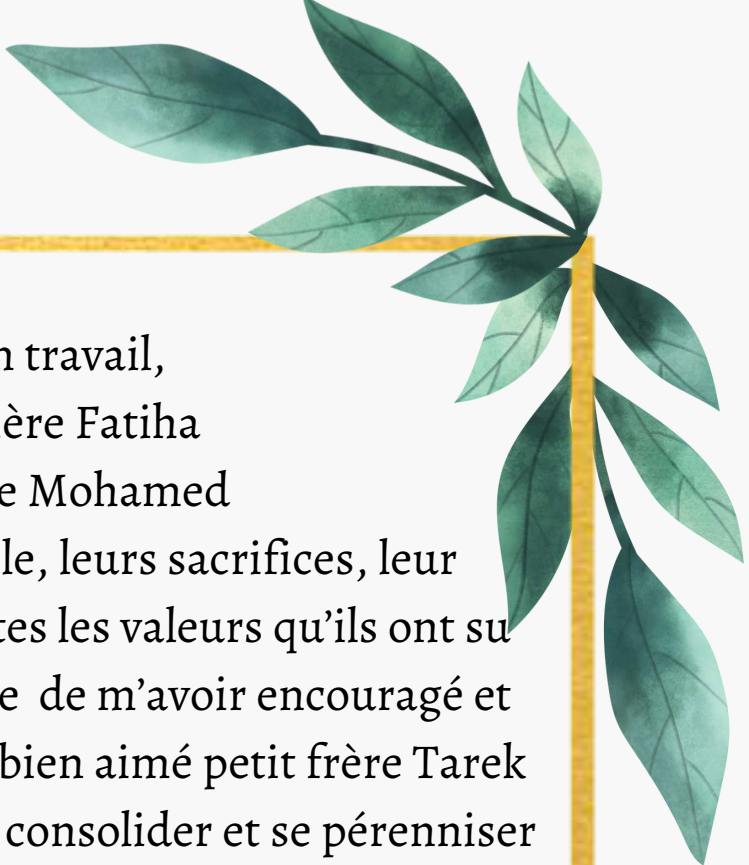
A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon
coeur, ma vie et mon
bonheur ma mère Ghania .

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence en ce jour, à mes frères
Tarek et Bilel et mes
soeurs Wassila et Wissem et à ma belle-soeur Chourouk, mes neveux
Islam, Youcef, Anes et ma
chère nièce Maria.

Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu
pour leurs conseils, aides, et
encouragements.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient
toujours à mes côtés, et qui
m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures, mes
aimables amis, et collègues
d'étude, Nacera, Rahil, Mounia, Sarah, Maria, Meriem, Johnny et
Redha

Bouhafs Fella



Je dédie mon travail,
A ma Chère Mère Fatiha
A mon cher Père Mohamed

Pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer. A ma sœur Sirine de m'avoir encouragé et éclairer mon chemin et à mon bien aimé petit frère Tarek
Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.

Un grand merci à notre promoteur Dr.Benrezki Rabie Riadh pour sa patience et son professionnalisme.

A ma famille, mes tantes qui ont tant prié pour moi, à mon oncle Houcine qui était une source d'inspiration et un exemple pour moi sans oublier mon très cher oncle Chafik.

Aux cousins et cousines: Malek, Rania, wassim, Khaled, Amir, Narimene .

A mes précieux amis Ihcen, Hamida, johnny et Redha, Nacera, Rahil, et Housseem.

Remercions dieux pour les gens qui nous ont entourés, pour les mains qu'ils nous ont tendues.

ANANE Kaouthar

ملخص:

تستمر شعبية الطائرات بدون طيار للإقلاع والهبوط العمودي (VTOL) الرباعية الحركة في النمو، وكذلك الحاجة إلى تقدير الموقف والتحكم فيه بشكل موثوق. بالإضافة إلى ذلك، نظرًا لتقلص حجم هذه الكوادر وتورثات وأصبح الاستخدام الداخلي ممكنًا، فإن الحاجة إلى طرق تقدير الموقع الداخلي، عندما تكون قياسات نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) غير ممكنة، تعد موضوعًا إضافيًا. والأهم من ذلك، تم اقتراح العديد من الحلول. في هذه الوثيقة، يتم تنفيذ طريقة قياس المسافة باستخدام طريقة النطاق العريض للغاية (UWB) لإنتاج تقديرات موثوقة للموقع والسرعة. يمكن حساب هذا الموقف بطرق مختلفة، فنحن نركز على الموقع بناءً على وقت الرحلة (ToF). نحن ندرس الأداء من حيث دقة التوطين لبروتوكولنا المقترح، Two Way Ranging. نحدد النموذج الرياضي الذي يجعل من الممكن التنبؤ بسلوك الخطأ واشتقاق أداة تصحيح ديناميكي. يستخدم نظام التعريب المدروس خوارزمية تعتمد على مرشح Kalman. تمت دراسة الخوارزمية باستخدام المحاكاة والتجارب.

كلمات المفاتيح: النطاق العريض للغاية (UWB) ; مرشح Kalman ; وقت الرحلة (ToF) ; اتجاهين المدى . (TWR)

Résumé :

La popularité des drones quadri rotors à décollage et atterrissage verticaux (VTOL) ne cesse de croître, tout comme le besoin d'une estimation et d'un contrôle fiables de la position. De plus, la taille de ces quadri rotors diminuant et l'utilisation en intérieur devenant possible, le besoin de méthodes d'estimation de la position en intérieur, lorsque les mesures du système de positionnement global (GPS) sont impossibles, est un sujet de plus en plus important pour lequel de nombreuses solutions ont été proposées. Dans ce document, une méthode de mesures de distance en utilisant la méthode de bande ultra large (UWB) est mise en œuvre pour produire des estimations fiables de la position et de la vitesse. Cette position peut être calculée de différentes manières, nous nous concentrons sur la localisation basée sur le temps de vol (ToF). Nous étudions les performances en termes de précision de localisation de notre protocole proposé, le Two Way Ranging. Nous définissons le modèle mathématique qui permet de prédire le comportement d'erreur et de dériver un outil de correction dynamique. Le système de localisation considéré utilise un algorithme basé sur le filtre de Kalman. L'algorithme a été étudié à l'aide de simulations et d'expériences.

Mots clés : bande ultra large (UWB), filtre de Kalman, Two Way Ranging (TWR).

Abstract:

The popularity of vertical take-off and landing (VTOL) quadrotor drones continues to grow, as does the need for reliable position estimation and control. In addition, as the size of these quadrotors shrinks and indoor use becomes possible, the need for indoor position estimation methods, when Global Positioning System (GPS) measurements are not possible, is an additional topic. More importantly for which many solutions have been proposed. In this document, a method using ultra-wideband (UWB) distance measurements is implemented to produce reliable estimates of position and speed. This position can be calculated in different ways; we focus on the location based on time of flight (ToF). We are studying the performance in terms of localization accuracy of our proposed protocol, Two Way Ranging. We define the mathematical model which makes it possible to predict the error behavior and to derive a dynamic correction tool. The localization system considered uses an algorithm based on the Kalman filter. The algorithm has been studied using simulations and experiments.

Keywords: ultra-wideband (UWB), Kalman filter, Two Way Ranging (TWR).

Listes des acronymes et abréviations

AOA: Angle of Arrival

AON: Always-On

BLE: Bluetooth Low Energy

BS: Station de Base

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

DOD: Department of Defense

DOP: Dilution of Precision

FCC : La Commission Fédérale des Communications

GPS: Global Positioning System

GDOP: Geometric Dilution of Precision

GNSS: Global Navigation Satellite System

HDOP: Horizontal Dilution of Precision

IR: Infra Rouge

IP: Internet Protocol

I2C: Inter Integrated Circuit Bus

IPS: Indoor Positioning System

IDE: Environnement de Développement Intégré

IPM: Interior Point Method

IMU: unité de mesure inertielle

LLS: Linear Least Squares

LOS: Line of Sight

LAN: Local Area Network

LED: Light-Emitting Diode

LSB: Bit de poids faible

LBR: Largeur de Bande Relative

MS: Station Mobile

MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

MAC: Media Access Control

MSB: bit de poids fort

NLOS: Non Line of Sight

NB: Narrowband

PCB: Printed Circuit Board

PSD: Power Spectral Density

PDOP: Position Dilution of Precision

QR: Quick Response

RSS: Received Signal Strength

RF: Radio-Fréquence

RSSI: Received Signal Strength Indication

RTLS: Real-time locating systems

SDS-TWR: Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging

SIG: Systèmes d'Information Géographique

SPI: Serial Peripheral Interface

TOA: Time of Arrival

TDOA: Time Difference of Arrival

TWR: Two-way Ranging

TOF: Time of Flight

TDOP: Time Dilution of Precision

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

UART: Universal Asynchronous Receiver / Transmitter

USB: Universal Serial Bus

UWB: Ultra-Wideband

VO: Visual Odometry

VDOP: Vertical Dilution of Precision

WEP: Wired Equivalent Privacy

WPA: Wi-Fi Protected Access

WPAN: Wireless Personal Area Network

WB: Wide band

μc : Microcontrôleur

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 Systèmes de positionnement et préliminaires

1.1. Introduction.....	5
1.2. Les systèmes de localisation	5
1.2.1. Relèvement des mesures en utilisant des caméras	5
1.2.2. Le system de positionnement global (GPS)	7
1.2.2.1. Le principe de fonctionnement du GPS	8
1.2.2.1.1. La trilatération	9
1.2.3. La WI-FI	10
1.2.3.1. Mesure de distance avec wi-fi	11
1.2.3.1.1. La trilatération wi-fi	11
1.2.4. La technologie Bluetooth	12
1.2.4.1. Méthode de positionnement pour Bluetooth	13
1.2.4.1.1. Indicateur de force du signal reçu (RSSI).....	13
1.2.4.1.2. La triangulation	13
1.2.4.1.3. Localisation des empreintes digitales	13
1.2.5. La technologie UWB (Ultra-Wide Band)	14
1.3. Comparaison des systèmes de positionnement	15
1.3.1. La différence entre l'UWB et les autres technologies	18
1.3.1.1. UWB contre Wi-Fi	18
1.3.1.2. UWB contre le BLUETOOTH	19
1.3.1.3. UWB contre GPS	20
1.4. Estimation d'attitude	20
1.4.1. Repaire des coordonnées	21
1.4.2. Vitesse angulaire	22
1.4.3. Orientation de paramétrage	23

1.4.3.1.	Matrice de cosinus de direction (matrice de rotation)	23
1.4.3.2.	Angles d'Euler	24
1.4.3.3.	Représentation des quaternions unitaires	25
1.5.	Conclusion	28
Chapitre 2 Estimation de la position et de la vitesse linéaire en utilisant l'UWB et filtre Kalman		
2.1.	Introduction	30
2.2.	Introduction à la technologie ultra-large bande	30
2.2.1.	Caractéristiques générales de la technologie UWB	31
2.2.1.1.	Densités d'utilisation potentielle	32
2.2.1.2.	Haute précision & haute résolution	32
2.2.1.3.	Haut débit de données	32
2.2.1.4.	Capacités d'imagerie et de localisation	33
2.2.1.5.	Systèmes de communication	33
2.2.2.	Le signal UWB	33
2.3.	Les techniques de localisation	34
2.3.1.	Mesure du temps de vol (ToF) et temps d'arrivée (ToA)	35
2.3.1.1.	Formule de calcul ToF	36
2.3.2.	La télémétrie bidirectionnelle TWR	38
2.3.2.1.	Processus de communication TWR	38
2.3.2.2.	Le protocole SDS-TWR (Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging).....	39
2.3.3.	Décalage horaire d'arrivée TDoA	41
2.3.3.1.	Processus de communication TDoA	41
2.3.4.	Angle d'arrivée AOA	43
2.4.	Synthèse des techniques de localisation	45
2.4.1.	Implémentation de la technique TWR avec le DW1000	47
2.5.	Algorithme de positionnement statique	47
2.6.	Positionnement optimal de l'ancrage	49
2.7.	Filtrage de Kalman pour les estimations de position et de vitesse	55
2.7.1.	Introduction.	55
2.7.2.	Algorithme du filtre de Kalman	56
2.7.2.1.	Implémentation des résultats du filtre Kalman	58

2.7.2.1.1. Objectifs et simulations	58
2.8. Conclusion	63

Chapitre 3 Résultats pratiques et montages d'expériences

3.1. Introduction.....	65
3.2. Dispositif expérimental	67
3.2.1. Mise en œuvre matérielle	68
3.2.1.1. Aperçu de l'Anchor.....	68
3.2.1.2. Aperçu du Tag	69
3.2.1.3. Module DW1000	69
3.2.1.4. Carte d'adaptation	73
3.2.1.4.1. Assemblage des pièces	76
3.2.1.5. Arduino Pro mini	79
3.2.1.6. IMU.....	82
3.2.1.6.1. Gyroscope.....	83
3.2.1.6.2. Accéléromètre	83
3.3. Description du système de localisation réalisé	86
3.4. Mise en œuvre logiciel	88
3.4.1. Arduino (IDE)	88
3.4.2. Visual Code Studio.....	88
3.4.3. MATLAB	88
3.5. Procédure d'acquisition.....	88
3.6. Résultats et discussion	90
3.7. Conclusion	93
Conclusion générale	94
Bibliographie.....	98

Liste des figures

Figure 1.1: localisation indoor avec une camera mobile (a gauche) ou avec des cameras statiques (a droite).	6
Figure 1.2 : modele theorique de la trilateration : la position du nœud inconnu correspond a l'intersection des trois cercles formes par les positions et distances aux nœuds de reference.	9
Figure 1.3 : zone de localisation interieure fournie par l'approche de trilateration	12
Figure 1.4 : illustration du principe de la triangulation [26]	14
Figure 1.5 : spectre uwb [34]	19
Figure 1.6 : Les différents systèmes de positionnement.....	23
 Figure 1.7 : une illustration de trois des reperes de coordonnees : le repere- n a un certain endroit sur la terre, le repere e-tournant avec la terre et le repere-i.....	22
Figure 1.8: definition des angles d'euler tels qu'utilises dans ce travail avec la gauche : rotation ψ autour de l'axe- z, milieu : rotation θ autour de l'axe-y et a droite : rotation ϕ autour de l'axe-x [39].	25
Figure1.9: representation des quaternions unitaires	26
Figure 2.1 : processus de communication tof [58]	36
Figure 2.2 : protocole de communication tof [60]	37
Figure 2.3 : protocole (ss-twr) en effectuant la mesure du tof entre deux nœuds [52] ..	38
Figure 2.4 : session protocolaire de ranging en sds-twr [63].....	40
Figure 2.5 : protocole de communication tdoa [59]	42
Figure 2.6 : localisation par angulation : cas ideal [68].	44
Figure 2.7 : processus d'angle d'arrivee aoa [69].....	44
Figure 2.8: illustration de la position en 3D en utilisant 4 anchors.....	50
 Figure 2.9: dilution geometrique de precision [77].....	52
Figure 2.10 : processus permettant de calculer le gdop [79]	53
Figure 2.11 : position reel du drone et positionnement des anchors	59
Figure 2.12 : position reel et position mesuree	60

Figure 2.13 : resultat de simulation du filtre kalman	61
Figure 2.14 : résultat de simulation de l'erreur de position mesurée (implémentation du filtre Kalman)	62
Figure 2.15 : l'erreur de la vitesse estimee vs mesuree.....	62
Figure 3.1 : estimation de la position du drone.....	67
Figure 3.2 : aperçu du systeme materiel d'un anchor	68
Figure 3.3 : aperçu du systeme materiel du tag	69
Figure 3.4 : schema fonctionnel de haut niveau	70
Figure 3.5 : diagramme du module dw1000 et arduino pro mini	72
Figure 3.6 : zones d'exclusion de la carte d'application dwm1000	73
Figure 3.7 : diagrammes de rayonnement de l'antenne mesures [93]	74
Figure 3.8 : disposition du circuit imprime (haut et bas)	74
Figure 3.9 : schema electrique du circuit pcb arduino et dwm1000	76
Figure 3.10 : le materiel utilise pour la realisation du pcb board au laboratoire du cdta	77
Figure 3.11 : vue du pcb depuis le stereo-microscope	78
Figure 3.12 : carte d'adaptation construite et arduino pro mini.....	81
Figure 3.13 : module mpu6050 et brochage mpu6050.....	86
Figure 3.14 : le prototype compose de 4 anchors et d'un tag.....	87
Figure 3.15 : donnees collectees au point a	90
Figure 3.16 : distance mesuree vs desiree	91
Figure 3.17 : position estimer vs desire de l'octogone en appliquant l'algorithme statique	92

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : comparaison des principales technologies de positionnement indoor.	17
Tableau 2.1 : recapitulatif des techniques de localisation [70].....	46
Tableau 2.2 : les principales differences entre tdoa et twr [71].....	47
Tableau 2.3 : résumé de l'algorithme du filtre kalman.....	57
Tableau 3.1 : description des broches du dwm1000 utilisees et de la connexion correspondante a l'arduino pro mini	71
Tableau 3.2 : specifications arduino pro mini [95].....	80
Tableau 3.3 : description des broches ftdi et des broches utilisees pour la connexion avec arduino pro mini.....	82
Tableau 3.4: description des broches mpu6050 et leurs connexion avec arduino [100] [101].	85

Introduction générale

Introduction générale

La localisation est un sujet crucial dans la robotique. Elle consiste en une virtualisation de la Position physique d'un objet. Un système de localisation implique sur une infrastructure contient un ensemble des capteurs permettant d'obtenir les informations nécessaires qui seront par la suite transmises à une partie intelligente permettant de traiter les données et d'extraire l'information nécessaire pour déterminer la position [1]. Dans le domaine d'estimation de la position le système de positionnement global (GPS) [2] est le plus efficace et le plus utilisé. En termes de couverture et de coût, aucune autre technologie ne peut lui faire concurrence. Ceci étant dit, Le GPS est loin d'être un système de positionnement sans faille. En dehors de l'incapacité largement connue du GPS dans les environnements intérieurs (indoor), il existe des cas de défaillances du GPS même dans des environnements extérieurs. Bien que le GPS fonctionne très bien dans les zones peu fréquentées, il pose de nombreuses difficultés d'utilisation dans les zones métropolitaines où les grands bâtiments bloquent les lignes de visée des transmissions de signaux des satellites (NLOS) (Non Line Sight en anglais), ces difficultés rendent très complexe l'estimation exacte de certains paramètres de position d'où le problème de précision de la majorité des systèmes de localisation. Dans une expérience menée à Sydney, seuls 30 % des points de test ont reçu des signaux d'un nombre suffisant de satellites (c'est-à-dire trois) pour calculer la position [3]. Le WiFi, le Bluetooth, l'identification par radiofréquence (RFID) et le positionnement par caméra ont été développés pour compléter le GPS, nous assistons depuis lors à l'émergence d'applications intelligentes (High Definition Systems Awareness : HDSA) ayant la capacité de fonctionner dans des environnements où la propagation GPS ne parvient pas en général [4], mais à des coûts plus élevés. Pourquoi ne pas s'inspirer du GPS pour proposer un système de localisation endogène pour les applications indoor moins coûteux? Ces dernières années, un nouveau type de technique a vu le jour et est devenu un domaine de recherche très fructueux en matière de positionnement, l'Ultra Large Bande (ULB) dit Ultra Wide Band (UWB) en anglais, qui a séduit l'ensemble des

chercheurs et des industriels parce qu'elle rendait théoriquement possible des communications à très haut débit, tout en favorisant des transmissions à des puissances très réduites et une haute précision en localisation. Le principe des communications UWB repose sur l'émission de signaux à faible puissance et de spectres extrêmement larges. Les signaux UWB ont une faible probabilité de détection et d'interception. Ces atouts et ces avantages qui ont suscité un intérêt pour la technologie UWB, en ont fait une candidate naturelle pour la couche physique des systèmes de localisation. Dans ce mémoire nous nous concentrons sur les systèmes de positionnement UWB, dans le but d'estimer la position d'un ou plusieurs dispositifs, généralement appelés Tag, qui se déplacent dans un environnement par l'usage d'un ensemble de dispositifs appelés Anchor qui ont été préalablement placés. Les systèmes UWB mesurent généralement la distance entre le Tag et chacun des Anchors (par exemple, quatre pour l'estimation de la pose 3D) et les combinent pour obtenir une estimation de la position.

Ce mémoire est organisé en 3 chapitres :

Le premier chapitre : est consacré à quelques généralités relatives au système de positionnement indoor et outdoor et mesure de distance.

Le deuxième chapitre : les techniques utilisées dans la localisation et introduit les algorithmes d'estimation de la position statique et dynamiques

Le troisième chapitre : est réservé à la partie pratique. Ce dernier Expose les résultats de simulation

Une conclusion générale pour l'évaluation des solutions adoptées, les problèmes rencontrés et les connaissances recueillies à ce stade d'avancement, clôture le mémoire.

Systèmes de positionnement et préliminaires

Chapitre 1 Systèmes de positionnement et préliminaires

1.1. Introduction :

L'intérêt pour la localisation en intérieur n'a cessé de croître ces dernières années. Différentes entreprises ont cherché à résoudre ce problème de la localisation (López Escobés, 2009). La géolocalisation d'un bien ou d'une personne fait aujourd'hui partie de notre quotidien [5]. Elle permet de guider des usagers à trouver rapidement certains services de proximité, assurer la surveillance, etc. La technologie GPS a rendu le positionnement extérieur très réussi et elle est maintenant appliquée dans une grande variété de produits. En raison de l'atténuation du signal causée par les matériaux de construction des bâtiments, les systèmes de positionnement intérieur ne peuvent pas compter sur cette technologie [6] et, par conséquent, n'ont pas eu le même succès. Plusieurs systèmes de positionnement intérieur ont été développés au cours de la dernière décennie, s'appuyant sur une grande variété de technologies, dont WI-FI, Bluetooth, l'UWB. Cette section présente les différents systèmes de positionnement intérieur et les méthodes de localisation telles que la trilatération, triangulation pour l'estimation de la position. Ce chapitre décrit la technologie UWB plus en détail et explique comment elle peut être utilisée dans un système de positionnement intérieur.

1.2. Les systèmes de localisation :

Il existe divers classifications de systèmes de géolocalisation selon les critères de l'environnement d'utilisation, l'infrastructure, l'information fournie, les techniques et les algorithmes utilisés.

1.2.1. Relèvement des mesures en utilisant des caméras :

L'estimation précise de la position est l'un des principaux problèmes de la robotique mobile. 54% des travaux de drones intérieurs utilisent une caméra optique, généralement accompagné d'une autre technologie comme l'ultrasonique [7]. De nombreux drones sont équipés de caméras, de sorte que le mouvement des images peut être utilisé à des fins de positionnement et de cartographie. Certains travaux utilisent l'odométrie visuelle (VO), tandis que d'autres préfèrent la localisation et la cartographie simultanées (SLAM) [8] [9] définit VO comme le processus d'estimation de l'egomotion d'un agent (UAV dans ce cas) en utilisant uniquement l'entrée d'une ou plusieurs caméras connectées à elle ; et SLAM comme processus dans lequel l'agent se localise dans un environnement inconnu pendant que la caméra se déplace et construit une carte en même temps avec toute information préalable. La plupart des systèmes de navigation utilisent des caméras portées par le sujet, qui représentent l'entité mobile (par exemple, une personne, un robot). L'autre type de solutions utilise une infrastructure de caméras statiques localisées à des endroits connus dans tout le bâtiment pour suivre le sujet, comme indiqué dans la partie droite de la figure (1.1). Les systèmes de localisation basée sur la vision utilisent des caméras 2D ou 3D (par exemple, des caméras stéréo, de profondeur, RVB-D) et effectuent la localisation en identifiant des marqueurs artificiels (tels que des codes de réponse rapide (QR) et des marqueurs de repère comme AprilTags, ARTags et CALTags [4] ou des objets qui font partie de l'environnement. Dans de nombreux cas, les caméras sont utilisées en combinaison avec d'autres capteurs tels que WiFi ou les capteurs inertiels [10].

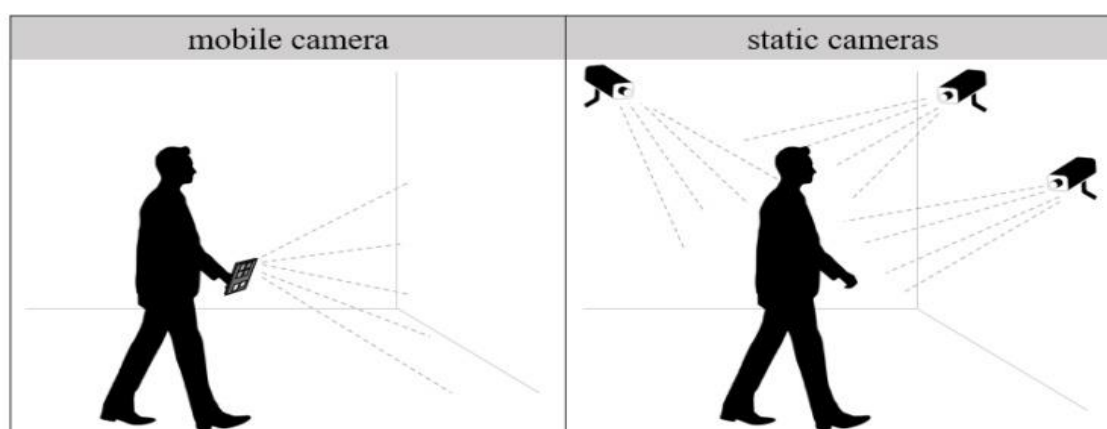


Figure 1.1: Localisation indoor avec une caméra mobile (à gauche) ou avec des caméras statiques (à droite).

L'approche populaire de l'estimation de la position est l'utilisation de marqueurs artificiels, qui sont adaptés pour une détection fiable et une localisation précise. Elle est basée sur la surveillance d'un espace de mesure défini à l'aide de deux ou plusieurs appareils photo [11].

Chaque caméra est équipée d'un filtre passe-infrarouge (IR) devant l'objectif et d'un anneau de LED IR autour de l'objectif pour éclairer temporairement l'espace de mesure avec une lumière IR. Cette lumière n'est pas visible à l'œil humain et son intensité est totalement sans danger pour les êtres humains. Les objets qui doivent être suivis sont équipés de marqueurs, qui renvoient la lumière infrarouge entrante aux caméras. Les réflexions IR sont détectées par les caméras puis transformées en interne par le système de suivi optique. Ce système calcule la position du marqueur 2D dans les coordonnées de l'image avec une grande précision. En utilisant plusieurs caméras, la position 3D de chaque marqueur peut être dérivée. La position 3D peut être mesurée en utilisant un seul marqueur dans l'espace de mesure. Pour pouvoir également mesurer l'orientation d'un objet ou suivre plusieurs objets simultanément, plusieurs marqueurs sont placés sur chaque objet. Une telle configuration est facilement créée en collant simplement des marqueurs au hasard sur l'objet, en s'assurant que plusieurs marqueurs peuvent être vus sous chaque angle.

La localisation basée sur des marqueurs de référence peut également être effectuée en analysant les images RVB-D avec des méthodes de traitement d'images traditionnelles. Certaines solutions atteignent une précision centimétrique lors du calcul de la distance entre la caméra et le marqueur artificiel. Ces solutions sont très pratiques, car les caméras 3D offrent déjà une carte de profondeur de l'environnement, permettant un calcul plus rapide et moins complexe de la position dans un système de coordonnées 3D.

1.2.2. Le system de positionnement global (GPS) :

Le Global Positioning System (GPS) (Système de positionnement global) est un système de radionavigation par satellites mis en place par la Défense américaine en vue d'applications de positionnement militaire et, en second lieu, mis à la disposition de la communauté civile. La navigation, l'arpentage et les systèmes d'information

géographique (SIG) ne sont que quelques-uns des domaines dans lesquels la technologie du GPS a été appliquée avec succès [12]. La technologie GPS a rendu le positionnement extérieur très réussi et elle est maintenant appliquée dans une grande variété de produits [13].

Le système GPS est un système complet plutôt qu'un algorithme de localisation. Mais puisqu'il est le noyau de plusieurs autres systèmes reposant sur lui, il est considéré comme l'une des techniques les plus importantes de localisation [14]. Si on veut simplifier, on peut dire que pour connaître la position d'un point sur la surface de la Terre, il suffit de connaître la distance entre ce point et trois satellites. Connaître la distance à un satellite signifie qu'on se trouve sur une sphère centrée sur ce satellite. Connaître la distance à deux satellites signifie qu'on se trouve sur l'intersection de deux sphères, chacune centrée sur un des satellites. Cette intersection est un cercle. Connaître la distance à trois satellites signifie qu'on se retrouve sur l'intersection de trois sphères, chacune centrée sur un des satellites. Cette intersection contient exactement deux points, un seul des deux étant sur la surface de la Terre, l'autre est de l'autre côté du plan des trois satellites, loin dans l'espace [15].

1.2.2.1. Le principe de fonctionnement du GPS :

Le système GPS utilise 4 satellites, pour la longitude, la latitude, l'altitude et enfin le dernier pour la synchronisation temporelle, le positionnement est basé sur la métrique TOA et les algorithmes de positionnement circulaire (trilatération). Les mesures des TOA de chaque satellite définissent les distances qui séparent entre l'utilisateur et les satellites. Toute distance représente une sphère, ainsi que le satellite est son centre. L'équation qui définit chaque sphère produite par la mesure de la distance cible/satellite est présenté par :

$$D = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} + c \cdot \Delta t \quad (1.1)$$

Cette équation contient quatre inconnues : les trois coordonnées X , Y et Z de la position de l'observateur, ainsi que l'erreur de synchronisation globale Δt . La position finale est déterminée par la résolution des quatre équations :

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} + c \cdot \Delta t \\ d_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} + c \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$d_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} + c \cdot \Delta t$$

$$d_4 = \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} + c \cdot \Delta t$$

Avec x , y , et z représentent les coordonnées inconnues du récepteur, tandis que x_i , y_i , et z_i sont les coordonnées connues des satellites [16].

1.2.2.1.1. La trilatération :

La trilatération est une méthode de calcul qui s'apparente à la triangulation pour le calcul de positions. Au lieu de s'appuyer sur des mesures d'angles, la trilatération repose sur des mesures de distances [17]. Cette dernière utilise la géométrie du cercle ou de sphère comme processus pour calculer la position d'un terminal. Cette méthode calcul la position d'un nœud par l'intersection de trois cercles, comme illustré à la figure 1.2 [18].

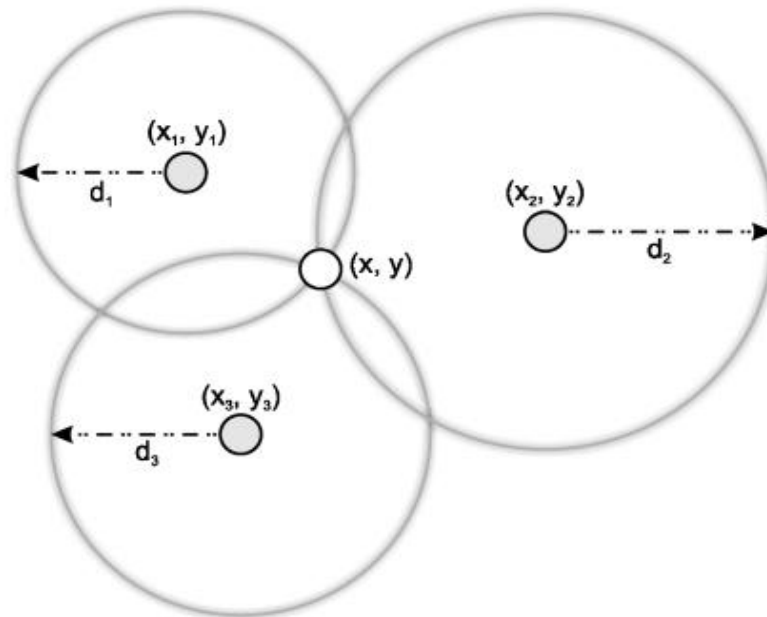


Figure 1.2 : Modèle théorique de la trilatération

La position du nœud inconnu correspond à l'intersection des trois cercles formés par les positions et distances aux nœuds de référence.

Le centre du cercle ou de la sphère est la position du repère soit une SB, satellite ou une antenne spécifique, et le rayon est égal à la distance qui la sépare de la cible. La dimension du rayon est calculée à partir du délai d'arrivée ou la perte d'énergie des signaux échangés avec la cible (X, Y, Z).

Dans le cas d'un repère 3D l'équation de la sphère dont D est la distance obtenue de TOA ou du RSS, (x_s, y_s, z_s) les coordonnées de la station de base ou du satellite est donnée par :

$$T_{\text{TOA}} * C = d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ d_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\ d_3 &= \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \\ d_4 &= \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} \end{aligned} \quad (1.4)$$

.....

Dans des conditions idéales, les trois cercles correspondants aux équations (1.4) se croisent en un seul point indiquant la position estimée de la cible dans un repère 3D, ce point est calculé par la résolution du système d'équation (1.4).

La résolution du système d'équations peut être résolu par plusieurs méthodes, dont la méthode des moindres carrées que nous allons développer dans le chapitre suivant.

1.2.3. La WI-FI :

La Wi-Fi (Wireless Fidelity) est une technologie qui permet d'interconnecter un ensemble d'équipements sans fil régi par l'ensemble de normes 802.11 de l'IEEE. Grâce au Wi-Fi, nous sommes capables de créer des réseaux locaux (WLAN) à hauts débits qui interconnectent des ordinateurs de bureaux, des équipements sans fil, etc. Le système Wi-Fi offre une plateforme sécuritaire munie de techniques de cryptage telles que les clés WEP et WPA. Seuls les équipements autorisés peuvent accéder et échanger des données avec les réseaux d'équipement Wi-Fi [19].

Cette technologie offre des débits très intéressants pour un LAN sans fil, allant de 11 Mbits/s pour la norme 802.11b et 54 Mbits/s pour la 802.11a et 802.11g pour atteindre un maximum théorique de 600 Mbits/s pour la norme 802.11n. La couverture en milieu fermé est d'une dizaine de mètres (20-50 mètres) et de centaines de mètres en endroits ouverts. Avec l'utilisation d'antennes directionnelles dans un espace ouvert, nous pouvons atteindre plusieurs centaines de mètres de couverture (Wi-Fi.org, 2010).

1.2.3.1. Mesure de distance avec wi-fi :

La méthode de localisation basée sur la technique de trilatération de la force du signal Wi-Fi est prise en compte. Elle est simple dans sa réalisation et son estimation et la localisation de la position d'un appareil mobile.

1.2.3.1.1. La trilatération wi-fi :

La méthode de trilatération utilise les paramètres des réseaux Wi-Fi connus, tels que la fréquence du signal Wi-Fi, sa force de signal, l'adresse MAC du réseau et les coordonnées réelles des points d'accès Wi-Fi, le signal reçu par l'intensité du signal du dispositif mobile peut être utilisé pour l'estimation de la distance entre le point d'accès et le dispositif mobile, en utilisant cette méthode, on considère qu'il y a trois points d'accès ou plus la force du signal de ces points décroissent de façon exponentielle tout dépend de la distance entre l'émetteur, le récepteur et du facteur de bruit aléatoire, cette dépendance peut être considérée comme une fonction de la distance. La distance estimée par la force du signal est présentée sous la forme d'un cercle avec un rayon autour du point d'accès, l'intersection de trois rayons de points d'accès fournit un point ou une zone du récepteur. Ce modèle peut être représenté par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2$$

D'où $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ sont les coordonnées des points d'accès et d_1, d_2, d_3 les distances estimées. La solution de cette équation donne les points d'intersection des cercles figure (1.3).

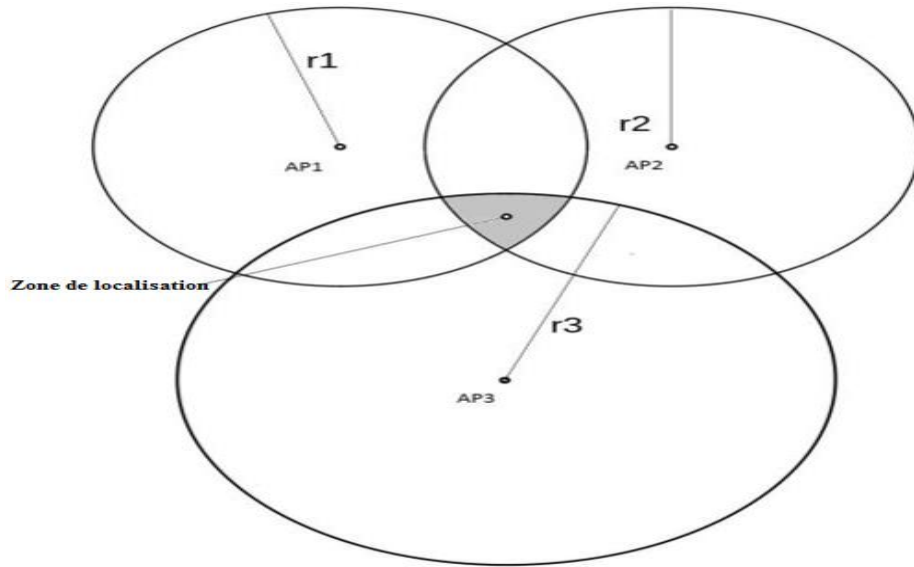


Figure 1.3 : Zone de localisation intérieure fournie par l'approche de trilatération

L'inconvénient de la localisation par Wifi c'est qu'elle dépend d'une infrastructure relativement coûteuse dans l'endroit où on veut assurer le suivi d'une personne [20].

1.2.4. La technologie Bluetooth :

Le Bluetooth ou standard IEEE 802.15, est un protocole de communication à courte portée de données. Il utilise une technique radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. La position d'un appareil mobile à l'aide de cette technologie est considérée comme le même que la cellule individuelle qu'il est en communication avec. L'inconvénient majeur d'un tel système de localisation c'est que sa précision est 22cm avec 12 cas inférieurs à 10cm de la position réelle [21]. Il existe au total six versions de normes Bluetooth développées : v1.1/1.2/2.0/2.1/3.0/4.0 [22]. C'est une technologie non protégée gérant les connexions sans fil de type onde radio utilisant Ce système radio à courte distance permet à la fois les échanges voix et données. En effet, un appareil Bluetooth peut fonctionner en mode commutation de paquets IP (sous forme de données avec un débit montant de 57,6 kbit/s et en descendant de 721kbit/s : connexion asynchrone) ou commutation de

circuit (sous forme de voix avec un débit de 64 kbit/s : connexion synchrone) et même les deux simultanément la bande des 2,45 GHz, d'un débit de 1 Mbps, d'une portée de 10 m et offrant un balayage de 360°, tout en s'affranchissant des obstacles les plus courants. La bande de fréquence utilisée par Bluetooth est identique à celle du WI-FI (ou 802.11b) soit 2,4Ghz et utilise 79 fréquences différentes. Le Bluetooth permet d'atteindre 1600 échanges par seconde soit un débit d'environ 1 Mbit par seconde mais avec une portée faible de plusieurs mètres seulement. Cependant, les dernières versions peuvent aller jusqu'à 100 m [23].

1.2.4.1. Méthode de positionnement pour Bluetooth :

1.2.4.1.1. Indicateur de force du signal reçu (RSSI) :

Généralement, le RSSI est une mesure de la force d'un signal radio entrant. C'est un indicateur relatif et ses unités sont arbitraires, mais plus la valeur du RSSI est élevée, plus le signal est fort. En Bluetooth, le RSSI est utilisé pour indiquer si le signal reçu se situe dans la plage de puissance du récepteur Golden (GRPR), qui est le nom utilisé pour décrire la plage idéale de puissance du signal entrant.

Le RSSI d'un appareil Bluetooth est obtenu en lançant la procédure d'interrogation à partir d'un deuxième appareil. Le RSSI sera alors inclus dans la réponse des premiers appareils à la demande, ce qui signifie qu'il n'est pas nécessaire que deux appareils soient réellement connectés ou même appariés [24]. Il existe principalement deux techniques utilisées aujourd'hui dans le positionnement intérieur Bluetooth : la triangulation et la prise d'empreintes digitales.

1.2.4.1.2. La triangulation :

Le principe de la triangulation existe depuis longtemps, et de nombreuses méthodes ont été proposées jusqu'à présent telles que la triangulation géométrique, l'intersection du cercle géométrique, les méthodes itératives (Recherche itérative, Newton-Raphson, etc.), et triangulation de plusieurs balises.

Le principe de cette technique est basé sur le théorème de Thalès employé en géométrie et en trigonométrie, pour mesurer la distance d'une cible en mesurant les angles qu'elle forme avec deux points de référence avec des positions connues [25].

La méthode de triangulation est employée lorsque l'angle d'arrivée entre deux nœuds peut être mesuré. Cela est rendu possible par l'utilisation de la technique AOA que nous allons la décrire dans le chapitre suivant, Dans la figure 1.4, nous voulons calculer la distance entre B et C. B est un point de référence et A connaît les angles d'arrivées respectivement de B et C. La distance $\overline{BC}$ (d_3) peut ainsi être calculée en appliquant la formule trigonométrique [26]:

$$d_3^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2 \times d_1 \times d_2 \times \cos (BAC) \quad (1.6)$$

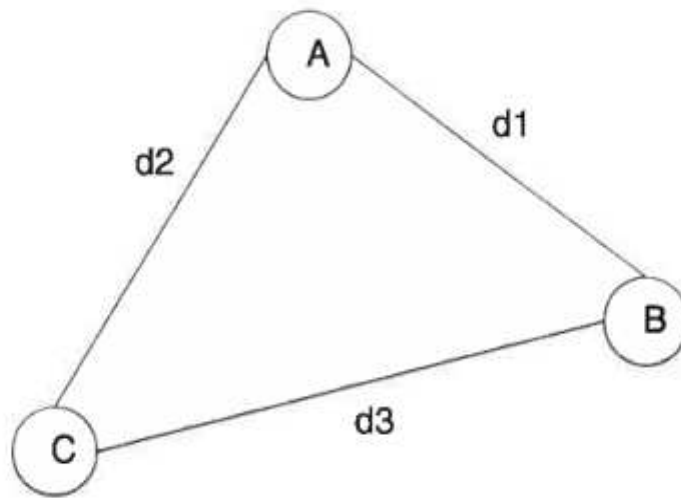


Figure 1.4 : illustration du principe de la triangulation [26]

1.2.4.1.3. Localisation des empreintes digitales :

La technique des empreintes digitales est basée sur une carte radio, qui est une collection des empreintes digitales.

Les techniques qui dérivent une distance directement de la force du signal sont susceptibles d'erreurs en raison du fait qu'il n'y a pas de relation directe entre la force du signal et la distance. De telles méthodes incluent la triangulation. La technique d'empreinte digitale évite complètement ce problème, car elle n'est pas du tout concernée par la distance, mais plutôt d'obtenir une combinaison unique de RSSI qui distingue un emplacement de tous les autres emplacements. En principe, tout appareil compatible Bluetooth peut être utilisé comme balise car les différences dans les signaux émis n'auront aucune incidence sur la précision de l'estimation de la position [12].

1.2.5. La technologie UWB (Ultra-Wide Band) :

Le terme UWB a été introduit dans la littérature par le département de défense américain - DoD - dans les années 1988-1989 et ce dans le cadre de recherches secrètes entreprises pour des fins militaires. Mais cette nomenclature a été contestée par plusieurs chercheurs qui ont trouvé une mauvaise réponse. Ils se basent sur le fait que la technologie consiste à générer des impulsions de très courte durée plutôt que des signaux UWB, c'est l'aspect temporel qui définissait le signal et non l'aspect fréquentiel, Différents concepts et technologies existaient donc depuis le milieu des années soixante-dix [27] On pouvait même trouver des composants sur le marché. Mais une grande partie de l'UWB est restée inaccessible. Nombreuses recherches étaient financées par les États-Unis - mais aussi Russie ou Chine - sous une confidentialité totale. Mais c'est à partir de l'année 1994, avec l'ouverture du DARPA aux discussions sur l'UWB, que le monde industriel et la communauté scientifique (académique) ont commencé à s'intéresser fortement à ce domaine. Avec le monde industriel entrant en jeu, le débat sur la définition des systèmes UWB s'intensifie, surtout que les grands fabricants cherchaient à classer leurs nouveaux systèmes sous la catégorie UWB. Ces dernières années, cette technologie s'est principalement concentrée sur l'électronique grand public et les communications sans fil. La Federal Communication Commission (FCC) a publié un rapport en février 2002, autorisant le déploiement commercial et sans licence d'applications UWB aux États-Unis pour le masque spectral intérieur et extérieur. Cette large attribution de fréquences a initié de nombreuses recherches tant de l'industrie que du milieu universitaire [28]. L'UWB est utilisé pour les applications de communication radio et de positionnement à courte et moyenne portée. Différentes mesures peuvent être utilisées dans un système de positionnement UWB pour déterminer la distance entre la cible et un point de référence, Ces derniers seront bien détaillés dans le chapitre suivant. Bai et Lu [29] a présenté un IPS basé sur l'UWB, qui se compose de quatre émetteurs fixes et de quelques utilisateurs mobiles. Les émetteurs, qui sont synchronisés à l'aide d'un schéma de division temporelle, envoient un signal UWB aux utilisateurs mobiles. L'estimation de la localisation a été calculée à l'aide d'une méthode de triangulation basée sur la mesure TDoA entre émetteurs et récepteurs. Le système revendique une précision de 1 mètre lorsque la bande passante du signal UWB est de 528 MHz. Le système radio à impulsion UWB présente plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes conventionnels [30] :

1. Transmission sans fil à haut débit : les systèmes UWB peuvent prendre en charge un débit de transmission de données supérieur à 500 Mb/s dans une plage de 10 m, ce qui permet de nouveaux services et applications.
 2. Télémétrie de haute précision : les systèmes UWB ont une bonne résolution dans le domaine temporel et une précision centimétrique pourrait être fournie pour les applications de localisation et de suivi.
 3. UWB est utilisé pour les applications de localisation et de suivi avec une précision au cm.
 4. UWB peut fonctionner dans des environnements Line of Sight et Non Line of Sight (LOS et NLOS) pour les obstacles pénétrant le signal.
 5. Le système UWB est capable de résister à l'évanouissement par trajets multiples.
 6. La densité spectrale de puissance est très faible, elle est donc sécurisée et peut coexister avec d'autres services tels que WLAN, GPS, système cellulaire, etc.
 7. Le système UWB a un faible coût grâce à l'utilisation de la technologie CMOS.
- [26]

Ces avantages font de la technologie UWB un candidat idéal pour les systèmes de positionnement indoor. Le plus gros inconvénient par rapport à l'UWB est que d'autres technologies comme le Wifi ou le Bluetooth sont capables d'interagir avec tous les smartphones et tablettes d'aujourd'hui. Mais depuis qu'Apple a introduit la puce UWB dans son iPhone11 en 2019, l'UWB devrait entrer très rapidement dans le grand public. D'autres fabricants de smartphones copient Apple et incluent l'UWB dans leurs appareils, et plus important encore, incluront l'intégration de l'UWB dans l'électronique de localisation, les appareils portables, etc. [31]

1.3. Comparaison des systèmes de positionnement :

Depuis plus de deux décennies, plusieurs groupes de recherche scientifique et industrielle ont proposé des systèmes de positionnement intérieur utilisant différentes approches technologiques, englobant de nombreux types de capteurs. Dans cette section, nous présentons une comparaison des différentes technologies qui ont été utilisées pour développer des systèmes de positionnement intérieur. Plusieurs paramètres ont été utilisés

pour comparer un IPS avec d'autres, comme la précision, le type de localisation (2D ou 3D), la méthode (par exemple, la triangulation, l'empreinte digitale), l'algorithme, la mesure du signal (AoA, ToA, TDoA et RSS), couverture et coût [32], [33].

À partir de ces paramètres, nous considérons la précision, la couverture et le coût, car nous identifions que ces paramètres sont couramment utilisés pour tirer parti d'une technologie spécifique connue pour développer un système de positionnement intérieur. Les informations de chaque système sont présentées dans le tableau (1.1).

La technologie	Approx	Couverture	Coût	Forces	faiblesses
caméra	<1 cm	Pièce	E	haute précision	Très chère, les marqueurs doivent être vus par les camera
Wifi	1,5m	immeuble	B	Faible coût, bonne précision	Vulnérable aux changements de point d'accès
Bluetooth	30cm-mètres	immeuble	B	Faible coût, bonne précision	Intrusif
UWB	10cm	immeuble	B	Faible coût, ne pose pas de problème en présence d'obstacles	Interférence potentielle avec les systèmes existants
GPS	2m	En plein air	E	Couverture mondiale	Indisponible à l'intérieur

Tableau 1.1 : Comparaison des principales technologies de positionnement indoor.

A noter que :

E : élevé (high en anglais) et B : bas (Low en anglais).

Précision à peu près : fait référence à la différence entre la position estimée et la position réelle ; comme cette différence pourrait changer en fonction des conditions, il s'agit plutôt d'une distribution statistique, qui devrait être exprimée en termes de paramètres comme une distance et un pourcentage, tels que "moins d'un mètre d'erreur dans 95 pour cent des cas", bien que les auteurs expriment rarement l'exactitude dans ces termes.

Couverture est l'extension territoriale dans laquelle le système peut localiser un utilisateur ou un objet. Bien que certaines technologies puissent offrir une couverture étendue dans un environnement idéal, lorsqu'elles sont utilisées à l'intérieur, leur couverture peut être limitée par des facteurs environnementaux. Un IPS peut localiser une personne ou un objet dans une plage de mètres ou même les localiser à différents niveaux à l'intérieur d'un bâtiment.

Coût est le montant des ressources investies pour l'installation et l'exploitation d'un système de positionnement. Dans cette enquête, le coût est déterminé en fonction de deux paramètres. Le premier est le coût d'installation et de maintenance (IC dans le tableau 1). Le second est le coût pour chaque utilisateur final (UC dans le tableau). Nous identifions les IPS qui utilisent les infrastructures existantes (par exemple, l'éclairage, le son ambiant et le champ magnétique terrestre), ainsi que les systèmes qui réutilisent la technologie existante dans les environnements intérieurs (par exemple, les points d'accès Wi-Fi) ou ceux qui sont portés par l'utilisateur (par exemple, les appareils mobiles), nécessitent un faible (L) investissements pour l'installation et la maintenance et un faible coût du service pour l'utilisateur.

1.3.1. La différence entre l'UWB et les autres technologies :

L'ultra large bande, comme chaque norme RF, offre des caractéristiques et des avantages uniques qui peuvent en faire une option appropriée en fonction des besoins individuels, du budget, des installations et du cas d'utilisation spécifique basée sur l'emplacement. Les différences les plus critiques entre l'UWB et les autres technologies sont son large spectre de fréquences et le niveau de précision qu'il peut fournir. La précision de l'UWB en fait une option efficace, en particulier dans les cas d'utilisation avancés du positionnement en

intérieur tels que les scénarios de suivi des actifs, où la localisation absolue et le mouvement en temps réel sont cruciaux.

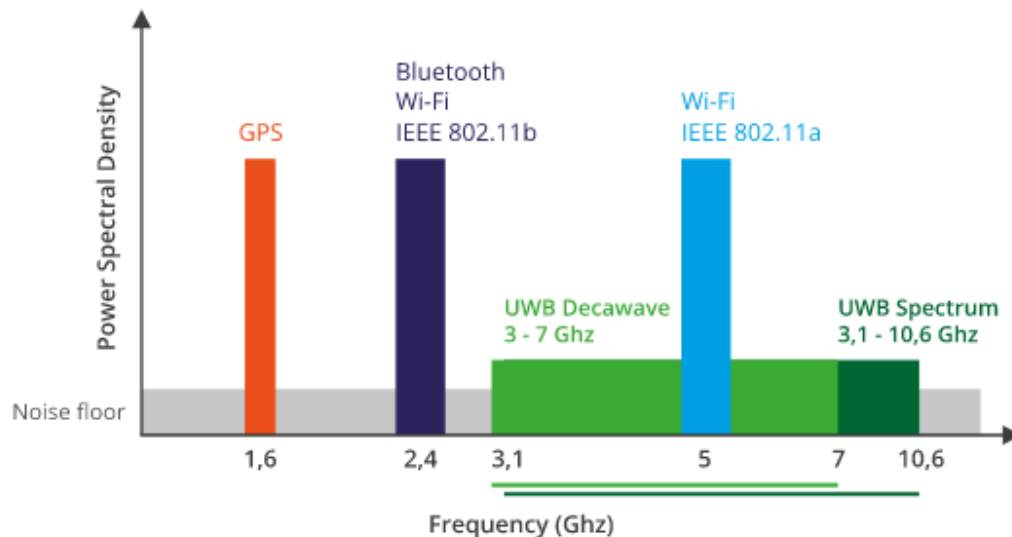


Figure 1.5 : Spectre UWB [34]

L'UWB utilise une très faible puissance et la largeur de bande élevée (500 MHz) est idéale pour transmettre un grand nombre de données d'un émetteur à d'autres appareils. Il faut mentionner aussi que toute la bande entre 3.1GHz et 10.6GHz peut être librement utilisée par les systèmes UWB. Il faut entre 32 et 128 impulsions pour coder un seul bit de données, mais compte tenu de la vitesse à laquelle les bits arrivent, cela permet d'atteindre des débits de 7 à 27 mégabits par seconde [16].

1.3.1.1. UWB contre Wi-Fi :

La vaste présence du Wi-Fi dans nos appareils et espaces intérieurs en a fait une technologie RF clé pour la localisation en intérieur. Dans les scénarios avancés basés sur la localisation, le Wi-Fi peut être limité en raison de sa faible précision et de sa flexibilité. L'UWB excelle dans ces applications plus avancées où un haut degré de précision est requis. La précision du Wi-Fi est bien inférieure à celle de l'UWB, car il mesure généralement l'emplacement non pas en fonction de la distance, mais plutôt de la force du signal, tout comme Bluetooth. Il est également plus susceptible de subir des interférences de signal, auxquelles l'UWB a une forte immunité. L'UWB nécessite également moins d'énergie, ce qui permet des outils plus utiles et abordables, tels que des étiquettes de suivi des actifs qui peuvent être alimentées par des piles boutons de longue

durée. Cependant, le large éventail d'appareils compatibles Wi-Fi et la capacité d'exploiter l'infrastructure existante, comme les points d'accès.

1.3.1.2. UWB contre le BLUETOOTH :

UWB et Bluetooth ont de nombreux attributs communs - faible consommation, faible coût, puissance en tant que technologie de suivi des actifs, etc. Cependant, UWB peut offrir une précision bien supérieure à Bluetooth. Ceci est en grande partie dû à la méthode précise basée sur la distance d'UWB pour déterminer l'emplacement via ToF. La technologie de positionnement BLE localise généralement les appareils via RSSI, qui estime la distance et donne un niveau de précision considérablement inférieur selon qu'un appareil transmet un signal fort ou faible par rapport à une balise ou à des capteurs. Le BLE a également une portée et un débit de données beaucoup plus courts que l'UWB, et est plus sujet aux interférences de signal. Bluetooth possède un énorme écosystème et est une technologie de positionnement d'intérieur de premier plan depuis un certain temps. Il est utilisé par tant d'appareils sans fil d'aujourd'hui et une option très populaire pour la localisation.

1.3.1.3. UWB contre GPS :

La technologie Ultra Wide Band (UWB) est basée sur des impulsions très courtes d'énergie radio. Courtes impulsions d'énergie radio. En théorie, sa large bande passante du signal offre une excellente immunité aux trajets multiples. C'est pourquoi, UWB a été utilisée dans une variété d'applications, y compris la communication et la télémétrie. Étant donné que les signaux des satellites GPS présentent des niveaux de puissance très faibles (-130 dBm ou -160 dBm) près de la surface de la Terre, les interférences potentielles des UWB sur les récepteurs GPS (et donc sur les systèmes GPS, tels que les systèmes de vol critiques pour la sécurité dans l'aéronautique). Est une préoccupation majeure [35]. Les systèmes de suivi de position basés sur le GPS et l'UWB s'avèrent être des systèmes valides et fiables pour l'analyse du temps et du mouvement bien que la technologie UWB soit plus précise que le GPS.

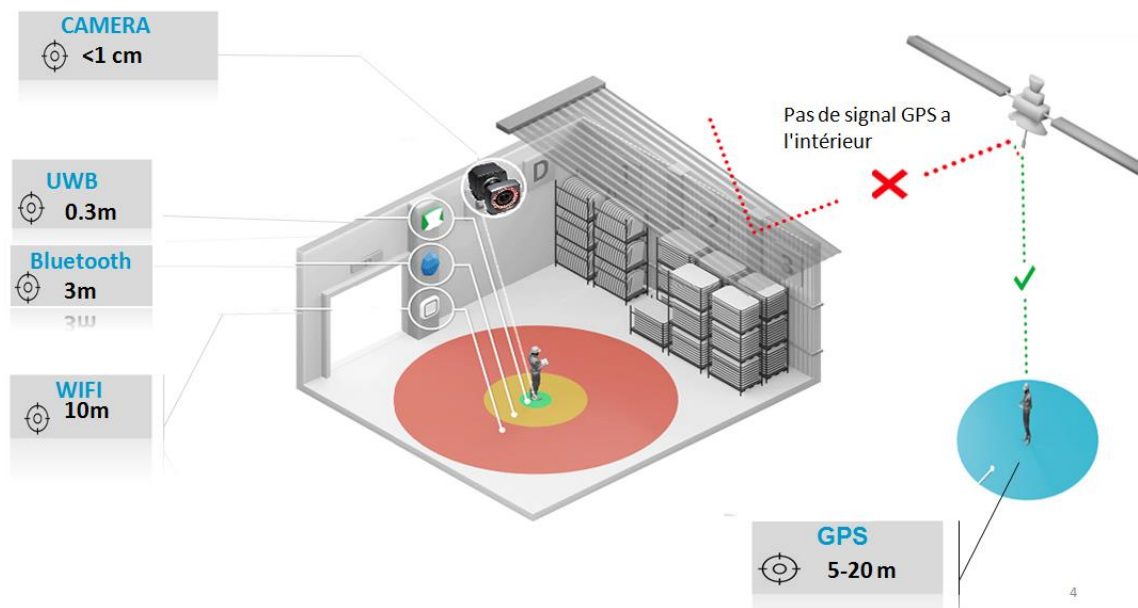


Figure 1.6 : Les différents systèmes de positionnement

1.4. Estimation d'attitude :

La navigation d'un drone autonome comprend principalement trois parties :

- (1) l'estimation de l'attitude de l'aéronef ;
- (2) la détection et l'évitement des obstacles en vol ;
- (3) le contrôle de l'appareil en vol autonome.

La première partie est le fondement des autres. Et l'estimation précise de l'attitude de l'UAV est également la base pour l'ensemble de la tâche de vol. De plus, c'est un problème très difficile d'estimer l'attitude d'un UAV dans un environnement inconnu, car l'altitude et le mouvement de l'UAV varient de façon dynamique, et le fait que l'UAV peut être affecté par l'environnement externe et par son propre changement d'état lors des opérations de vol. L'estimation traditionnelle de l'attitude de vol est basée sur le système mondial de navigation par satellite (GNSS). Comme il y a des problèmes d'interférence et de protection pour le GNSS, les dernières années, les chercheurs n'ont cessé de mettre au point des méthodes d'estimation d'attitude basées sur la fusion de plusieurs capteurs dans le cas où le GNSS n'est pas disponible à basse altitude ou à l'intérieur[36]. Pour obtenir une estimation robuste de la position qui exploite au mieux les propriétés spécifiques de chaque capteur (informations inertielles ou absolues, précision, bande

passante, niveau de bruit, etc.), trois capteurs sont souvent utilisés et combinés pour estimer sa valeur, un magnétomètre, un accéléromètre et un gyroscope.

Pour combiner les mesures inertielles avec des capteurs et des modèles supplémentaires pour l'estimation de la position et de l'orientation, il est important de décrire avec précision les quantités et la vitesse angulaire, mesurées par l'accéléromètre et le gyroscope respectivement en détail, un certain nombre de repères de coordonnées doivent d'abord être introduits :

1.4.1. Repaire des coordonnées :

- ❖ **Le repère du corps B** est le repère de coordonnées de l'IMU en mouvement. Son origine est située au centre de la triade de l'accéléromètre et elle est alignée sur le boîtier. Toutes les mesures inertielles sont résolues dans cette trame.
- ❖ **Le repère de navigation N** est un cadre géographique local dans lequel on veut naviguer. Autrement dit, on s'intéresse à la position et à l'orientation du b -frame par rapport à ce frame. Pour la plupart des applications, il est défini stationnaire par rapport à la terre. Cependant, dans les cas où le capteur est censé se déplacer sur de grandes distances, il est d'usage de déplacer et de faire pivoter le cadre n le long de la surface de la terre.
- ❖ **Le repère inertiel I** est un cadre stationnaire. L'IMU mesure l'accélération linéaire et la vitesse angulaire par rapport à ce référentiel. Son origine est située au centre de la terre et ses axes sont alignés par rapport aux étoiles.
- ❖ **Le repère de la terre E** coïncide avec l' i -frame, mais tourne avec la terre. C'est-à-dire qu'il a son origine au centre de la terre et des axes qui sont fixes par rapport à la terre. Les cadres de coordonnées n , i et e sont illustrés dans la figure 1.7

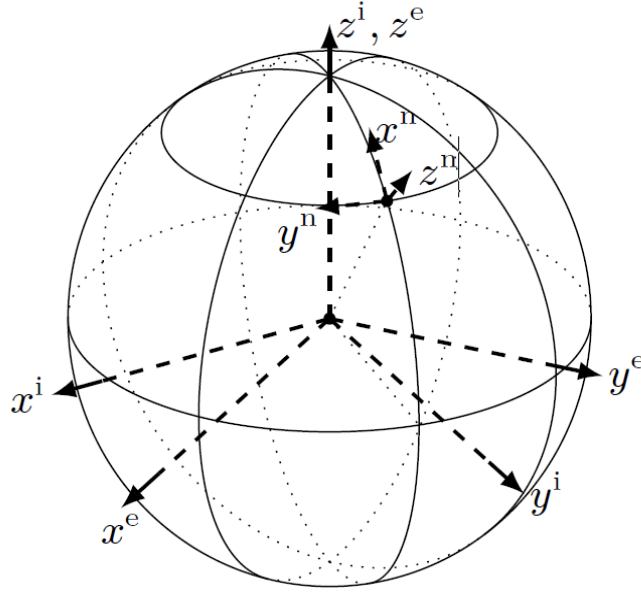


Figure 1.7 : Une illustration de trois des repères de coordonnées : le repère- n à un certain endroit sur la terre, le repère e -tournant avec la terre et le repère- i .

1.4.2. Vitesse angulaire :

Le gyroscope mesure la vitesse angulaire du référentiel corporel par rapport au référentiel inertiel, exprimée dans le référentiel corporel [36], cette vitesse angulaire peut être exprimée par ω_{ib}^b

$$\omega_{ib}^b = R^{bn}(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) + \omega_{nb}^b \quad (1.7)$$

Où R^{bn} est la matrice de rotation du cadre de navigation au cadre du corps. Le taux de terre, ie

La vitesse angulaire du référentiel terrestre par rapport au référentiel inertiel est notée ω_{ie} . La terre tourne autour de son propre axe z en 23:9345 heures par rapport aux étoiles [37]. Par conséquent, le taux de terre est d'environ $7,29 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$.

Dans le cas où le repère de navigation n'est pas défini fixe par rapport à la terre, la vitesse angulaire ω_{en} , ie . Le taux de transport est non nul. La vitesse angulaire requise à des fins de navigation qui nous intéresse lors de la détermination de l'orientation du repère corporel par rapport au repère de navigation est notée ω_{nb} .

1.4.3. Orientation de paramétrage :

La rotation d'un vecteur dans $\mathbb{R}^3$ change la direction du vecteur tout en conservant sa longueur. Le groupe des rotations dans $\mathbb{R}^3$ est le groupe orthogonal spécial $SO(3)$. Dans cette section, nous introduisons trois manières différentes de paramétrer des orientations. Notez que ceux-ci décrivent la même quantité et peuvent donc être utilisés de manière interchangeable.

1.4.3.1. Matrice de cosinus de direction (matrice de rotation):

Les matrices de rotation ont les propriétés suivantes $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

$$RR^T = R^T R = I_3 \quad \det R = 1. \quad (1.8)$$

Les propriétés (1.8) fournissent une interprétation du nom groupe orthogonal spécial $SO(3)$. Toutes les matrices orthogonales de dimension 3×3 ont la propriété $RR^T = R^T R = I_3$ et font partie de group orthogonales $O(3)$. La notion spécial dans $SO(3)$ précise que seules les matrices avec $\det R = 1$ sont considérées rotations.

Considérez deux cadres de coordonnées notés u et v . Considérez qu'un vecteur x exprimé dans le cadre β peut être tourné vers le cadre I comme.

$$x^I = R^{I\beta} x^\beta \quad (1.9)$$

Nous désignons ce vecteur x^v par Inversement, la rotation du cadre β de navigation au cadre I du corps est notée $R^{\beta I} = (R^{I\beta})^T$

On a donc

$$x^\beta = (R^{I\beta})^T x^I = R^{\beta I} x^I \quad (1.10)$$

Une matrice de rotation est une description unique de l'orientation. Elle a 9 composants qui dépendent les uns des autres comme suit :

$$I_{R\beta} = \begin{pmatrix} \hat{x}_\beta \cdot \hat{x}_I & \hat{x}_\beta \cdot \hat{y}_I & \hat{x}_\beta \cdot \hat{z}_I \\ \hat{y}_\beta \cdot \hat{x}_I & \hat{y}_\beta \cdot \hat{y}_I & \hat{y}_\beta \cdot \hat{z}_I \\ \hat{z}_\beta \cdot \hat{x}_I & \hat{z}_\beta \cdot \hat{y}_I & \hat{z}_\beta \cdot \hat{z}_I \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

1.4.3.2. Angles d'Euler :

La rotation peut également être définie comme une rotation consécutive autour de trois axes en termes d'angles dits d'Euler. Nous utilisons la convention $(z; y; x)$ qui fait d'abord pivoter un angle ψ autour de l'axe- z , puis un angle θ autour de l'axe- y et enfin un angle ϕ autour de l'axe- x . Ces angles sont illustrés dans la figure (1.7) En supposant que le cadre v est tourné de $(\psi; \theta; \phi)$ par rapport au cadre u tel qu'illustré sur cette figure, la matrice R^{uv} de rotation est donnée par :

$$R^{uv} = R^{uv}(e_1, \phi) R^{uv}(e_2, \theta) R^{uv}(e_3, \psi) \quad (1.12)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

Les $(\psi; \theta; \phi)$ angles sont également souvent appelés lacet (ou cap), tangage et roulis, (yaw, pitch, roll en anglais) respectivement. De plus, le roulis et le tangage sont souvent appelés inclinaison.

Semblable au vecteur de rotation, les angles d'Euler paramètrent l'orientation en tant que vecteur tridimensionnel. Les représentations d'angle d'Euler ne sont pas des descriptions uniques d'une rotation pour deux raisons. Premièrement, en raison de l'enroulement des angles d'Euler, la rotation $(0, 0, 0)$ est par exemple égale à $(0, 0, 2\pi k)$ pour tout entier k . De plus, la mise en $\theta = \frac{\pi}{2}$ sur (1.12), mène à:

$$R^{uv} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ \sin \phi \cos \psi - \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & 0 \\ \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ \sin(\phi - \psi) & \cos(\phi - \psi) & 0 \\ \cos(\phi - \psi) & -\sin(\phi - \psi) & 0 \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

Par conséquent, seule la rotation $(\phi - \psi)$ peut être observée. De ce fait, par exemple les rotations sont toutes les trois équivalentes $(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, 0), (0, \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}), (\pi, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$. C'est ce qu'on appelle (gimbal lock) ou le verrouillage du cardan [38].

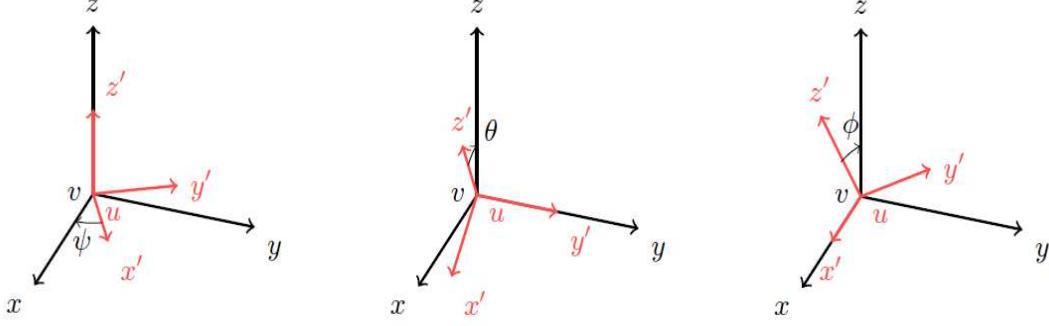


Figure 1.8: Définition des angles d'Euler tels qu'utilisés dans ce travail avec la gauche : rotation ψ autour de l'axe- z , milieu : rotation θ autour de l'axe- y et à droite : rotation ϕ autour de l'axe- x [39].

1.4.3.3. Représentation des quaternions unitaires :

Un paramétrage de l'orientation couramment utilisée est celui des quaternions unitaires. Les quaternions ont été introduits pour la première fois par [40] Et sont très efficaces pour résoudre le problème d'enregistrement basé sur les moindres carrés. Commençons par une formulation du problème en 3D.

Soit $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ un ensemble de points de données. On suppose que $p_1, \dots, p_n$ sont à rapprocher des points $q_1, \dots, q_n$ sur un modèle de forme. A savoir, les correspondances entre les points de données et ceux sur le modèle ont été prédéterminées. Alors le problème est de trouver une rotation, représentée par une matrice R orthogonale avec $\det(R) = 1$, et une $\mathbf{b}$ translation comme solution à la minimisation suivante :

$$\min_{R, \mathbf{b}} \sum_{i=1}^n \|R p_i + \mathbf{b} - q_i\|^2. \quad (1.15)$$

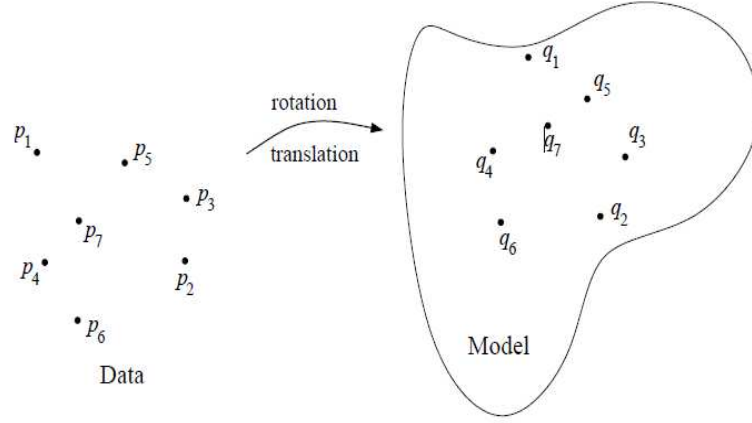


Figure1.9 : Représentation des quaternions unitaires

On commence par calculer le centre de gravité des deux ensembles de points

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i ; \quad (1.16)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i ;$$

Les coordonnées relatives de tous les points à leurs centres de gravité sont obtenues comme, pour $1 \leq i \leq n$

$$p'_i = p_i - \bar{p} ; \quad (1.17)$$

$$q'_i = q_i - \bar{q} .$$

La traduction minimiser de b devrait rendre le deuxième terme de la dernière équation au-dessus de zéro, ce qui donne :

$$b = \bar{q} - R_{\bar{p}} . \quad (1.18)$$

Ainsi nous avons décomposé le problème de l'enregistrement des données en deux phases : la première détermine sa traduction optimale, telle que donnée par l'équation (1.18), et dont le second détermine la rotation optimale de l'ensemble $\{p_i\}$. Notez que chaque point p_i est transformé en $R(p_i - \bar{p}) + \bar{q}$ avant d'être comparé à q_i . De manière équivalente, pour trouver la meilleure correspondance entre les deux ensembles de points $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$

, nous traduisons $\{p_i\}$ d'abord pour faire coïncider leur centre de gravité avec celui de $\{q_i\}$, puis nous tournons autour du centre de gravité commun.

Par le raisonnement jusqu'ici, la rotation optimale peut être résolue à partir de la formulation ci-dessous :

$$\min_R \sum_{i=1}^n \|R\dot{p}_i - \dot{q}_i\|^2. \quad (1.19)$$

Nous présentons ici une solution exacte à (1.19) en utilisant des quaternions.

Ici, nous considérons les quaternions comme des vecteurs dans $\mathbb{R}^4$.

$q = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T$ Et $q^* = (q_0, -q_1, -q_2, -q_3)^T$ Aussi, les points $\dot{p}_1, \dots, \dot{p}_n$ et $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n$ sont considérés comme des 4-uplets avec $\dot{p}_i = (0, \dot{p}_{i1}, \dot{p}_{i2}, \dot{p}_{i3})^T$ et $\dot{q}_i = (0, \dot{q}_{i1}, \dot{q}_{i2}, \dot{q}_{i3})^T$ par un léger abus de notation. En appliquant la définition de produit de quaternion, il n'est pas difficile de montrer que

$$(q\dot{p}_i p^*). \dot{q}_i = (q\dot{p}_i). (\dot{q}_i q). \quad (1.20)$$

Ensuite, nous avons l'intention de réécrire $(\sum_{i=1}^n (q\dot{p}_i q^*). \dot{q}_i)$ sous forme de produits matriciels. Pour cela, on définit la matrice

$$p_i = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{p}_{i1} & -\dot{p}_{i2} & -\dot{p}_{i3} \\ \dot{p}_{i1} & 0 & \dot{p}_{i3} & -\dot{p}_{i2} \\ \dot{p}_{i2} & -\dot{p}_{i3} & 0 & \dot{p}_{i1} \\ \dot{p}_{i3} & \dot{p}_{i2} & -\dot{p}_{i1} & 0 \end{pmatrix} \text{ and} \quad Q_i = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{q}_{i1} & -\dot{q}_{i2} & -\dot{q}_{i3} \\ \dot{q}_{i1} & 0 & -\dot{q}_{i3} & \dot{q}_{i2} \\ \dot{q}_{i2} & \dot{q}_{i3} & 0 & -\dot{q}_{i1} \\ \dot{q}_{i3} & -\dot{q}_{i2} & \dot{q}_{i1} & 0 \end{pmatrix} \quad (1.21)$$

Pour $1 \leq i \leq n$.

Alors les produits des quaternions $q\dot{p}_i$ et $\dot{q}_i q$ sont équivalents aux produits matriciels P_{iq} et Q_{iq} .

Le paramétrage des quaternions unitaires ne nécessite qu'un vecteur à 4 éléments, ce qui la rend efficace en termes de calcul pour les applications du monde réel [41] Elle présente

l'inconvénient d'être une représentation non unique pour L'attitude. Cette ambiguïté peut être évitée en choisissant les équations de mouvement appropriées comme indiqué dans [42].

1.5. Conclusion:

Ce chapitre a été consacré à des notions générales sur les systèmes de positionnement il a été ainsi question de présenter les différentes technologies de cette dernière telle que GPS, WIFI et BLEUTOOTH tout en se concentrant sur ultra-large bande (UWB) un tableau de comparaison dressés à la fin du chapitre a déjà anticipé sur les inconvénients de chacune des technologies présentées.

Le chapitre suivant expliquera en profondeur la technique choisie et les différentes méthodes pour déterminer la distance à la cible à partir des points de référence nécessaires pour l'estimation de la position.

Estimation de la position et de la vitesse linéaire en utilisant l'UWB et filtre Kalman

2. Estimation de la position et de la vitesse linéaire en utilisant l'UWB et filtre Kalman

2.1. Introduction :

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'emplacement d'un nœud cible dans un réseau sans fil, et chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. Pour cette raison, un processus basé sur le temps est généralement choisi car il offre une plus grande précision que la méthode d'intensité du signal reçu (RSS) dans les environnements intérieurs.

L'imprécision de la méthode RSS est principalement due à la propagation par trajets multiples et à l'existence de sources d'interférence inconnues dans l'environnement. Ces paramètres inconnus dans l'environnement modifient fortement le modèle de propagation normal et ne sont donc plus fiables. Si la méthode de télémétrie basée sur le temps sélectionné a une très grande bande passante, la précision du système peut être encore améliorée, car la limite inférieure de Cramer-Rao de la variance de mesure de distance (la variance de mesure la plus faible possible) et la bande passante de la méthode sélectionnée. Compte tenu de ces facteurs, un système mis en œuvre à l'aide de capteurs UWB fournira de bons résultats, généralement avec une précision inférieure à 10 cm.

2.2. Introduction à la technologie ultra-large bande :

La technologie UWB est une technique de transmission radio qui consiste à utiliser des signaux dont le spectre s'étale sur une large bande de fréquences. Elle est considérée comme une vieille technologie, elle a fait ses débuts dans les années 1890 grâce au système de transmission Spark-Gap de Marconi et Hertz [43]. Elle peut être exploitée à très faible densité de puissance pour la communication à des débits de données élevés sur de courtes distances.

L'expression relative aux signaux à ultra large bande (UWB) est extraite d'un contexte lié à la guerre froide où, pour désigner 1 'UWB, on aurait pu aussi bien employer les termes et les expressions suivantes « impulsions sans porteuse, bande de bases, domaine temporel, signaux non sinusoïdaux, fonction orthogonale et signaux radio ou radar à largeur de bande relativement large ».

Les dispositifs UWB se basent sur la transmission et la réception d'ondes sans porteuses généralement des impulsions de très courte durée de l'ordre de la nanoseconde, de sorte qu'elles occupent de très grandes largeurs de bande d'émission et qu'elles couvrent fondamentalement une très grande partie du spectre des fréquences [44]

2.2.1. Caractéristiques générales de la technologie UWB :

Les signaux UWB utilisent une large bande passante pour transmettre directement une séquence numérique de courtes impulsions d'énergie RF. En raison de la courte durée, les impulsions UWB diffusent leur énergie sur une large gamme de fréquences avec une densité spectrale de faible puissance (PSD). Cela offre plusieurs avantages par rapport aux systèmes de communication à bande étroite conventionnels tels que le débit élevé, la coexistence avec d'autres systèmes radio et robustesse au brouillage et l'écoute clandestine en raison de la faible probabilité de détection. La courte durée d'impulsion permet une haute résolution temporelle, ce qui rend les signaux UWB moins sensibles aux interférences par trajets multiples que les systèmes traditionnels à bande étroite. Les composantes basse fréquence des impulsions ont des capacités de pénétration élevées, permettant aux impulsions de se propager efficacement à travers des matériaux tels que les arbres et les surfaces du sol. Les émetteurs et récepteurs UWB peuvent être plus petits, moins chers et consommer moins d'énergie que les systèmes de communication à bande étroite.

Les caractéristiques techniques du système UWB semblent bien adaptées pour des applications de localisation. Le positionnement d'un nœud mobile avec cette technologie repose principalement sur les informations provenant des signaux radio circulant entre l'émetteur et un certain nombre de points de référence. Les techniques de localisation associées à cette technologie sont généralement basées sur les techniques temporelles [45].

2.2.1.1. densités d'utilisation potentielle :

La technologie UWB peut être intégrée dans de nombreuses applications qui pourraient offrir des avantages au public, aux consommateurs, aux entreprises et aux industries. Elle pourrait par exemple être intégrée dans des applications visant à améliorer la sécurité publique grâce à l'utilisation de dispositifs radar de véhicule anticollisions, de capteurs activant des coussins de sécurité gonflables, de capteurs d'état de la route, de dispositifs de communication de données à haut débit et à courte portée, de dispositifs de repérage, de détecteurs et capteurs de niveau de liquide, de dispositifs de surveillance, de dispositifs de localisation; elle pourrait aussi être utilisée pour remplacer les connexions filaires à haut débit sur de courtes distances. Bien que la plupart des dispositifs UWB fonctionnent à une très faible puissance, le grand nombre d'applications UWB potentielles pourraient conduire à une forte densité d'utilisation de dispositifs UWB dans certains environnements tels que les bureaux et entreprises [46].

2.2.1.2. Haute précision & haute résolution :

Par l'emploi d'impulsions de très courte durée ($< 1\text{ ns}$), la technologie UWB est capable de fournir une précision et résolution de quelques centimètre, dans les applications de localisation et d'imagerie radar [47].

2.2.1.3. Haut débit de données :

Les dispositifs UWB peuvent fonctionner à des niveaux de puissance très faibles et peuvent prendre en charge des applications utilisées par de multiples utilisateurs à de hauts débits (par exemple les réseaux personnels sans fil à courte portée (WPAN) ayant des débits supérieurs à 100 Mbit/s).

Le très large spectre de fréquences des systèmes de la norme IEEE 802.15.4a a une densité spectrale de puissance très faible. Cette propriété permet au signal UWB d'être noyé dans le bruit des autres systèmes et de ne pas être facilement détecté [48].

2.2.1.4. Capacités d'imagerie et de localisation :

Les émissions UWB peuvent pénétrer dans des murs et des obstacles et offrir une grande précision en matière de localisation. Ces propriétés sont également utiles dans les applications destinées à détecter le mouvement de personnes et d'objets. Par exemple, les applications d'imagerie radar peuvent être utilisées par les organismes chargés du maintien de l'ordre, de secours et de lutte contre les incendies afin de détecter des personnes cachées ou se trouvant derrière des murs ou des débris dans des situations telles que le sauvetage d'otages, les incendies, les effondrements d'immeubles ou les avalanches. Les systèmes UWB peuvent être utilisés dans les hôpitaux ou les cliniques pour une large gamme d'applications médicales afin d'obtenir des images d'organes à l'intérieur du corps d'une personne ou d'un animal. Ils peuvent aussi être utilisés :

- pour localiser des objets tels que gisements de minéraux, tuyauteries métalliques et non métalliques, câbles électriques se trouvant dans des murs et mines terrestres en plastique;
- pour mesurer l'épaisseur de la glace à la surface de lacs gelés et évaluer l'état des pistes dans les aéroports;
- dans les enquêtes de la police scientifique et les recherches archéologiques; et
- pour déceler des défauts dans les ponts et les routes [49].

2.2.1.5. Systèmes de communication :

Cette catégorie comprend les systèmes de communication à courte distance, notamment les réseaux personnels sans fil et les systèmes de mesure. Cette catégorie présentera certainement la plus grande prolifération en raison de possibilité d'utilisation massive des dispositifs UWB dans les immeubles à bureaux, les salles de réunion et de conférence et les endroits publics (par exemple les aéroports ou les centres commerciaux) [50].

2.2.2. Le signal UWB :

Au cours de sa brève histoire, l'ultra large bande a d'abord eu une première définition donnée par Taylor. Selon lui, le terme ultra large bande désigne les systèmes qui transmettent et reçoivent des ondes dont la largeur de bande relative (fractional bandwidth) LBR est supérieure ou égale à 0.25 [51].

La Commission fédérale des communications FCC définit l'UWB comme tout signal radio ayant une bande passante supérieure à 20% de sa fréquence centrale f_c ou ayant une bande de fréquence d'au moins 500MHz [52]. Cependant, les systèmes à bande étroites ou *NarrowBand* (NB) ont un spectre qui n'est pas supérieur à 1% de leur fréquence centrale. On peut, par ces deux caractéristiques, situer les technologies ayant un spectre à large bande ou *Wide band* (WB) qui se situent entre 1% et 20% de la fréquence centrale [53].

$$B_f = \frac{B}{f_c} = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \quad (2.1)$$

Avec $B = f_h - f_l \quad (2.2)$

Et $f_c = \frac{f_h + f_l}{2} \quad (2.3)$

D'où

B_f : La bande passante fractionnelle

f_l : fréquence de coupure inférieure

f_h : fréquence de coupure supérieure

Les fréquences de coupure sont calculées à -10 dB .

2.3. Les techniques de localisation :

Diverses techniques sont utilisées dans le système de positionnement UWB pour l'évaluation de la distance entre la cible et un point de référence ou l'angle. Certaines sont précises, mais coûteuses car elles nécessitent des équipements supplémentaires, de l'énergie, etc. D'autres ne nécessitent pas du matériel supplémentaire, mais elles ne sont pas précises. Les informations requises pour l'évaluation de la distance ou de l'angle sont déjà disponibles sur la plupart des nœuds. Dans les sections suivantes, nous examinerons les principales techniques basées sur la distance utilisées pour évaluer la distance ou

l'angle. Ces technologies incluent (Angle of Arrival) AoA, (Time of Arrival) ToA, (Time Difference of Arrival) TDoA, (Two-way Ranging) TWR et ToF (Time of Flight).

2.3.1. Mesure du temps de vol (ToF) et temps d'arrive (ToA) :

Dans un système de localisation en temps réel (RTLS), Anchors sont des dispositifs électroniques qui détectent les impulsions UWB émises par les tags UWB [54]

Nous définissons anchor comme Un nœud dont la position est connue dans le plan (ou espace de positionnement 3D).il est Généralement fixe, par contre les tags sont des nœuds mobiles qui cherchent à se localiser dans le réseau en fonction des anchors [53].

TOF est une méthode de positionnement basée sur la télémétrie bidirectionnelle. Cela signifie que l'étiquette doit envoyer et recevoir des signaux de l'ancre plusieurs fois, puis le temps de vol du signal entre anchor et tag peut être mesuré, car les ondes radio

Se déplacent à la vitesse de la lumière, nous pouvons calculer la distance entre le tag et chaque anchor [55].

En revanche, La technique TOA (Time of Arrival) utilise la relation entre la distance parcourue par un signal et le temps de parcours. Pour un positionnement bidimensionnel, trois stations de base (BS) dotées d'appareils de mesure TOA peuvent localiser avec précision une station mobile (MS) si les liaisons entre la MS et les BS sont en visibilité directe (LOS) [56].

Les deux méthodes se basent sur la relation entre la distance parcourue par un signal et le temps de parcours, il suffit d'appliquer la formule suivante [57]:

$$D = Temps \times vitesse \quad (2.4)$$

Notons que la vitesse de propagation d'un signal radio dépend du milieu en question (NLOS, LOS).

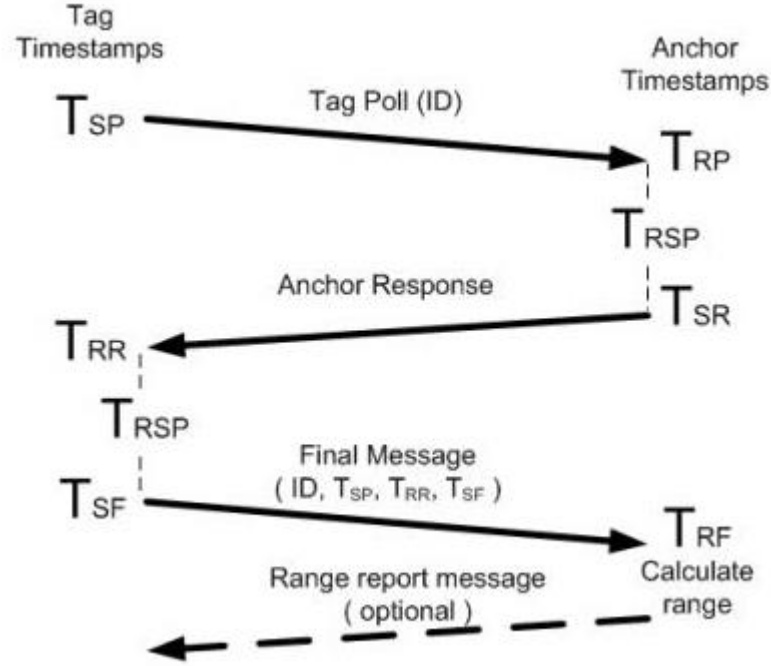


Figure 2.1 : Processus de communication TOF [58]

Le tag envoie des paquets d'interrogations et enregistre des horodatages, qui sont enregistrés en tant que T_{sp} (heure de début d'interrogation). Anchor reçoit le paquet de requête et enregistre T_{rp} (temps de réception de la requête). Ce dernier met un certain temps à recevoir le signal et à générer un paquet de réponse appelé T_{rsp} . Après il envoie un message de réponse et enregistre T_{sr} (réponse de début de temps). Tag reçoit le message de réponse et enregistre T_{rr} (temps de réception de la réponse). Le tag passe du temps à recevoir le signal et à générer un message final appelé T_{rsp} . Il envoie le message final et enregistre le T_{sf} (début du temps final). Anchor reçoit le message final et enregistre T_{rf} (l'heure de réception finale) [58].

2.3.1.1. Formule de calcul ToF:

Chaque Anchor a suffisamment d'informations pour calculer la distance au Tag. Ces informations incluent les horaires des événements affichés dans la Fig. 2.1

Le temps de vol est calculé par :

$$TOF = \frac{(T_{rr} - T_{sp}) - (T_{sr} - T_{rp}) + (T_{rf} - T_{sr}) - (T_{sf} - T_{rr})}{4} \quad (2.5)$$

Cette technique nécessite une synchronisation précise entre anchor et le tag. Cela se fait généralement par une synchronisation implicite sous la forme d'une mesure de temps aller-retour [59].

La précision de l'estimation de la distance dépend de la précision de l'horloge et de la synchronisation entre les Anchors et le Tag, ce qui affecte le temps de référence sur la base duquel le la ToF est estimée. Les difficultés principales de cette technique se situent au niveau de la synchronisation des horloges des différents anchors et les situations de non-visibilité (NLOS : *Non Line Of Sight*) qui ont tendance à biaiser les mesures [52].

Avec la méthode TOF, le Tag UWB doit compléter la plage avec chaque Anchor.

AP1 ~ AP3, représente 3 Anchors. Une fois le Tag et 3 Anchor terminées, il y aura 3 distances correspondantes, à savoir $d1 \sim d3$. En utilisant chaque Anchor comme centre et $d1 \sim d3$ comme rayon pour dessiner trois cercles. Trois cercles se croisent à un point, ce qui est la position idéale du Tag.

Dans le mode unidimensionnel, nous avons deux anchors à distance nous pouvons obtenir l'emplacement du Tag. Pour le mode bidimensionnel, trois anchors peuvent être nécessaires et si vous voulez obtenir les coordonnées X, Y et Z du Tag, nous devons préparer quatre Anchors [60].

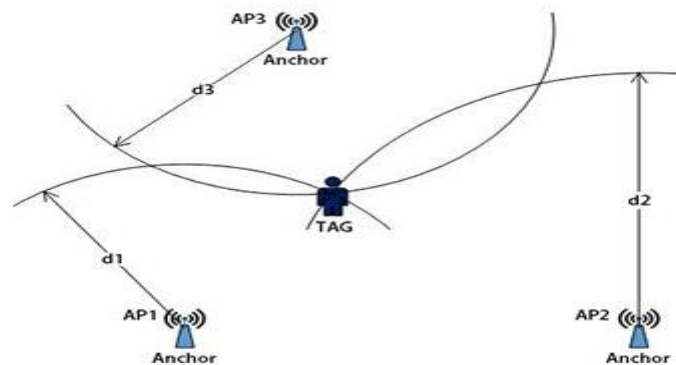


Figure 2.2 : protocole de communication ToF [60]

2.3.2. La télémétrie bidirectionnelle TWR :

A la base du positionnement, nous trouvons l'opération de télémétrie, qui est l'action de mesurer la distance à travers un processus de télémétrie. Les nœuds sans fil effectuent la télémétrie en utilisant un protocole défini pour la caractéristique physique qui doit être évaluée : cette caractéristique du signal peut être la puissance du signal reçu (RSS) ou le temps de vol (ToF) [51]. TWR, en revanche, détermine le temps de vol du signal radiofréquence UWB, puis calcule la distance entre les anchors. En absence de synchronisation entre les anchors, le anchor initiateur de la session de peut utiliser sa propre horloge comme horloge de référence comme l'illustre la figure 2.3 le anchor initiateur mesure le temps de vol « aller-retour » du signal. C'est le cas du protocole Two-Way Ranging (TWR).

2.3.2.1. Processus de communication TWR :

Le protocole TWR est basé sur un ensemble de trois messages dont deux (START et ACK) nécessaires pour l'estampillage et l'obtention des informations de la mesure du temps de vol.

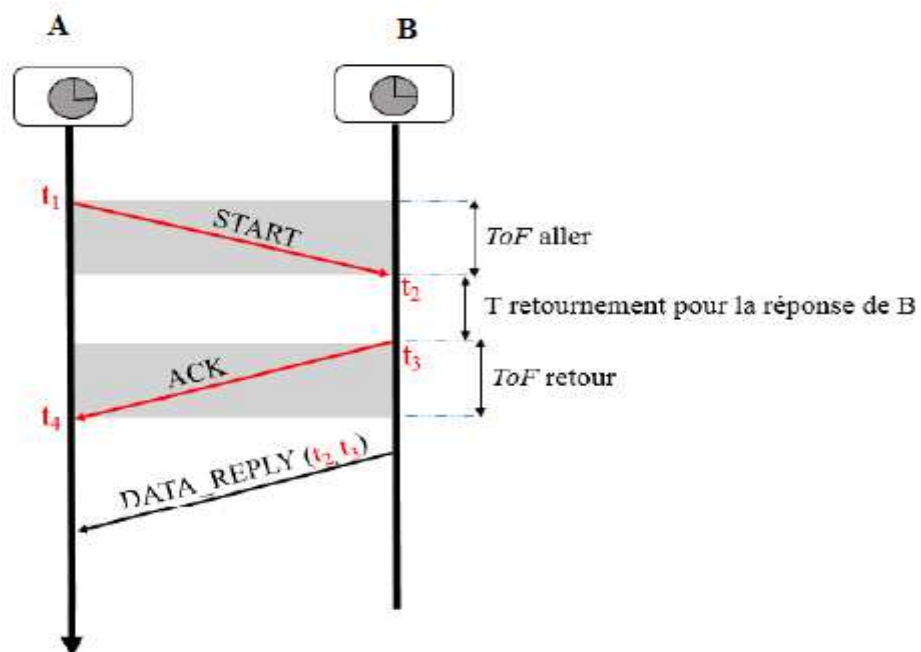


Figure 2.3 : Protocole (SS-TWR) en effectuant la mesure du ToF entre deux anchors [52]

Ce protocole est le plus simple. Anchor A (figure 2.3) initie l'échange l'émission d'un message START à destination Anchor B, ce dernier acquitte par le message ACK. Les différents timestamps sont connus après émission et réception des différentes trames et les quatre estampilles temporelles sont rassemblées par A après réception de la trame DATA_REPLY contenant les estampilles t_2 et t_3 du Anchor B permettant ainsi au anchor A de calculer le temps de vol [61] grâce à cette dernière trame permettra au Tag A de calculer le temps de vol noté dans l'équation (2.6) et la distance (2.7).

$$ToF_{TWR} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (2.6)$$

$$Distance = ToFTWR * C \quad (2.7)$$

2.3.2.2. Le protocole SDS-TWR (Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging):

Afin de réduire ou d'éliminer l'erreur introduite par la dérive d'horloge, un autre protocole de session de télémétrie symétrique en ajoutant des messages supplémentaires à la session classique du protocole TWR : c'est le protocole. Composants double face : Le protocole est basé sur deux sessions symétriques du protocole TWR

(TWR_{A-B} et TWR_{B-A})

$$TWR_{A-B} : TWR_{A-B} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (2.8)$$

$$TWR_{B-A} : TWR_{B-A} = \frac{(t_6 - t_3) - (t_5 - t_4)}{2} \quad (2.9)$$

Ces deux équations (2.8) et (2.9) de mesure de distance montrent la robustesse de SDS-TWR qui est capable d'obtenir des informations de deux sessions de mesure TWR avec seulement trois trames.

Un message supplémentaire est ajouté afin de symétriser le protocole TWR Figure (2.4). Le temps de vol et de la distance sont obtenus grâce aux équations (2.10) et (2.11) [62]

Chaque anchor marque ses propres estampilles d'émission et de réception. Toutes les estampilles seront rassemblées du A après la réception du message DATA_REPLY contenant les instantst₂, t₃ et t₆ jusqu'à B.

$$ToF_{SDS-TWR} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) + (t_6 - t_3) - (t_5 - t_4)}{4} \quad (2.10)$$

$$Distance = ToF_{SDS-TWR} * C \quad (2.11)$$

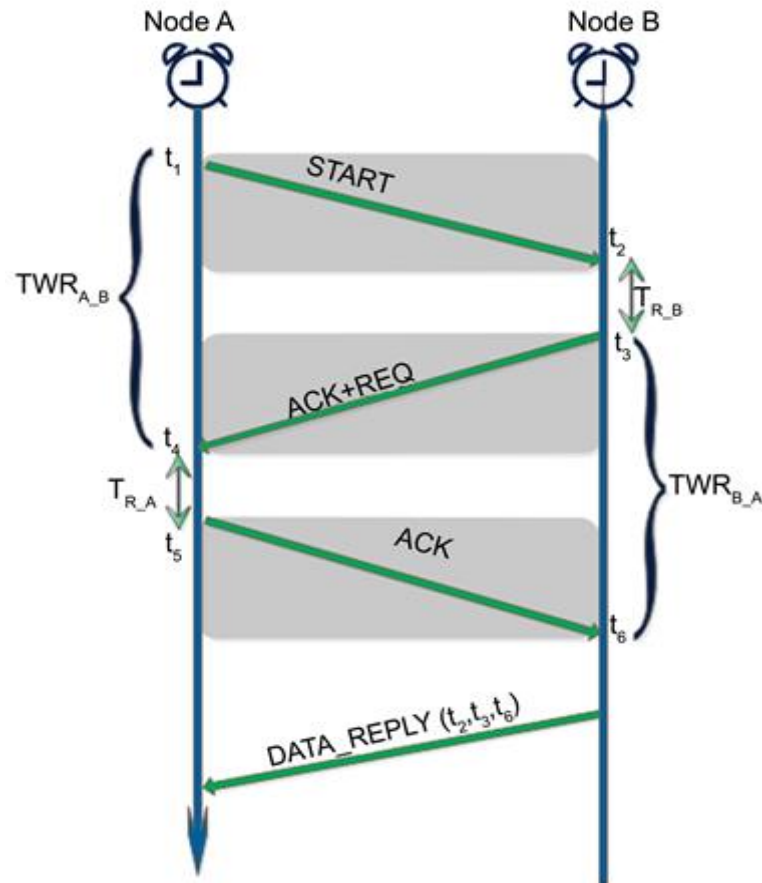


Figure 2.4 : Session protocolaire de ranging en SDS-TWR [63]

Un problème majeur pour SDS-TWR est qu'au moins trois messages sont nécessaires. Cela diminue la fréquence de mesure maximale et augmente le temps d'exécution. [63]

2.3.3. Décalage horaire d'arrivée TDoA :

TDoA (Time Difference of Arrival) est basé sur la différence des temps qu'un seul signal d'un seul anchor arrive dans trois anchors ou plus ou la différence des temps que plusieurs signaux d'un seul nœud arrivent dans un autre anchor [64].

Elle permet d'éviter le problème de synchronisation entre la source émettrice et le récepteur. Cependant, Elle nécessite, en fonction de l'application visée, au moins deux stations émettrices avec des positions connues (ou réceptrices) pour un récepteur (ou un émetteur) [65]. La position d'un dispositif peut être déterminée à l'aide d'informations sur la différence de temps d'arrivée (TDOA) sur la base de mesures du temps d'arrivée du signal radiofréquence. Aucun temps absolu n'est utilisé pour déterminer une distance, mais les distances sont calculées à partir des différences de temps. Aucune référence à une horloge commune entre l'expéditeur et le destinataire n'est nécessaire. [66]

2.3.3.1. Processus de communication TDoA :

Le point critique de TDOA est la synchronisation d'horloge entre les ancres. Dans la situation la plus simple, la synchronisation peut se faire à l'aide de fils et d'un générateur d'horloge commun parmi les ancres. Cependant, cela implique des exigences élevées sur le câblage entre les ancres, augmentant les coûts et la complexité du système.

Comme le montre la figure (2.5), la synchronisation sans fil est démarrée immédiatement après que les ancres ont reçu la trame de clignotement de l'étiquette. La raison de suivre cette méthode est de minimiser autant que possible les effets de la dérive d'horloge [59].

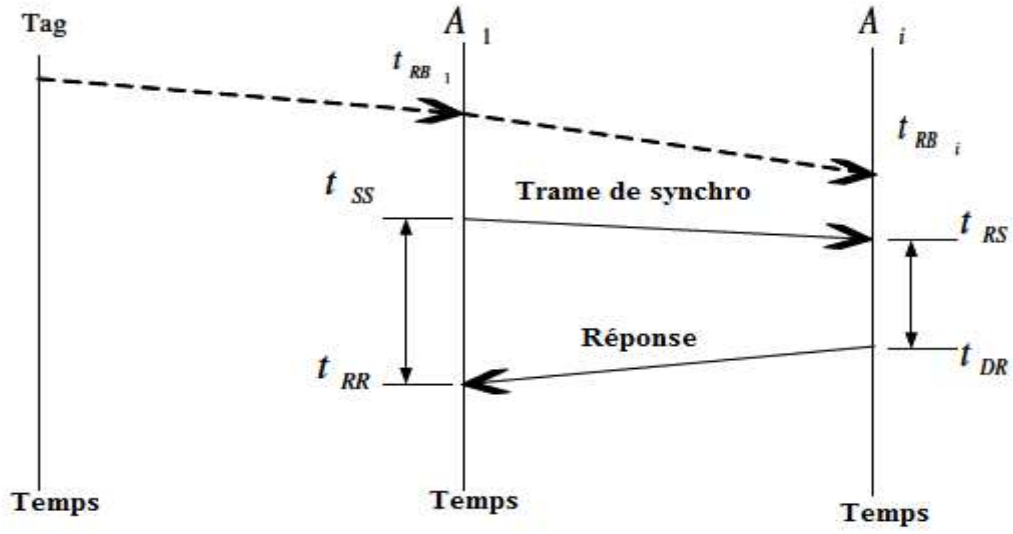


Figure 2.5 : Protocole de communication TDoA [59]

Le Processus est initialisé par l'Anchor de référence A_1 . Au début, chaque Anchor fonctionne sur une horloge indépendante et une heure de départ différente. La synchronisation est réalisée en trouvant tous les décalages d'horloge des Anchors par rapport à l'horloge d'un Maître Anchor A_1 . D'où, A_1 commence à se synchroniser avec les autres Anchor $A_i (i = 2, 3, 4)$ consécutivement, dès qu'il reçoit un cadre clignotant. Les étapes de synchronisation pour Anchor A_1 sont données comme :

- A_1 reçoit un clignotement à la fois t_{RB1} et envoie directement une trame de synchronisation pendant l'enregistrement de la transmission horodatage t_{SS} de ce cadre.
- A_i reçoit la trame et note l'heure de réception de la synchronisation t_{RS} et initie une réponse différée au moment t_{DR}
- La trame de réponse envoyée par A_i inclut trois horodatages dans la partie charge utile (t_{RS}, t_{DR}) et le temps de clignotement reçu (t_{RB_i} à A_i).
- A_1 reçoit une réponse à t_{RR} [59].

D'après l'équation (2.5) on obtient (2.12) :

$$\text{Décalage d'horloge} = t_{RR} - \left(t_{DR} + \frac{TOF}{2} \right) \quad (2.12)$$

d'où le décalage d'horloge est le décalage des horloges entre les ancrs A_1 et

($i = 2, 3, 4$). Cette valeur de décalage est ensuite utilisée par $A1$ pour modifier les temps de clignotement d'arrivée t_{RBi} rapporté de Ai par rapport à la propre horloge du maître $A1$ comme:

$$t_{RBi}(new) = t_{RBi} - (old) + \text{Décalage d'horloge} \quad (2.13)$$

2.3.4. Angle d'arrivée AOA :

L'Angulation est une autre technique de localisation qui utilise les angles pour déterminer la position d'un Tag par la méthode de triangulation. Dans le cas d'une localisation Bidimensionnelle, Pour localiser un mobile avec la technique AOA, il est nécessaire d'avoir au moins deux Anchor séparées d'une distance connue comme il est illustré dans la figure (2.6) [68]. En utilisant un réseau d'antennes directionnelles et une simple triangulation, on est capable de mesurer les angles d'arrivée à chaque Anchor [67].

Cette méthode permet l'estimation de la position en utilisant un point fixe de moins par rapport à l'utilisation de l'une des méthodes basées sur le temps, ce qui réduit considérablement le matériel nécessaire au système.

Dans le cas tridimensionnel, il faut deux mesures d'angles, une mesure de distance et une mesure d'élévation (azimuth angle) pour pouvoir estimer une position. [65]

Par contre elle se base sur l'existence du trajet direct ou de la visibilité directe (LOS) LINE OF SIGHT entre émetteur-récepteur. Lorsque ce trajet n'existe pas, il est difficile de trouver la direction dans laquelle se trouve l'émetteur. Cependant, la détermination de l'angle d'un signal entrant avec la précision requise est beaucoup plus complexe que l'horodatage, ce qui, ajouté au fait que les signaux réfléchis auront un impact important sur la précision dans les situations (NLoS).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour calculer les angles, la plus simple étant l'emploi d'une antenne directionnelle qui va détecter la direction du signal maximal Alternativement, on utilise la différence du délai de l'arrivée du signal sur plusieurs éléments d'un réseau d'antennes. Dans ce cas, il faut une antenne à six éléments pour couvrir 360 degrés [68].

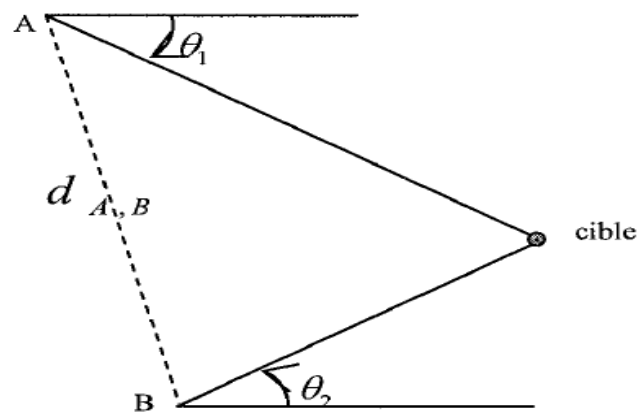


Figure 2.6 : Localisation par Angulation : cas idéal [68].

Comme il est illustré dans la figure (2.7) Les directions en pointillé sont les directions réelles du trajet direct qui font respectivement un angle de 1α et 2α par rapport à un axe prédéfini aux stations de bases SB_1 et SB_2 . Leur intersection donne la position exacte du mobile. Mais, puisque les antennes de réception disposent d'une marge d'erreur $\theta_s \pm$ alors chaque station de base localise le mobile plutôt dans un faisceau équivalent à la direction mesurée plus ou moins la marge d'erreur. Le mobile se trouve ainsi dans la région hachurée formée par l'intersection des deux faisceaux. D'autres techniques statistiques de positionnement directes ou itératives sont utilisées pour déterminer plus précisément le mobile dans cette région [69].

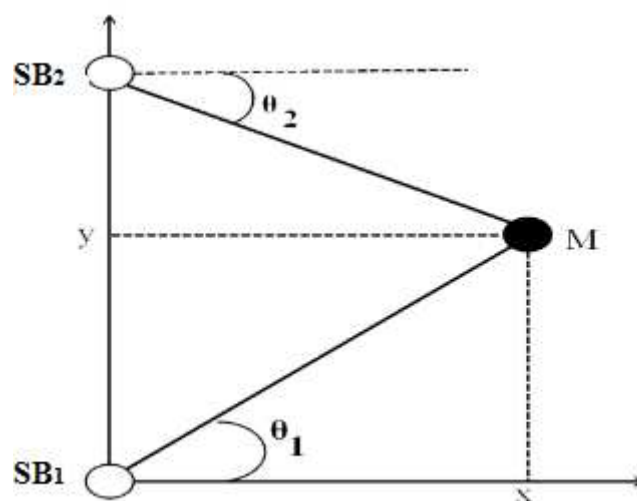


Figure 2.7 : Processus d'Angle d'arrivée AOA [69]

La position du mobile M est alors déterminée à partir des équations (2.14) et (2.15):

$$x = \frac{S_1 S_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (2.14)$$

$$y = \frac{S_1 S_2 \tan \theta_1}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (2.15)$$

2.4. Synthèse des techniques de localisation :

En nous basant sur l'étude bibliographique que nous avons établie pour chaque technique, Un résumé des principales techniques de localisation en utilisant UWB et leurs principaux avantages et inconvénients sont illustrés dans le tableau suivant qui nous permettra ensuite de Déterminer quel algorithme peut être utilise lors de l'implémentation de notre système de localisation :

Technique de localisation	Avantages	Inconvénients
Time of Flight (TOF)	-La synchronisation de l'heure n'est pas requise, ce qui réduit les exigences matérielles.	- L'exigence d'une communication bidirectionnelle le rend énergivore.
La télémétrie bidirectionnelle (TWR)	-la synchronisation du système n'est pas requise -Déploiement facile -La communication bidirectionnelle permet les données et le contrôle de la liaison descendante	-Consommation d'énergie plus élevée car les appareils utilisent une communication bidirectionnelle - des mois à un an d'autonomie de la batterie (selon le cas d'utilisation). -Nombre limité d'appareils mobiles (par centaines)
Temps D'arrivée (TOA)	- Paramètres généralement bien estimés - Algorithme de positionnement simple - Précision plus élevée en milieu confiné	- Synchronisation d'horloge nécessaire entre le mobile et les stations de base - Nécessité d'avoir un trajet direct - Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur
Différence des temps d'arrivée (TDoA)	Paramètres généralement bien estimés - Algorithme de positionnement simple - N'exige pas la synchronisation entre le mobile et les stations de base	- Nécessité d'avoir un trajet direct - Synchronisation d'horloge - nécessaire entre les paires de stations de base - Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur
Angle d'arrivée (AoA)	- Moins de stations de base fixes nécessaires - Algorithme de positionnement simple	-Nécessité d'avoir le trajet direct - Coût d'implantation élevé - Précision faible

Tableau 2.1 : Récapitulatif des techniques de localisation [70]

Lors de l'utilisation de l'ultra-large bande, on peut utiliser une des deux techniques, la différence de temps d'arrivée (TDoA) et la distance bidirectionnelle (TWR) et la distance bidirectionnelle TWR sont illustrées dans le tableau suivant :

	TDoA	TWR
Synchronisation d'ancrage	Oui	Non
Frais généraux d'énergie	Faible	Haut
Flexibilité du protocole MAC hybride	Faible	Haut
Disponibilité des informations sur le poste	Du côté des infrastructures	Sur les deux cotés
Domaines d'applications	Des endroits où des environnements relativement vides, comme les sports de plein air, les entrepôts, etc.]	Des endroits où l'environnement est compliqué comme les usines de fabrication, les centrales électriques, les usines chimiques, les immeubles de bureaux, etc.

Tableau 2.2 : Les principales différences entre TDoA et TWR [71]

2.4.1. Implémentation de la technique TWR avec le DW1000 :

Cela dépend de: l'endurance de Tag, la précision de l'emplacement, la capacité de Tag d'une seule zone, l'environnement d'installation, si tag prend en charge le contrôle inverse

des données (comme les vibrations), etc. En conclusion, nous avons présenté dans les sections précédentes, les méthodes usuelles des systèmes de localisation en relevant les avantages et les limites de chacune. Le système étudié utilise d'une part, des paramètres temporels et doit permettre d'autre part, à un objet mobile de se positionner dans un environnement confiné, riche en trajets multiples et NLOS. De ce fait, la méthode adéquate parmi toutes celles qui ont été présentées est la métrique temporelle basée sur la TWR. Pour permettre au mobile de calculer sa position, on a recours à des algorithmes. Par exemple, avec un nombre d'émetteurs supérieur à 4, on utilise la méthode des moindres carrés puis ces données seront filtrées avec le filtre de Kalman. Nous détaillerons dans la section suivante du chapitre plus l'utilisation de cet algorithme et la fusion de capteurs inertiels pour une meilleure précision.

2.5. Algorithme de positionnement statique :

En raison de la puissance de calcul extrêmement faible disponible sur le microcontrôleur utilisé, une méthode d'estimation de position statique simple est mise en œuvre. L'équation de distance donnée en (2.16) peut être réécrite sous la forme classique d'une sphère [73] Pour le réseau TWR, nous supposons que le tag est connecté à différents points d'ancrage, et ces points d'ancrage sont capables de mesurer la distance entre le tag et les Anchors via les paramètres TOF :

:

$$\hat{d}_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + \eta_i = |z_i - P| + \eta_i \quad (2.16)$$

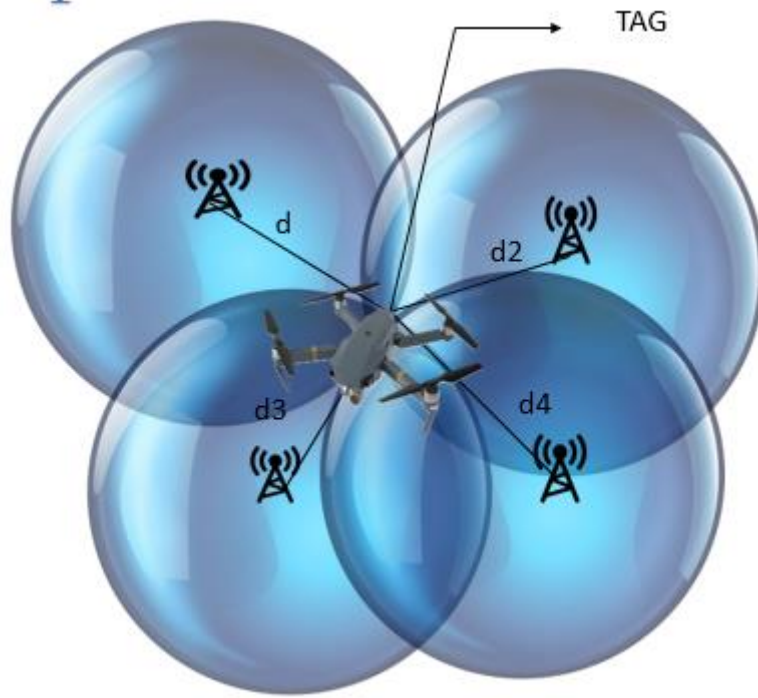


Figure 2.8: illustration de la position en 3D en utilisant 4 ancors

D'où $z_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ représente la position du point d'ancrage, $P = [x \ y \ z]^T$ représente la position du nœud cible (tag) et η_i est l'erreur de mesure dans $\hat{d}_i$ qui résulte de perturbation de l'estimation du TOF. On suppose que η_i sont des processus gaussiens indépendants avec une moyenne de zéro et des variances $\{\sigma_i^2\}$ l'obtention de toutes les mesures de portée dans (2.16) conduit aux équations incohérentes suivantes (avec $i = 4$) :

En utilisant 4 ancres on obtient

$$\begin{aligned}
 \hat{d}_1^2 &= (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 + \eta_1 \\
 \hat{d}_2^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 + \eta_2 \\
 \hat{d}_3^2 &= (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 + \eta_3 \\
 \hat{d}_4^2 &= (x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2 + \eta_4
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Nous adoptons différents algorithmes de localisation LLS (linear least squares) pour convertir les mesures non linéaires en modèles linéaires dans p et donner une forme

proche de l'estimation de la localisation .On choisissons la $r_{ième}$ anchor comme anchor de référence pour l'exemple sans perte de généralité. En soustrayant l'expression non linéaire de le $r_{ième}$ anchor dans (2.17), nous obtenons [74] :

$$2(x_i - x_r)x + 2(y_i - y_r)y + 2(z_i - z_r)z = \hat{d}_r^2 - \hat{d}_i^2 - k_r + k_i \quad (2.18)$$

Où nous définissons :

$$k_i = x_i^2 + y_i^2, i = 1, 2, 3 \dots, N.$$

Après avoir soustrait une des quatre autres équations :

$$2 \begin{bmatrix} z_2 - z_1 \\ z_3 - z_1 \\ z_4 - z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_1^2 - \hat{d}_2^2 \\ \hat{d}_1^2 - \hat{d}_3^2 \\ \hat{d}_1^2 - \hat{d}_4^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_2^T z_2 - z_1^T z_1 \\ z_3^T z_3 - z_1^T z_1 \\ z_4^T z_4 - z_1^T z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{12} \\ \eta_{13} \\ \eta_{14} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Ou une forme matricielle similaire :

$$AP = b_{meas} + b_{const} + \eta \quad (2.20)$$

On utilise la méthode des moindres carrés, cette dernière est souvent appliquée dans l'ajustement des données pour améliorer la précision de l'estimation [75]. Le résultat du meilleur ajustement est supposé à réduire la somme des erreurs quadratiques ou des résidus qui sont définis comme étant les différences entre la valeur observée ou expérimentale et la valeur ajustée correspondante donnée dans le modèle. L'équation (2.20) devient :

$$P = (A^T A)^{-1} A^T (b_{meas} + b_{const}) \quad (2.21)$$

Considérons le terme de bruit dans l'équation. (2.20) étant donné que le terme est une combinaison de 2 variances de mesure, Puisque l'estimation de position est corrompue par le terme de bruit donné, le but est maintenant de minimiser l'impact de celui-ci sur l'estimation de position. Cette minimisation est gérée de deux manières : le positionnement optimal des nœuds d'ancrage et l'introduction du filtre de Kalman en utilisant la dynamique du système et les mesures disponibles [73].

2.6. Positionnement optimal de l'ancrage :

A partir des distances mentionnées dans (2.5) et (2.16) on obtient la fonction suivante :

$$f_i(z_i, p, T) := \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - c.T \quad (2.22)$$

Avec l'ajout de plus de nœuds d'ancrage en (2.22), puis en prenant la dérivée de ce vecteur par rapport à chacune des variables l'équation ça devient sous une forme vectorielle en dérivant après le vecteur le résultat est une matrice Nx4 définie comme suit :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x}{\|Z_1 - p\|} & \frac{y_1 - y}{\|Z_1 - p\|} & \frac{z_1 - z}{\|Z_1 - p\|} & -1 \\ \frac{x_2 - x}{\|Z_2 - p\|} & \frac{y_2 - y}{\|Z_2 - p\|} & \frac{z_2 - z}{\|Z_2 - p\|} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

On peut extraire la matrice de covariance d'après la loi de propagation de l'erreur également connue sous le nom de loi de covariance (2.24)

$$\begin{aligned} C_p &= [(A^T W A)^{-1} A^T W] C_{\Delta p} [(A^T W A)^{-1} A^T W]^T \\ &= (A^T C_{\Delta p}^{-1} A)^{-1} \end{aligned} \quad (2.24)$$

D'où une matrice de poids (W) caractérise les différences dans les erreurs des mesures simultanées

Δp Est le vecteur de longueur n des différences entre les valeurs de pseudo distance correctes en fonction des coordonnées du point de linéarisation.

A Est la matrice Nx4 et C_p matrice de covariance des estimations de paramètres.

L'équation (2.24) représente une relation fondamentale largement utilisée en science et en ingénierie, non seulement pour l'analyse des mesures réelles, mais aussi pour les études Expérimentales et de conception de systèmes.

Dans l'équation (2.24), si nous supposons que les erreurs de mesure et de modèle sont les mêmes pour toutes les observations avec un écart type particulier (σ) alors $C_{\Delta p}$ est (dans lequel I_6^2 est la matrice d'identité). L'expression de covariance de C_p se simplifie ainsi en [76] :

$$Cp = \sigma^2(A^T A)^{-1} \quad (2.25)$$

Cette matrice de covariance a une relation directe avec une métrique connue sous le nom de dilution de précision, le terme DOP signifie Dilution Of Précision est une valeur de probabilité pour l'effet géométrique sur la précision, La position calculée peut varier en fonction des satellites utilisés pour la mesure. Différentes géométries de satellites peuvent amplifier ou réduire l'erreur de position.

Le GDOP est calculé à partir des relations géométriques entre la position du récepteur et les positions des satellites que le récepteur utilise pour la navigation. Les facteurs déterminant le GDOP total (DOP géométrique) sont [77] :

- PDOP = Position Dilution of Précision (3-D), parfois le DOP sphérique
Est la contribution de la géométrie relative de la constellation de satellites et de la position de l'utilisateur aux coordonnées de position calculées en 3D, c'est-à-dire la position 2D ainsi que l'altitude.
- HDOP = DOP horizontal (Latitude, Longitude)
Est la contribution de la géométrie relative de la constellation de satellites et de la position d'utilisateur aux coordonnées de position horizontale calculées, c'est-à-dire la position 2D.
- VDOP = Dilution Verticale de Précision (Hauteur)
Est la contribution de la géométrie relative de la constellation de satellites et de la position de l'utilisateur à la hauteur calculée, c'est-à-dire l'altitude.
- TDOP = temps de dilution de précision
Est la contribution de la géométrie relative de la constellation de satellites et de la position de l'utilisateur au temps calculé [78].

Bien que chacun de ces termes GDOP puisse être calculé individuellement, ils sont formés à partir de covariances et ne sont donc pas indépendants les uns des autres. Un TDOP (dilution temporelle de la précision) élevé, par exemple, provoquera des erreurs d'horloge du récepteur qui finiront par entraîner une augmentation des erreurs de position. Les positions avec une valeur DOP inférieure constituent généralement de meilleurs résultats de mesure que ceux avec un DOP plus élevé. Une valeur DOP faible indique une probabilité plus élevée de précision.

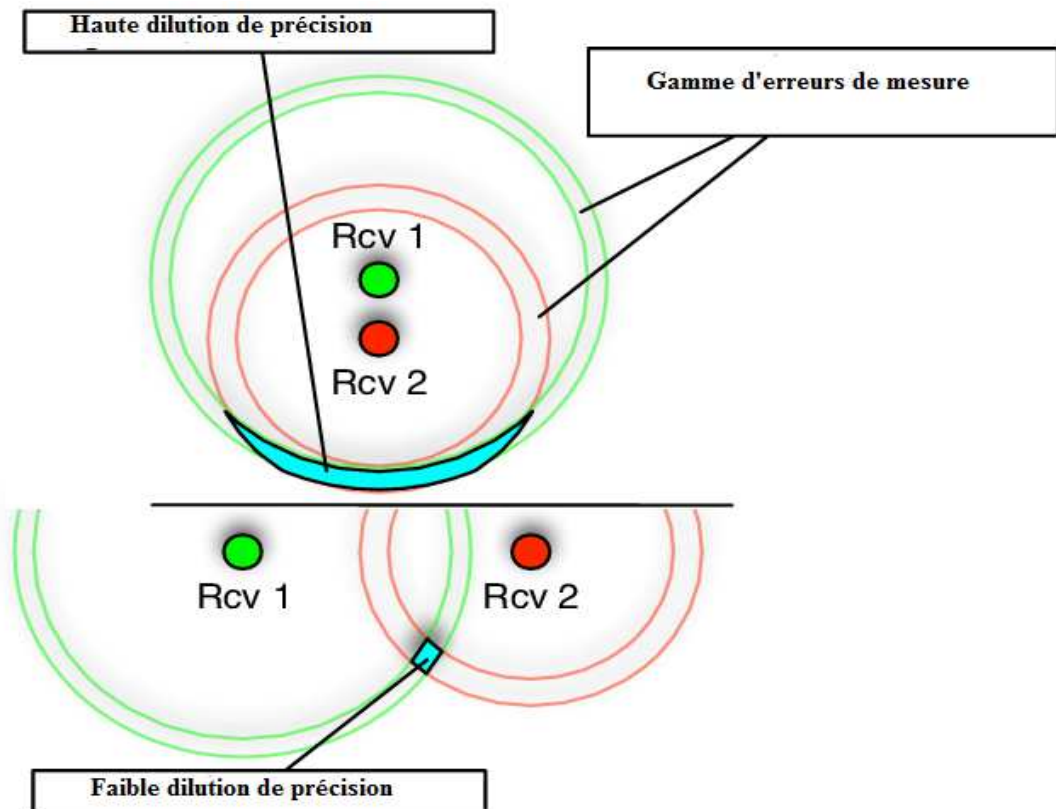


Figure 2.9 : Dilution géométrique de précision [77]

Les cercles indiquent les erreurs de mesure des récepteurs respectifs : les intersections montrent la zone où se trouve le véritable emplacement de l'objet mesuré.

Il est important de comprendre que le calcul du DOP ne nécessite nullement la réception d'un signal GNSS ou un quelconque traitement sur ce signal. En effet, la seule connaissance de la position et du mouvement des satellites est suffisante pour calculer le DOP au-dessus d'une position déterminée. Ainsi, un récepteur peut donc fournir à son utilisateur une valeur du DOP à partir des éphémérides contenues dans le message de navigation. Le processus du calcul du DOP est schématisé à la figure (2.9)

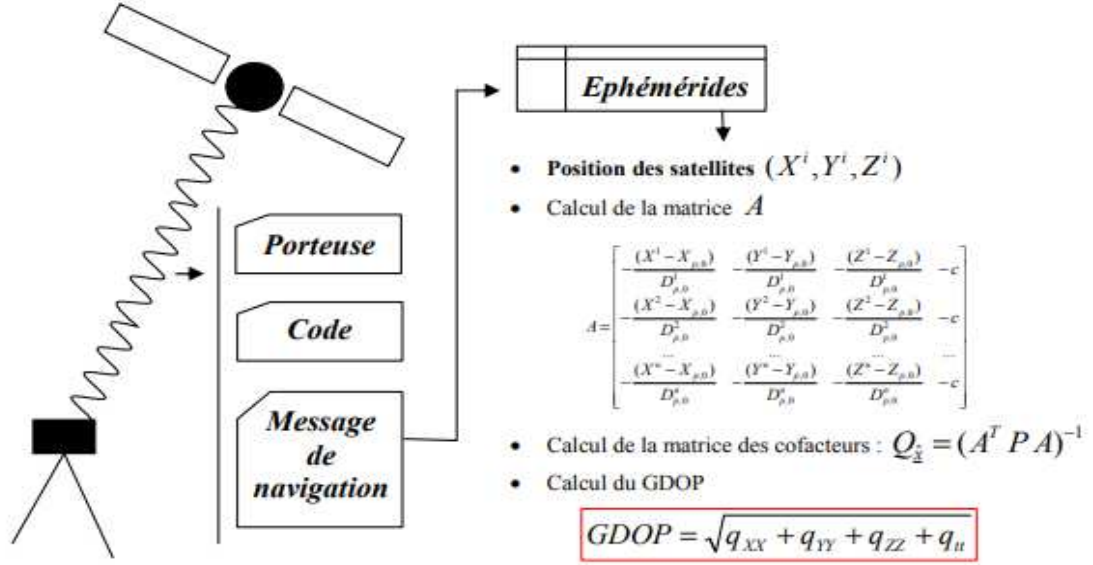


Figure 2.10 : Processus permettant de calculer le GDOP [79]

La métrique DOP sera grande avec un mauvais placement d'Anchor et beaucoup plus petite avec un meilleur placement d'Anchor. En minimisant la matrice de covariance, la dilution de la précision sera minimisée et les positions d'ancrage optimales seront déterminées. Cette minimisation doit être accomplie sur tout l'espace où le Tag sera situé et en tant que telle conduit à la fonction de coût (2.23).

$$F(p, zi) := \frac{1}{D} \iiint_D \|Cp\| F \quad (2.23)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, N\}$$

Pour 3-Dimensions, où $ré$ est défini comme l'espace dans lequel se situera la cible, de même pour les 2-Dimensions cette fonction de coût est (2.24) :

$$F(p, zi) := \frac{1}{D} \iint_D \|Cp\| F \quad (2.24)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, N\}$$

D'où N désigne le nombre de stations de base utilisées.

Dans les deux cas, la fonction de coût est une combinaison non linéaire d'un grand nombre de variables. Puisqu'une solution analytique ne peut pas être trouvée, des méthodes numériques doivent être utilisées. Il y a plusieurs façons d'atteindre cette

minimisation telles que la fonction « fmincon » sur MATLAB (Minimisation non linéaire contrainte multidimensionnelle) cette dernière est basée sur les méthodes de point intérieur. Les méthodes de point intérieur (également appelées méthodes de barrière ou IPM) sont une certaine classe d'algorithmes qui résolvent des problèmes d'optimisation convexe linéaires et non linéaires.

La programmation mathématique, branche de l'optimisation, s'occupe de la minimisation sous contraintes d'une fonction à plusieurs variables, schéma très général s'appliquant à de nombreuses situations pratiques dans beaucoup de domaines (minimisation de coûts, durées, etc.)

Dans le cas d'une fonction et de contraintes linéaires (programmation linéaire), on dispose une méthode efficace de résolution. Cet algorithme a connu depuis lors de nombreuses améliorations, et est utilisé dans la majorité des logiciels commerciaux [80]. Cependant, méthode de point intérieur a été découverte par le mathématicien soviétique II Dikin en 1967 et réinventée aux États-Unis au milieu des années 1980. En 1984, Narendra Karmarkar a développé une méthode de programmation linéaire appelée algorithme de Karmarkar, qui s'exécute en temps polynomial et est également très efficace dans la pratique. Il a permis de résoudre des problèmes de programmation linéaire qui dépassaient les capacités de la méthode du simplexe. Contrairement à la méthode du simplexe, elle atteint une meilleure solution en parcourant l'intérieur de la région des possibles. La méthode peut être généralisée à une programmation convexe basée sur une fonction barrière auto-concordante utilisée pour coder l'ensemble convexe.

Tout problème d'optimisation convexe peut être transformé en minimisant (ou maximisant) une fonction linéaire sur un ensemble convexe en se convertissant à la forme épigraphe. L'idée d'encoder l'ensemble réalisable en utilisant une barrière et de concevoir des méthodes de barrière a été étudiée par Anthony V. Yuri Nesterov, et Arkadi Nemirovski a proposé une classe spéciale de telles barrières qui peuvent être utilisées pour coder n'importe quel ensemble convexe. Ils garantissent que le nombre d'itérations de l'algorithme est borné par un polynôme dans la dimension et la précision de la solution.

La percée de Karmarkar a revitalisé l'étude des méthodes des points intérieurs et des problèmes de barrière, montrant qu'il était possible de créer un algorithme de programmation linéaire caractérisé par une complexité polynomiale et, de plus, compétitif avec la méthode du simplexe. Déjà la méthode ellipsoïde de Khachiyan était

un algorithme en temps polynomial ; cependant, il était trop lent pour présenter un intérêt pratique.

La classe des méthodes de point intérieur de suivi de chemin primal-dual est considérée comme la plus réussie. L'algorithme prédicteur-correcteur de Mehrotra fournit la base de la plupart des implémentations de cette classe de méthodes [81].

La fonction Matlab « fmincon » fournit une solution minimale locale, plusieurs conditions initiales doivent être essayées pour s'assurer que la solution est le plus petit minimum local. Ces minimisations sont effectuées à la fois pour les cas 2D et 3D, avec des résultats pratiques comparés aux résultats théoriques pour le cas 2D. Il est évident pour le cas où les stations de base sont placées en forme de losange que l'amplitude de la matrice de covariance croît assez grande dans les coins montrant le placement sous-optimal des nœuds d'ancrage. Dans les zones où la matrice de covariance grandit, les mesures deviennent assez peu fiables et, en tant que tel, cet ensemble de placements d'ancres ne doit pas être utilisé.

Les résultats de la fonction de coût des deux placements sont mesurés en plaçant le nœud cible à plusieurs emplacements autour de la zone prédéfinie et en prenant plusieurs mesures à chaque emplacement [73].

2.7. Filtrage de Kalman pour les estimations de position et de vitesse :

2.7.1. Introduction :

Le filtre de Kalman est un processus optimal d'estimation d'état appliqué à un système dynamique qui implique des perturbations aléatoires. Plus précisément, le filtre de Kalman fournit un algorithme récursif linéaire, non biaisé et d'erreurs minimales pour estimer de façon optimale l'état inconnu d'un système dynamique à partir de données bruitées prises en temps réel [82]. C'est un outil mathématique puissant et particulièrement utile dans le monde de l'embarqué [83].

La force de ce filtre est sa capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même. En effet, pour appliquer un filtre de Kalman, il faut avant tout modéliser le système pour

lequel on veut estimer les paramètres, de manière linéaire. Des variantes du filtre de Kalman existent pour la prise en compte de modèles non linéaires (Extended Kalman Filter, Unscented Kalman Filter). Dans une méthode d'estimation classique (par exemple, la méthode des moindres carrés), une simple erreur dans la modélisation du système entraîne inévitablement une erreur au niveau de l'estimation. L'outil Kalman fournit un vecteur contenant les paramètres estimés, mais aussi une matrice de covariance de l'erreur. Cette matrice nous renseigne donc sur la précision de l'estimation, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications. Un autre atout du filtre de Kalman est que la convergence de cette erreur est garantie [84].

Le fonctionnement du filtre de Kalman peut se diviser en deux étapes :

- Une première étape de prédiction de l'estimation selon le modèle du système. Pour ce faire, le filtre de Kalman reprend l'estimation précédente des paramètres et de l'erreur et prédit les nouveaux paramètres et la nouvelle erreur en fonction de la modélisation du système.
- La seconde étape va faire la mise à jour de cette prédiction grâce aux nouvelles mesures. Ces mesures (par définition bruitées) vont permettre d'obtenir une estimation des paramètres et de l'erreur à partir de la prédiction faite. Si jamais le modèle comporte des erreurs, cette étape de mise à jour permettra de les rectifier.

2.7.2. Algorithme du filtre de Kalman :

Pour réduire les effets du bruit de mesure, un filtre de Kalman utilisant la dynamique de translation du quadrotor est mis en œuvre avec a_β étant la mesure de l'accéléromètre fournie par l'IMU avec :

$$\dot{p} = v \quad (2.25)$$

$$\dot{v} = u$$

Avec
$$u := g \hat{e}_3 + R a_\beta \quad (2.26)$$

Les filtres de Kalman sont utilisés pour estimer des états basés sur des systèmes dynamiques linéaires au format d'espace d'état. Le modèle de processus définit l'évolution de l'état à partir du temps $k + 1$ au temps k comme [85] :

$$X_{K+1} = \Phi_{xk} + B_{uk} \quad (2.27)$$

D'où Φ est la matrice de transition d'état appliquée au vecteur d'état précédent et B est la matrice d'entrée de contrôle appliquée au vecteur de contrôle B_{uk} .

Le modèle de processus est associé au modèle de mesure qui décrit la relation entre l'état et la mesure au pas de temps actuel k comme :

$$Yk = C_{xk} \quad (2.28)$$

Où Yk est le vecteur de mesure, C est la matrice de mesure.

Veuillez noter qu'en supposant que les indices des matrices Φ, B, C, Q et R sont invariants dans le temps dans la plupart des applications, Bien que la matrice de covariance soit considérée comme reflétant les statistiques de bruit, dans de nombreuses applications pratiques, les vraies statistiques de bruit sont inconnues ou non gaussiennes. Par conséquent, Q et R sont généralement utilisés comme paramètres de réglage (noise model), et les utilisateurs peuvent ajuster ces paramètres pour obtenir les performances souhaitées.

Prédiction :

Estimation de l'état prévu	$\hat{x}_k^- = \Phi x_{k-1} + B_{uk}$
Covariance d'erreur prévue	$P_k^- = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q$

Mettre à jour:

Gain de Kalman	$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R)^{-1}$
Estimation d'état mise à jour	$x_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C \hat{x}_k^-)$
Covariance d'erreur mise à jour	$P_k = P_k^- - K_k C P_k^-$

Tableau 2.3 : Résumé d'algorithme du filtre Kalman

Dans les équations ci-dessus, l'opérateur chapeau, $\hat{\cdot}$, signifie une estimation d'une variable. C'est-à-dire, $\hat{X}$ est une estimation de X . Les exposants $-$ et $+$ désignent respectivement les estimations prévues (antérieures) et mises à jour (postérieures). L'estimation d'état prédite est élaborée à partir de l'estimation d'état mise à jour. Le nouveau terme P est appelée covariance d'erreur d'état. Le filtre estime la mesure actuelle en multipliant l'état prédit par la matrice de mesure. Après avoir obtenu l'estimation d'état mise à jour, le filtre de Kalman calcule la covariance d'erreur mise à jour, P_k , qui sera utilisé au prochain pas de temps. Notez que la covariance d'erreur mise à jour est inférieure à la covariance d'erreur prédite, ce qui signifie que le filtre est plus sûr de l'estimation de l'état une fois que la mesure est utilisée dans l'étape de mise à jour [86].

Nous considérons uniquement la position et la vitesse, en omettant les informations d'attitude. La position et la vitesse tridimensionnelles comprennent le vecteur d'état :

$$X_k = [p_k^T \ v_k^T] \text{ D'où } y_k = p_k$$

Les matrices Φ, B, C sont définies par :

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Ainsi que les matrices Q et R sont :

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{wx}^2 T^3/3 & \sigma_{wx}^2 T^2/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{wx}^2 T^2/2 & \sigma_{wx}^2 T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{wy}^2 T^3/3 & \sigma_{wy}^2 T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{wy}^2 T^2/2 & \sigma_{wy}^2 T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{wz}^2 T^3/3 & \sigma_{wz}^2 T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{wz}^2 T^2/2 & \sigma_{wz}^2 T \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{vx}^2/T & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{vy}^2/T & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{vz}^2/T \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.7.2.1. Implémentation des résultats du filtre Kalman :

2.7.2.1.1. Objectifs et simulations :

Le premier objectif de cette étude était l'application du filtre, Nous allons maintenant tenter d'évaluer si l'utilisation du filtre de Kalman peut améliorer les opérations de prédiction en temps réel et ce, principalement au niveau de la précision d'une prédiction.

Les simulations sont effectuées dans MATLAB, et elles sont exécutées pour faire se déplacer les anchors au long de la trajectoire indiquée ci-dessous

$$x_t = 1.5 + 1.5 \sin \left(\frac{2\pi t}{100} \right)$$

$$y_t = 2.5 + 1.5 \cos \left(\frac{2\pi t}{100} \right)$$

$$z_t = 1.25 + 2 \cos \left(\frac{\pi t}{100} \right)$$

La trajectoire obtenue est montrée en Figure (2.10), où chaque point d'ancrage est situé sur xyz

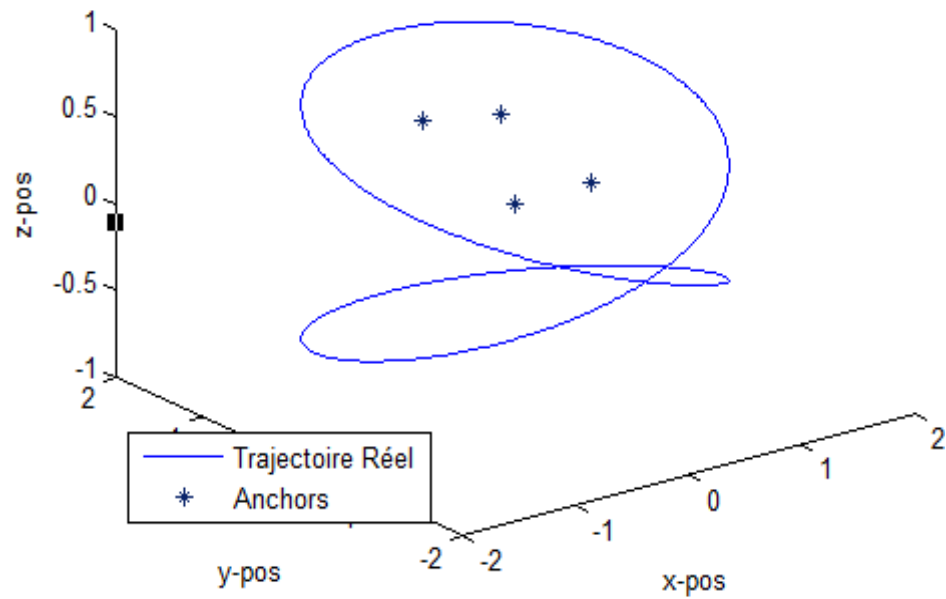


Figure 2.11: Position Réel du Drone et positionnement des anchors

Pour commencer, On a choisi un système discret pour pouvoir le simuler, un bruit sera ajouté. Considérons le terme de bruit dans l'équation. (2.17) car dans la simulation, si nous n'avons pas de bruit le résultat s'éloignera fortement de la réalité. Le système choisi est régi par les matrices suivantes Φ, B, C, Q et R .

Après avoir effectué la mesure de distance référencée en (2.15), les résultats obtenus lors de la simulation nous montrent la position mesurée

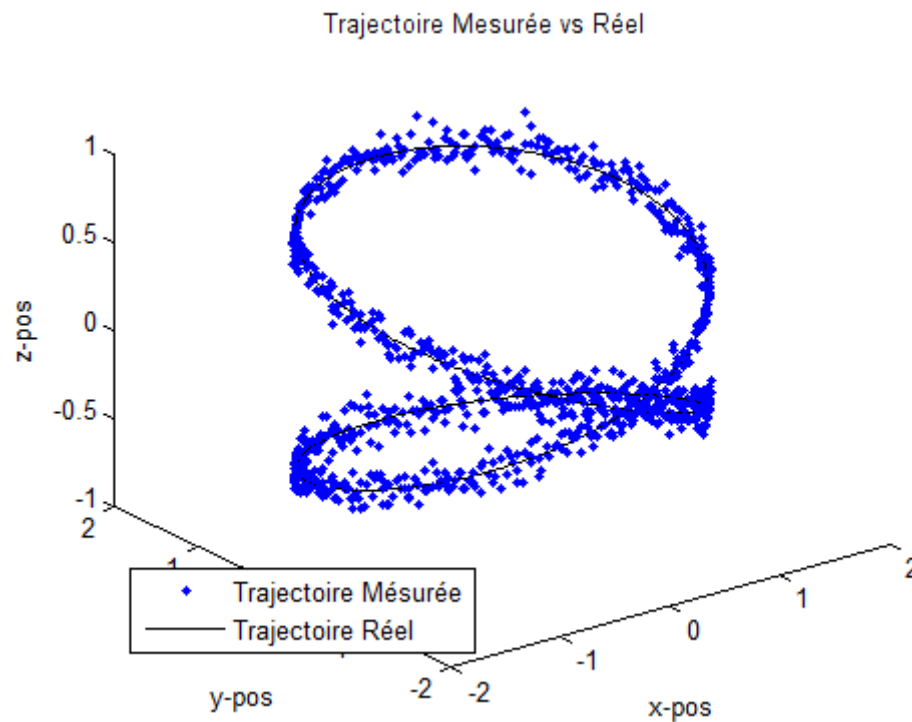


Figure 2.12 : Position réel et Position mesurée

Nous avons analysé les différentes étapes de construction de la matrice de conversion et le bruit du modèle d'évolution

Dans ce cas l'utilisation des équations du filtre de Kalman est nécessaire, Nous avons analysé les différentes étapes de construction de la matrice de conversion et le bruit du modèle d'évolution En utilisé les équations de mise à jour du temps ainsi que celle de la mise à jour des mesures. En tenons compte les mesures passées pour prédire l'état futur lors de la mise à jour. En effet, la correction sera réalisée donc nous pourrons réduire l'erreur de l'estimation en combinant les états simulés précédemment dans le filtre de Kalman.

Trajectoire Réel vs Mesurée et implémentation du Filtre Kalman

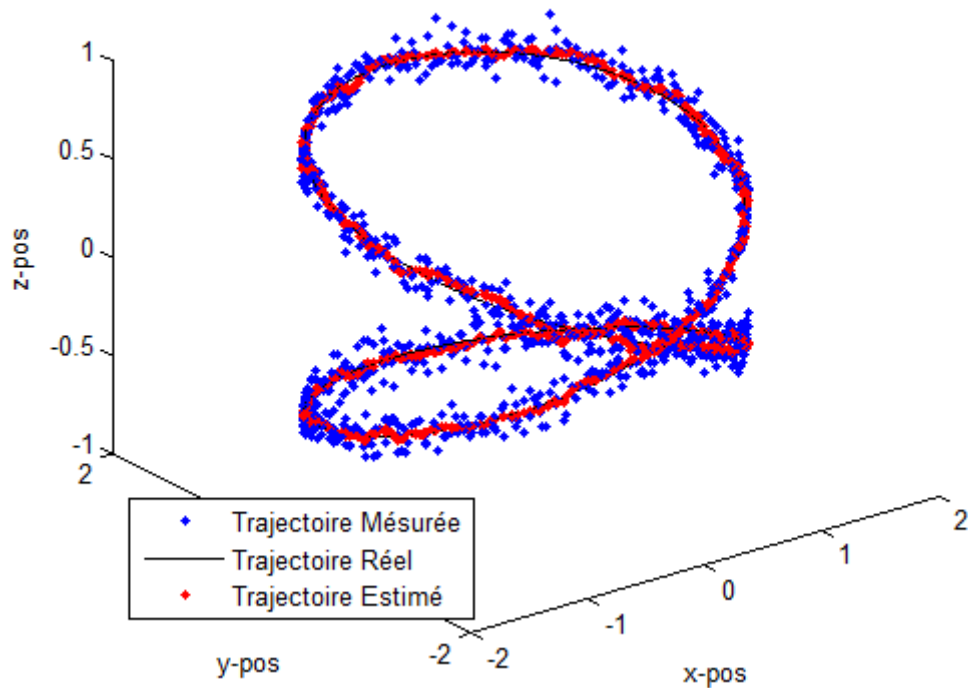


Figure 2.13 : Résultat de simulation du Filtre Kalman

D'après la figure (2.13) nous pouvons voir le fonctionnement du filtre Kalman cette dernière montre comment l'erreur a été réduite donc on peut observer clairement les mesures estimées.

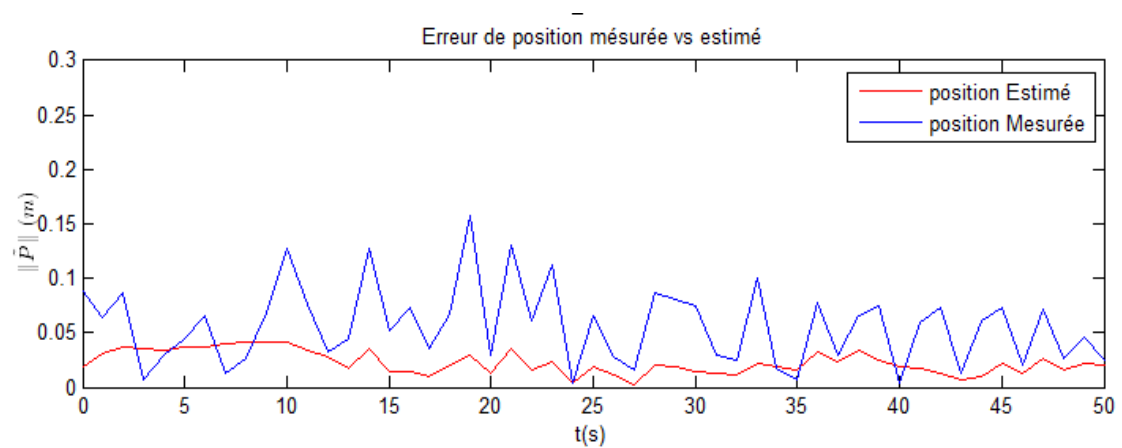


Figure 2.14 : Résultat de simulation de l'erreur de position Mesurée (implémentation du filtre Kalman)

La figure (2.14) montre la diminution des valeurs de l'erreur moyenne du filtre de Kalman pour atteindre des valeurs proches de zéro, ceci signifie la diminution de l'influence de la mesure au niveau de la mise à jour de l'estimation des paramètres du modèle et des erreurs associées.

En faisons un travail identique pour le filtre Kalman nous avons eu une estimation de position comme il est illustré.

Dans un autre contexte nous allons appliquer le filtre Kalman pour réduire l'erreur de la vitesse comme il est montré ci-dessous :

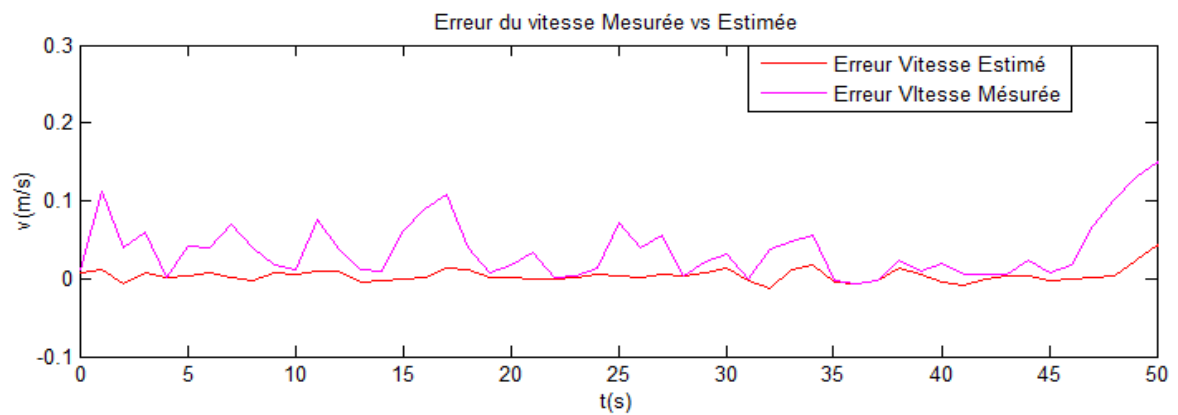


Figure 2.15 : L'erreur de la vitesse Estimée vs Mesurée

Dans le cas de la vitesse et comme il est bien illustré sur la figure (2.15) on voit la précision de la vitesse estimée par rapport à celle mesurée d'où l'erreur a été bien réduite en appliquant le filtre Kalman donc on peut conclure de ce dernier est très utile même pour des applications en temps réel très compliquées.

2.8. Conclusion:

Ce chapitre a introduit les différentes méthodes de localisation, comme illustré, chacune des techniques de localisation a ses avantages et ses inconvénients. Dans notre projet, nous avons utilisé la méthode de télémétrie bidirectionnelle TWR, car ce protocole est celui qui estime mieux la distance entre les points d'ancrage, et c'est aussi le protocole le plus préféré dans le monde réel, parce qu'il a la capacité de répondre aux changements de temps de réponse et de décalage d'horloge.

Le placement des anchors est un facteur critique qui détermine la précision des systèmes de localisation, nous avons présenté une méthodologie pour l'optimisation du placement de ces derniers par un critère de dilution de précision (DOP). Un filtre bien connu appelé le filtre de Kalman est utilisé, ce filtre nous a permis en effet d'estimer l'état d'un système, en fonction de son état précédent, des commandes appliquées et de mesures bruitées. et simulations obtenus.

Le chapitre suivant aura la tâche de décrire la présentation exhaustive du matériel utilisé dans notre projet ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

Résultats pratiques et montages d'expériences

3. Résultats pratiques et montages d'expériences

3.1. Introduction :

Ces dernières décennies, une grande partie des activités de recherche s'est accentuée autour de l'étude du développement de systèmes de positionnement intérieur pour assurer

une continuité de service dans ces environnements. Les systèmes les plus étudiés dans ce domaine demeurent incontestablement les systèmes de localisation 2-D exogènes et de type radar. Le challenge reste toujours d'actualité en ce qui concerne les systèmes de positionnement 3-D endogènes [87]. Dans les chapitres précédents, nous avons présenté respectivement les technologies des systèmes utilisées dans la localisation à grande échelle existantes ainsi qu'une comparaison entre ces derniers qui nous a facilité le choix. Afin d'améliorer la précision de la position une technique de filtrage Kalman (KF) a été mise en œuvre, et c'était notre sujet dans le deuxième chapitre. Ce chapitre décrira la partie pratique du projet réalisé, y compris les décisions de conception importantes et les motivations liées aux objectifs du projet réalisé au sein du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) qui nous a fourni toutes les ressources matérielles, équipements, et informationnelles nécessaires qui ont contribué à la mise en œuvre et concrétisation de notre projet. Nous présentons les distincts de notre nouveau système de localisation en étalant les différentes étapes :

- ❖ Le choix du matériel
- ❖ La conception
- ❖ Le choix du plan
- ❖ L'implémentation

La technologie ultra-large bande (UWB) s'est récemment tournée vers l'électronique grand public et les communications [88]. Parallèlement à l'augmentation des connexions sans fil et à un spectre de fréquences radio encombré, la technologie UWB offre une solution en pouvant coexister avec les systèmes radio actuels. Par rapport à la communication sans fil dominante actuelle, qui est principalement basée sur des radios à bande étroite, la communication UWB présente un avantage en termes de débit de données, de coût d'équipement, de capacités de télémétrie et de consommation d'énergie. Parallèlement à l'augmentation du marché des appareils sans fil à faible consommation et à faible coût avec des capacités de positionnement, les systèmes UWB sont devenus un choix attrayant pour les applications sans fil actuelles et futures [89]. Le but de ce projet est de développer un prototype du système de localisation indoor sans fil en utilisant des modules ultra large bande. Comme la montre la figure ci-dessous, pour une localisation 3D, nous avons dû placer 4 anchor avec des attitudes différentes. Nous l'avons ensuite

organisé comme un processus en impliquant les tâches suivantes (qui ne sont pas séquencées dans cet ordre):

- a) Estimation de la position du Tag autour d'un ensemble des Anchors ;
- b) Sélection du meilleur sous-ensemble d'ancres pour obtenir l'estimation de position la plus précise pour la méthode d'estimation ;
- c) l'application d'un algorithme statique ;
- d) filtrer les positions estimées.

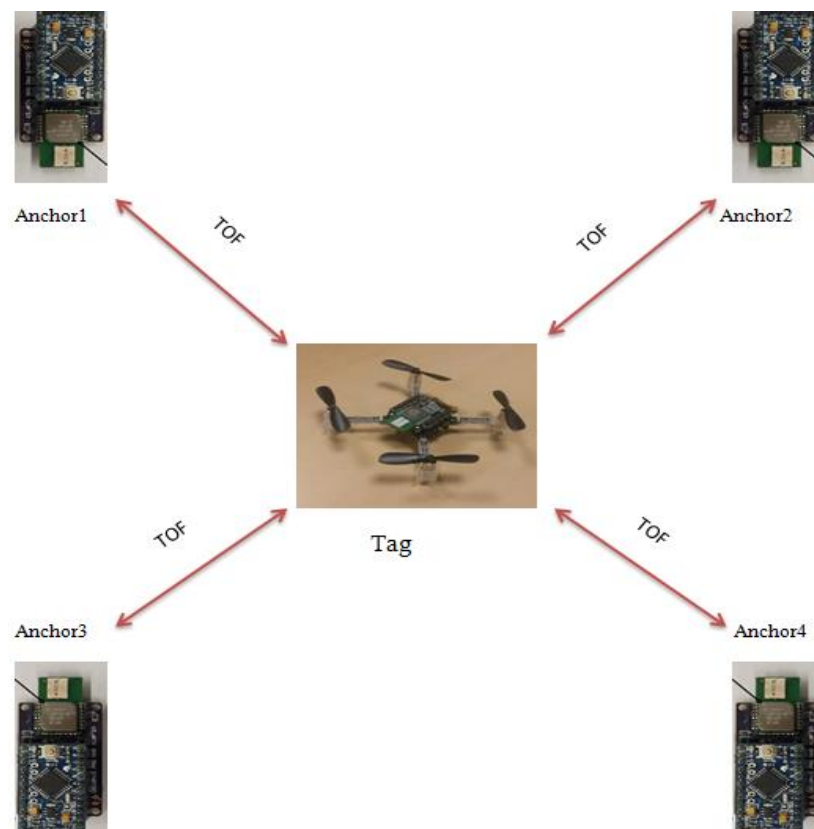


Figure 3.1 : Estimation de la position du drone

3.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL :

L'expérimentation a été réalisée au Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), au niveau de la Division Productique et Robotique, Equipe conception des systèmes embarqués CSE depuis le mois de mai jusqu'à la mi-septembre 2021. Cette réalisation a nécessité l'utilisation d'un matériel Spécifique et des méthodes d'études adéquates qui nous étaient fournies par le centre de recherche CDTA.

Dans le but d'évaluer les performances du système de localisation indoor proposé, nous avons mis en place un prototype expérimental que nous avons conçu autour d'un ensemble de moyens matériels et logiciels dédiés. En effet cette section présente le matériel lié à la fois aux Anchors et au Tag qui forme l'ensemble du système, nous avons eu recours aux dispositifs suivants :

1. module DWM1000
2. Circuit PCB
3. Arduino pro mini
4. Capteur IMU

3.2.1. Mise en œuvre matérielle :

Les composants des Anchors et du Tag du prototype développé ont presque la même configuration matérielle. Un module de localisation préemballé (DecaWave DWM1000) constitue la base du système. Ce module se compose d'une puce de localisation et de communication intérieure (DW1000 IC), d'une antenne de puce et de composants de soutien. La distance est calculée en utilisant la méthode de télémétrie bidirectionnelle(TWR) entre le Tag et l'anchor. Le module DWM1000 est connecté via une carte PCB à un microcontrôleur (ATMega328).Ce dernier est connectée à un ordinateur via une carte de sortie FTDI et un câble USB pour l'enregistrement des données. Un aperçu du système matériel des deux cartes est présenté en bas.

3.2.1.1. Aperçu de l'Anchor :

Il se compose d'un émetteur-récepteur DWM1000 et d'une carte Arduino Pro mini. Le μ c (microcontrôleur) gère la lecture des mesures (données) et leurs envois au Tag. Le module DWM1000 est alimenté grâce à un câble USB.

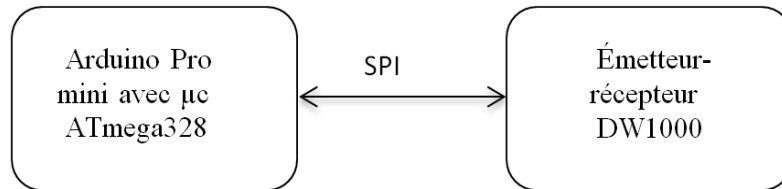


Figure 3.2 : aperçu du système matériel d'un Anchor

3.2.1.2. Aperçu du Tag:

Un Tag se compose d'un émetteur-récepteur DWM1000 UWB et il est alimenté par l'Arduino. Il envoie les mesures du capteur à l'ordinateur via la connexion Ftdi.

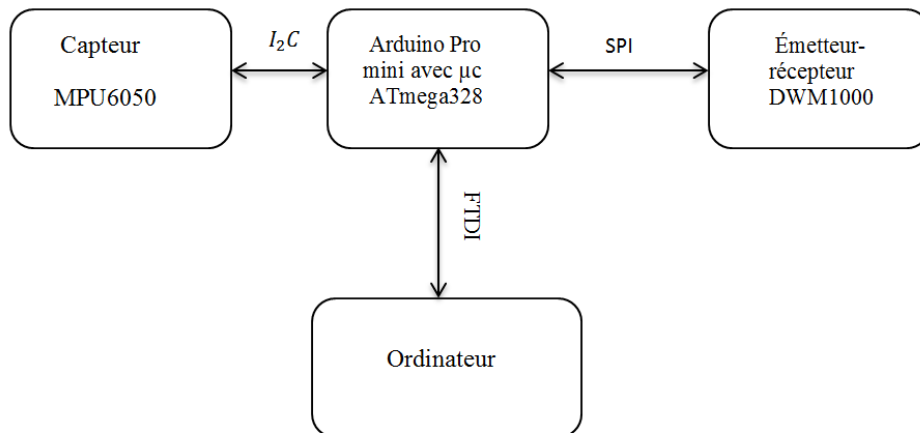


Figure 3.3 : aperçu du système matériel du Tag

3.2.1.3. Module DW1000:

Le module DWM1000 est une implémentation UWB IEEE 802.15.4-2011. Les composants RF (Radio Frequency), l'émetteur-récepteur UWB Decawave DW1000, et

d'autres composants sont intégrés au module. Le DWM1000 permet une intégration rentable et peu complexe des communications UWB et des fonctions du TWR, ce qui accélère considérablement la mise en œuvre de la conception. Le module DWM utilise des signaux ultra large bande pour mesurer les distances. Des signaux radio sont envoyés entre les modules, ce qui permet de calculer le temps de vol d'un module à l'autre et donc une distance adéquate avec une précision de 10 cm jusqu'à 6,8 Mbps. Le module DWM1000 est basé sur le DW1000 Ultra Wideband (UWB) de Decawave. Il intègre l'antenne, tous les circuits RF et les composants analogiques ainsi que les circuits de gestion de l'alimentation et d'horloge dans un seul module. Un schéma de contrôle est mis en œuvre pour maintenir et optimiser les performances de l'émetteur-récepteur, comme indiqué dans la figure (3.4) ci-dessous. Le module contient un cristal de référence 38,4 MHz embarqué. Le cristal a été rogné en production pour réduire l'erreur de fréquence initiale à environ 2 ppm en utilisant le circuit interne d'ajustement des cristaux du DW1000. La mémoire Always-On (AON) peut être utilisée pour conserver les données de configuration du DWM1000 pendant les états de fonctionnement à plus faible puissance lorsque les régulateurs de tension sur puce sont désactivés. Ces données sont téléchargées automatiquement. L'utilisation de la mémoire DWM1000 AON est configurable. Les moniteurs de tension et de température sur puce permettent à l'hôte de lire la tension sur la broche VDDAON et les informations de température de la matrice interne du DW1000.

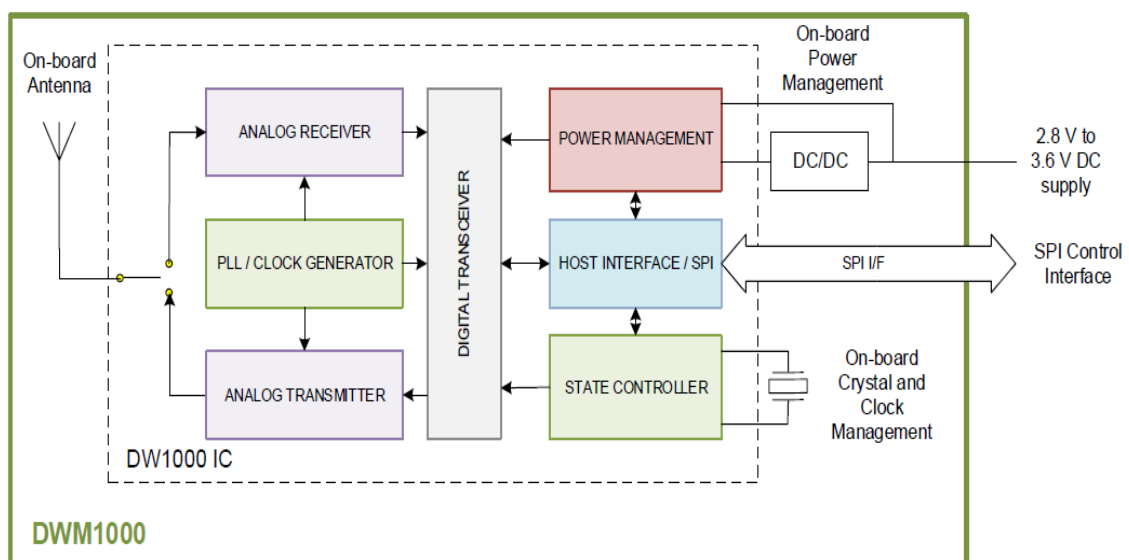


Figure 3.4 : Schéma fonctionnel de haut niveau

L'interface de communication hôte DW1000 est un SPI esclave uniquement et nécessite un contrôleur hôte de bus SPI maître externe pour communiquer avec le DW1000. Le microcontrôleur ATmega328 sur l'Arduino Pro mini agit comme le microcontrôleur hôte. La description des broches et les connexions entre le DWM1000 et la carte Arduino Pro mini sont répertoriées dans le tableau 3.1.

Signal	Broche DWM1000	E/S	La description	Broche Arduino
STn	3	E.S	Réinitialiser la broche	Broche 9
SPICSn	17	E.S	Sélection de puce SPI	Broche 10
SPIMOSI	18	E	Entrée de données SPI	Broche 11
SPIMISO	19	S.B	Sortie de données SPI	Broche 12
SPICLK	20	E	Horloge SPI	Broche 13
IRQ	22	E.S	Sortie de requête d'interruption du DWM1000 vers le processeur hôte.	Broche 2

Tableau 3.1 : Description des broches du DWM1000 utilisées et de la connexion correspondante à L'Arduino Pro mini

Explication des abréviations :

E : Entrée

E.S : Entrée / Sortie

S.B : Par défaut, sortie, niveau bas après réinitialisation.

P : Alimentation électrique

G : Terre

Les affectations des broches du module DWM1000 sont les suivantes (vue de dessus) :

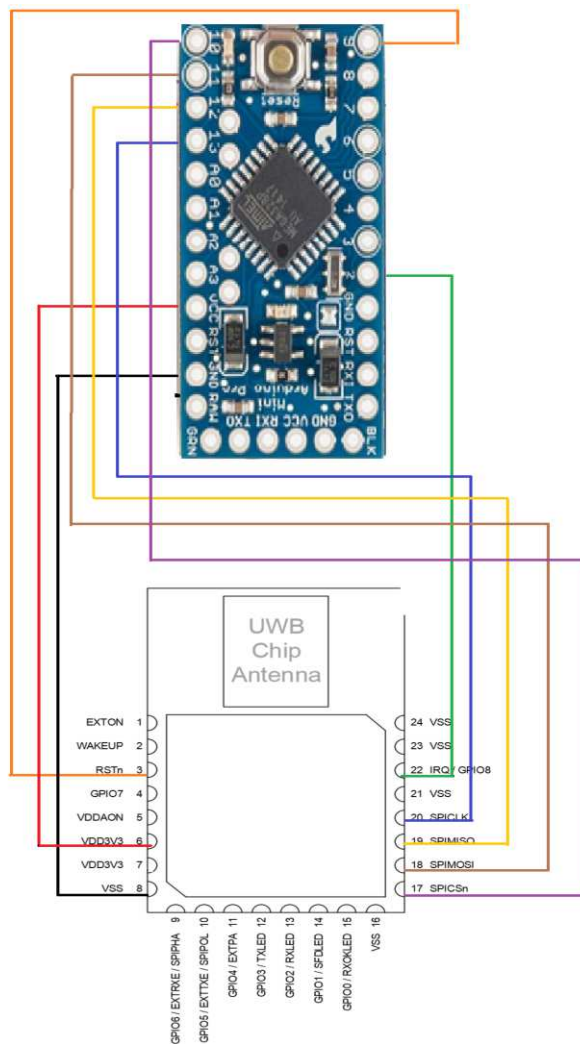


Figure 3.5 : Diagramme du module DW1000 et Arduino Pro mini

Lorsque l'alimentation est appliquée au DWM1000, RSTn est abaissé par les circuits internes dans le cadre de sa séquence de mise sous tension. RSTn reste bas jusqu'à ce que l'oscillateur à quartz du module soit mis sous tension et que sa sortie soit adaptée à une utilisation par le reste de l'appareil, moment auquel RSTn est désactivé. L'initialisation du DW1000 se poursuivra lorsque la broche est relâchée à haute impédance. Lors de la réinitialisation, toutes les broches GPIO sont entrées par défaut. Les entrées GPIO, lorsqu'elles sont correctement configurées, sont capables de générer des interruptions vers le processeur hôte via le signal IRQ. GPIO0, 1, 2 et 3, comme l'une de leurs fonctions optionnelles, peuvent piloter des LED pour indiquer l'état de diverses opérations de puce. Le protocole de transfert de données prend en charge les accès en lecture/écriture à un ou plusieurs octets. Tous les octets sont transférés MSB en premier et LSB en dernier. Un

transfert est initié en affirmant SPICSn bas et terminé lorsque SPICSn est désactivé haut [90] [91].

3.2.1.4. Carte d'adaptation :

Une première étape logique dans la conception matérielle d'un système électronique consiste à examiner le schéma fonctionnel du système et les détails schématiques, ce que nous avons fait dans la section 3.2.1.3 Lors de la conception du circuit imprimé sur lequel le DWM1000 sera soudé, la proximité de l'antenne unipolaire en céramique du DWM1000 avec le métal et d'autres matériaux non transparents aux radiofréquences doit être soigneusement prise en compte. Un schéma de placement suggéré est présenté ci-dessous.

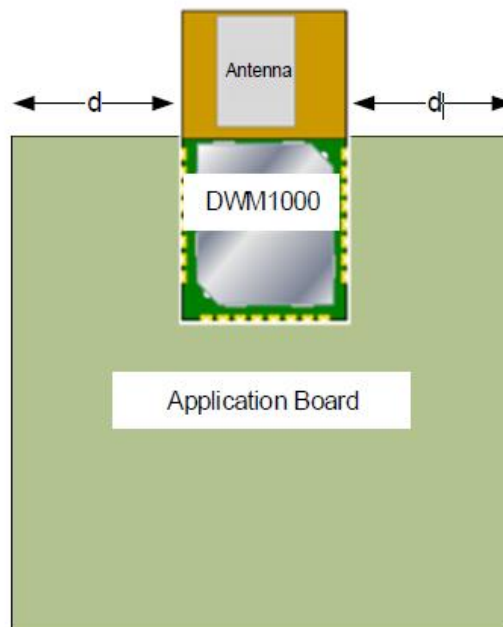


Figure 3.6 : zones d'exclusion de la carte d'application DWM1000

Il est important de ne pas placer de composants métalliques au-dessus ou au-dessous de l'antenne dans un système de mise en œuvre. Il est également important de noter que le plan de masse de la carte d'application affecte le diagramme de rayonnement de l'antenne du DWM1000. Dans la Figure (3.6) ci-dessus, d doit être au minimum de 10mm. Cela donne le diagramme de rayonnement le plus polarisé verticalement. Lorsque d augmente à partir de 10 mm, le degré de polarisation verticale diminue. L'antenne utilisée dans le module est l'antenne à puce diélectrique Partron, référence ACS5200HFAUWB. Les diagrammes de rayonnement de l'antenne, mesurés dans une chambre anéchoïque pour

trois plans, sont présentés à la figure (3.7). L'antenne étant polarisée linéairement, dans le plan Azimuth le champ polarisé verticalement (Theta) est mesuré et le champ polarisé horizontalement (Phi) pour les plans d'élévation 1 et 2.

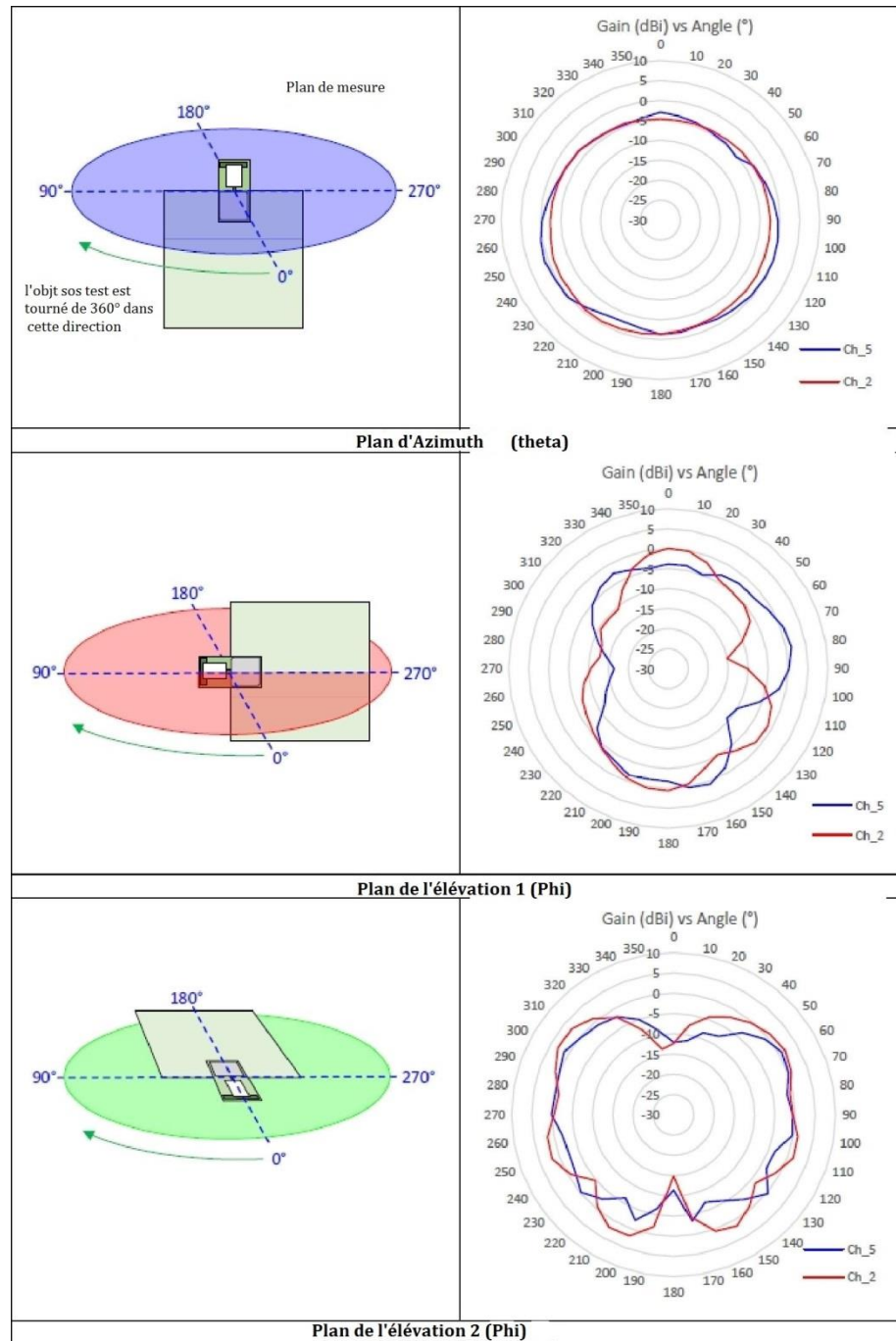


Figure 3.7 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne mesurés [93]

Un système matériel impliquant l'émetteur-récepteur DWM1000 comprend plusieurs autres composants principaux. Le module n'a besoin que d'alimenter le dispositif et de le connecter à un microcontrôleur. Pour commencer, il est important de noter que le module

fonctionne avec 3.3v. De plus, le courant nécessaire au module peut aller jusqu'à 200mA. Cependant, il a besoin d'un Arduino logique (Arduino Pro mini) avec une alimentation externe 3.3v. Sinon, nous pouvons toujours utiliser un décaleur de niveau logique 5v à 3,3v. Une résistance externe à faible tolérance (1%) connectée à la broche DW1000 IRQ est également requise. Pour rester aussi compacte que possible, la carte Breakout ne fait apparaître que les lignes de signal nécessaires ainsi que quelques autres pour les applications avancées (EXT, WAKE, GP7, SPIPHA et SPIPOL.) Elle fournit également, une résistance de rappel de 10K, pour la ligne IRQ.

La figure (3.8) montre la disposition de la carte adaptateur PCB. Elle est conçue pour recevoir une prise 24 broches à profil bas qui accepte les broches rondes "machine". Cela permet à l'Arduino Pro Mini (également équipé de broches machine rondes) de se glisser sous la carte de dérivation, qui se branche ensuite sur des connecteurs femelles standard de type Arduino.

Le design du PCB ressemble à ceci :

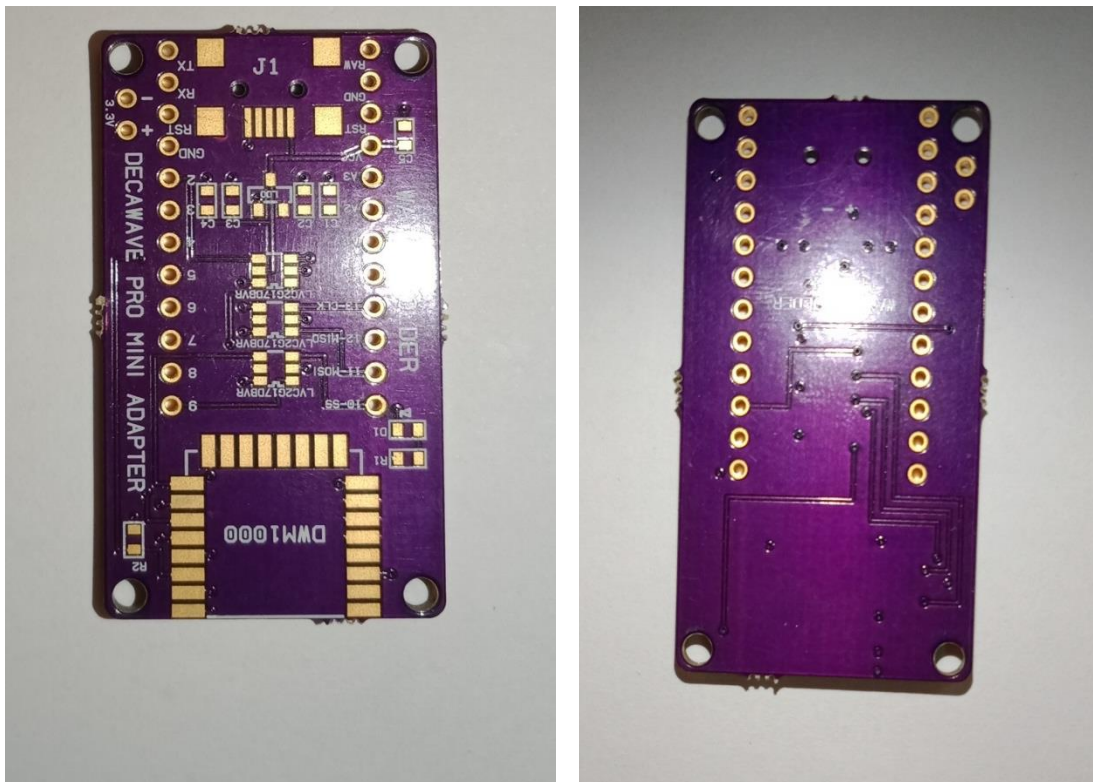


Figure 3.8 : Disposition du circuit imprimé (Haut et bas)

3.2.1.4.1. Assemblage des pièces :

Un matériel spécifique était nécessaire pour l'assemblage des composants monté en surface (CMS, SMD (*surface mounted device*) en anglais) au niveau du laboratoire du centre de recherche CDTA comme montré sur la figure (3.10).

Un double Trigger de Schmitt dans les boîtiers SOT-23-6 comme base du circuit de décalage de niveau, car ils peuvent prendre une tension d'alimentation comprise entre 1,6 et 6,5 volts et peuvent tolérer des entrées de surtension. Nous pouvons également ajouter un régulateur de 3,3 volts et 200 mA pour alimenter le DWM1000, car il peut apparemment nécessiter des courants de pointe dans cette plage lors de la transmission. Deux des parties LVC2G17 décalent les quatre signaux RST, CS, MOSI et CLK de 5 volts à 3,3 volts et le LVC2G17 restant décale les signaux MISO et IRQ de 3,3 volts à 5 volts. La résistance de rappel R2 est de 10K. La figure (3.9) présente le schéma électrique correspondant :

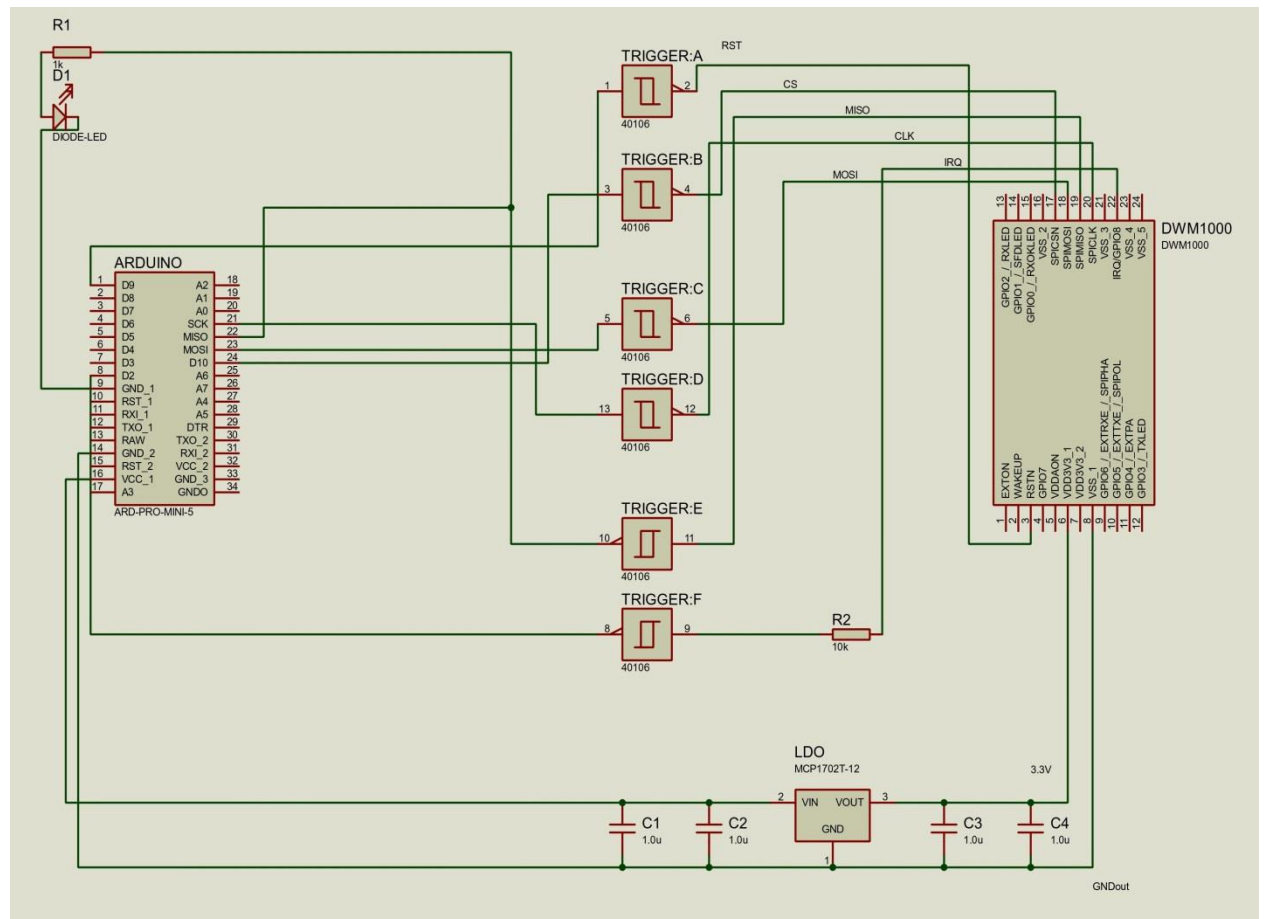


Figure 3.9 : Schéma électrique du circuit PCB Arduino et DWM1000

Les composants externes ont été placés sur le circuit PCB avec Chip Quik, (une pâte à souder). Avec une seringue contenant la pastille Réfrigérer à 3-8°C (37-46°F), on étale

une petite quantité aux endroits désiré puis avec l'outil de sélection et de placement (pick and place), nous plaçons notre composant juste au-dessus de l'onglet. Il faut faire très attention à ne pas trop appuyer pour que la pâte ne glisse pas en dehors de la zone souhaitée. Afin de réaliser la soudure en toute précision ces étapes ont été réalisées sous un stéréo-microscope muni d'une station d'Illumination, comme le montre la figure (3.11). À la fin nous mettons notre circuit dans le (INFRARED IC HEATER), qui est un four de refusions contrôlé par microprocesseur. A 235°C la patte s'activera et nos composants seront soudés. Le circuit est prêt à l'emploi.



Figure 3.10 : le matériel utilisé pour la réalisation du PCB board au laboratoire du CDTA

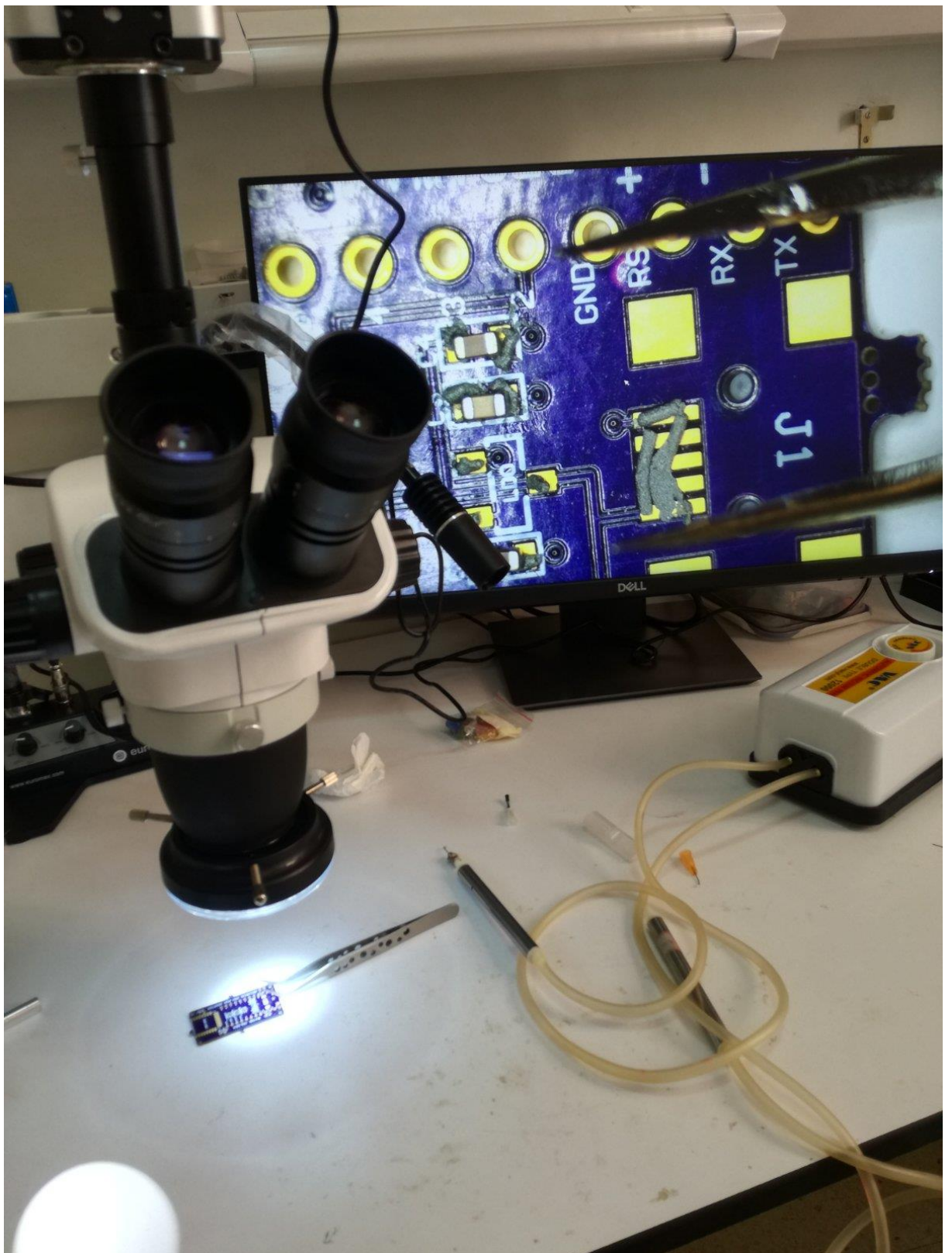


Figure 3.11 : vue du PCB depuis le stéréo-microscope

3.2.1.5. Arduino Pro mini :

L'Arduino Pro Mini est une carte de microcontrôleur basée sur l'ATmega 328. Il est Flashé par un programme bootloader qui vous permet de télécharger un nouveau code sans l'utilisation d'un programmeur matériel externe. Il peut être alimenté avec un câble FTDI ou une carte de dérivation connectée à son en-tête à six broches, soit avec une alimentation régulée 3.3V ou 5V (selon modèle) sur la broche Vcc. Les spécifications Arduino Pro mini sont présentées dans le tableau 3.3. L'ATmega 328 est un microcontrôleur CMOS 8 bits à basse consommation basé sur l'architecture RISC améliorée AVR. Le noyau AVR combine un riche jeu d'instructions avec 32 registres de travail à usage général. Tous les 32 registres sont directement connectés à l'unité logique arithmétique (ALU), permettant d'accéder à deux registres indépendants en une seule instruction exécutée en un cycle d'horloge. L'ATmega 328 offre les fonctionnalités suivantes:

- 4K/8K octets de Flash programmable dans le système avec des capacités de lecture-écriture,
- 256/512/512/1K octets EEPROM, 512/1K/1K/2K octets SRAM,
- 23 lignes d'E/S à usage général,
- 32registres de travail à usage général,
- Trois minuteries/compteurs flexibles avec modes de comparaison,
- Interruptions internes et externs,
- Un USART programmable en série,
- Une interface série 2 fils orientée octet,
- Un port série SPI,
- Un Watchdog Timer programmable avec oscillateur interne,

Et cinq modes d'économie d'énergie sélectionnables par logiciel.

Le microcontrôleur est fabriqué à l'aide de la technologie de mémoire non volatile à haute densité d'Atmel. The On-chip ISP Flash permet à la mémoire du programme d'être

reprogrammée dans le système via une interface SPI serial, par un programmeur de mémoire non volatile conventionnel, ou par un programme d'amorçage sur puce s'exécutant sur le cœur de l'AVR [94].

Microcontrôleur	ATmega328 *
Alimentation de la carte	3,35 - 12 V (modèle 3,3 V) ou 5 - 12 V (modèle 5 V)
Tension de fonctionnement du circuit	3.3V ou 5V (selon modèle)
Broches d'E/S numériques	14
Broches PWM	6
UART	1
SPI	1
I2C	1
Broches d'entrée analogique	6
Interruptions externes	2
Courant CC par broche E/S	40 Ma
Mémoire flash	32 Ko dont 2 Ko utilisés par le bootloader *
SRAM	2 Ko *
EEPROM	1 Ko *
Vitesse de l'horloge	8 MHz (versions 3.3V) ou 16 MHz (versions 5V)

Tableau 3.2 : Spécifications Arduino Pro mini [95]

L'Arduino Pro Mini et le module DWM100 sont sur le même PCB et ressemblent à ceci :

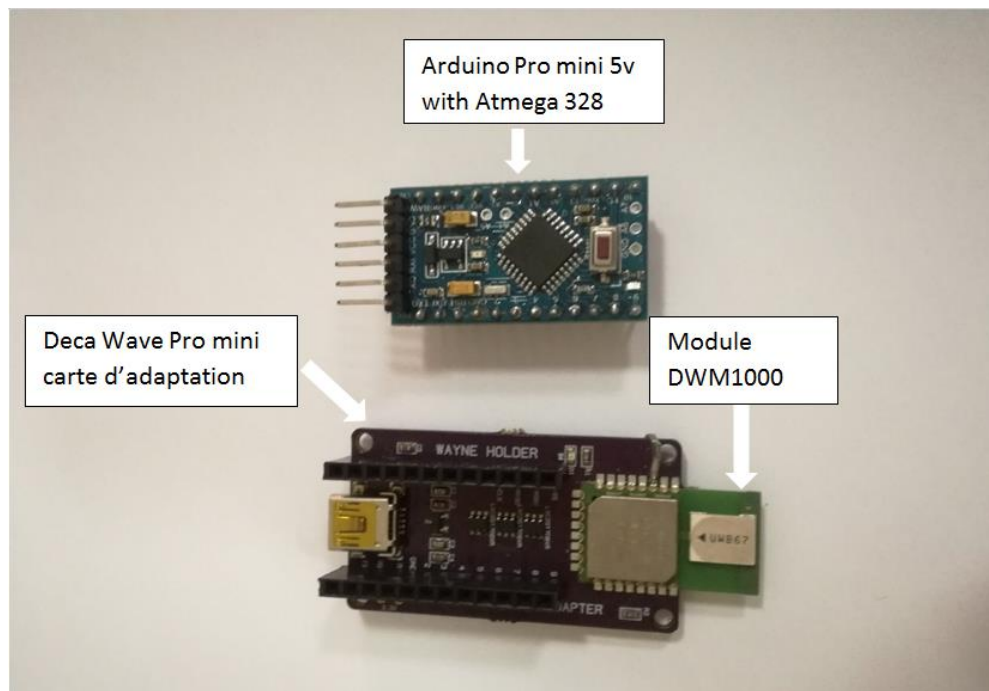


Figure 3.12 : Carte d'adaptation construite et Arduino Pro mini

Afin de programmer l'Arduino Pro mini, on devrait utiliser un adaptateur FTDI, une petite carte qui vous permet de connecter un port USB à votre Arduino Pro Min A traves le port UART. Celui que nous utilisons est le module de dérivation UMFT230XB qui utilise la puce FT230XQ. Ce module est une carte de dérivation à profil bas. Il convertit l'USB2.0 Full-Speed en une interface série et connecte les signaux série à un réceptacle femelle à 10 broches au pas de 2,54 mm (0,1"). Les cartes n'utilisent pas de connecteur USB, mais à la place les modules se branchent directement sur le connecteur hôte USB et les pastilles du PCB établissent un contact électrique avec les contacts électriques du connecteur USB [96]. Une description des brochages du FTDI et de leur connexion avec l'Arduino Pro mini est illustrée dans le tableau ci-dessus.

N°de broche	Nom	Type	La description	Broche Arduino
1	TXD	Sortie	UART transmettre la sortie de données asynchrones	RXI
3	GND	PWR	Alimentation au sol du module	GND
5	RXD	Entrée	UART recevant l'entrée de données asynchrones	TXO
6	3V3	Sortie	Sortie 3,3 V du régulateur LDO intégré.	VCC
7	RTS	Sortie	Demande UART d'envoi de sortie de contrôle/signal de prise de contact	DTR
9	CTS	Entrée	UART Clear To Send Entrée de contrôle	GND

Tableau 3.3 : Description des broches FTDI et des broches utilisées pour la connexion avec Arduino Pro mini

3.2.1.6. IMU :

Une étude récente [97] montre que 28% des contributions à la conférence internationale IEEE sur le positionnement et la navigation intérieures (IPIN) utilisent des capteurs inertiels. Les capteurs inertiels sont également fréquemment utilisés pour l'estimation de la pose des voitures, des bateaux, des trains et des véhicules aériens ; voir par exemple [98]. Le terme capteur inertiel est utilisé pour désigner la combinaison d'un accéléromètre à trois axes et d'un gyroscope à trois axes. Les appareils contenant ces capteurs sont communément appelés unités de mesure inertielle (IMU). Une IMU est généralement composée de deux triades de capteurs orthogonaux. Une triade se compose de trois accéléromètres mono-axiaux ; l'autre se compose de trois gyroscopes mono-axiaux. Les deux triades sont nominalement parallèles et l'origine du gyroscope est définie comme

l'origine de la triade de l'accéléromètre. Un gyroscope mesure la vitesse angulaire du capteur, c'est-à-dire le taux de changement d'orientation du capteur. Un accéléromètre mesure la force spécifique externe agissant sur le capteur. La force spécifique se compose à la fois de l'accélération du capteur et de la gravité terrestre. Ces dernières années, les capteurs inertiels à semi-conducteurs (MEMS) ont trouvé des applications dans de nombreux domaines différents, notamment grâce à leur faible coût et leur très petite taille (De Agostino et al. (2010)) [98].

Afin d'obtenir l'orientation R et l'accélération a_B nécessaire comme montré dans l'équation

$$u := g\hat{e}_3 + R_{a\beta} \quad (3.1)$$

Une opération de fusion de données doit être faite. Pour cela une bonne connaissance des différents capteurs incorporés dans l'IMU est nécessaire. A savoir :

3.2.1.6.1. Gyroscope : mesure la vitesse angulaire à chaque instance de temps $\omega_{ib}^b t$. Cependant, ses mesures sont corrompues par un biais variant lentement dans le temps $\delta_{\omega,t}$ et le bruit. Par conséquent, le modèle de mesure du gyroscope est donné par $e_{\omega,t}$

$$y_{\omega,t} = \omega_{ib,t}^b + \delta_{\omega,t}^b + e_{\omega,t}^b \quad (3.2)$$

Le bruit de mesure du gyroscope est assez gaussien. Pour cette raison, on suppose généralement que si le capteur est correctement calibré, les mesures dans les trois axes du gyroscope sont indépendantes. Dans ce cas, on peut supposer que $e_{\omega,t}^b \sim N(0, \Sigma_{\omega})$

$$\Sigma_{\omega} = \begin{pmatrix} \sigma_{\omega,x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\omega,y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\omega,z}^2 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Bien que la rotation de la terre $\omega_{e,i}$ tel qu'exprimé dans le cadre du corps n'est pas constant, son amplitude par rapport à l'amplitude des mesures réelles est assez faible. En supposant que la rotation de la Terre est négligeable et que le cadre de navigation est stationnaire, on obtient le modèle de mesure simplifié suivant

$$y_{\omega,t} = \omega_{nb,t}^b + \delta_{\omega,t}^b + e_{\omega,t}^b \quad (3.4)$$

3.2.1.6.2. Accéléromètre : mesure la force spécifique à chaque instance de temps, les mesures de l'accéléromètre sont généralement supposées être corrompues par un biais et du bruit comme $f_t^b \delta_{a,t} e_{a,t}$

$$y_{a,t} = f_t^b + \delta_{a,t}^b + e_{a,t}^b \quad (3.5)$$

Le bruit de l'accéléromètre est généralement assez gaussien et peut donc être modélisé comme, pour un capteur correctement calibré, la matrice de covariance peut souvent être supposée diagonale. Étant donné que les mesures de l'accéléromètre sont généralement dominées par le vecteur de gravité, un modèle couramment utilisé suppose que l'accélération linéaire est approximativement nulle. $e_{a,t}^b \sim N(0, \Sigma_a) \Sigma_a$

$$y_{a,t} = -R_t^{bn} g^n + \delta_{a,t}^b + e_{a,t}^b \quad (3.6)$$

[99].

De nos jours, de nombreux gyroscopes et accéléromètres sont basés sur la technologie des systèmes micro électromécaniques (MEMS). Les composants MEMS sont petits, légers, peu coûteux, ont une faible consommation d'énergie et des temps de démarrage courts. Leur précision a considérablement augmenté au fil des ans. Celui avec lequel nous avons travaillé est le MPU6050.

Le MPU-6050 est le premier dispositif intégré de suivi de mouvement à 6 axes au monde qui combine un gyroscope à 3 axes, un accéléromètre à 3 axes et un Digital Motion Processor™ (DMP) le tout dans un petit boîtier de 4x4x0,9 mm Avec son bus de capteur I2C dédié, il accepte directement les entrées d'une boussole 3 axes externe pour fournir une sortie Motion Fusion™ 9 axes complète. De plus, le MPU-6050 fournit une broche de référence VLOGIC (en plus de sa broche d'alimentation analogique : VDD), qui définit les niveaux logiques de son interface I2C. La tension VLOGIC peut être de 1,8V±5% ou VDD. Sauf que le MPU-6050 prend en charge l'interface série I2C.

Le gyroscope MEMS à trois axes du MPU-60X0 comprend un large éventail de fonctionnalités :

- Capteurs de vitesse angulaire (gyroscopes) sur les axes X, Y et Z à sortie numérique avec une plage de pleine échelle programmable par l'utilisateur de ± 250 , ± 500 , ± 1000 et $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- Amélioration des performances de bruit à basse fréquence

- Filtre passe-bas programmable numériquement
- Courant de fonctionnement du gyroscope : 3,6 mA
- Courant de veille : 5µA

L'accéléromètre MEMS à trois axes du MPU-60X0 comprend un large éventail de fonctionnalités :

- Accéléromètre à trois axes à sortie numérique avec une plage de pleine échelle programmable de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ et $\pm 16g$
- Courant de fonctionnement normal de l'accéléromètre : 500µA
- Courant en mode accéléromètre basse consommation : 10 µA à 1,25 Hz, 20 µA à 5 Hz, 60 µA à 20 Hz, 110 µA à 40 Hz
- Détection d'orientation et signalisation
- Interruptions programmables par l'utilisateur

Il est très facile d'interfacer le MPU6050 avec Arudino, grâce aux différentes bibliothèques que l'on peut trouver sur internet, celle que nous utilisons est (MPU6050_tockn).

Une fois la bibliothèque ajoutée à Arduino IDE, nous suivons le câblage des broches comme décrit dans le tableau 3.5 pour établir une connexion IIC entre votre Arduino et MPU6050.

N° de broche	Broche MPU6050	La description	Broche Arduino
1	VCC	Fournit l'alimentation pour le module, peut-être de +3V à +5V	5V
2	GND	Connecté à la terre du système	GND
3	SCL	Horloge série fournissant une impulsion d'horloge pour la communication I2C	A5
4	ADD	Transfert de données série via la communication I2C	A4

Tableau 3.4: description des broches MPU6050 et leurs connexion avec Arduino [100] [101].

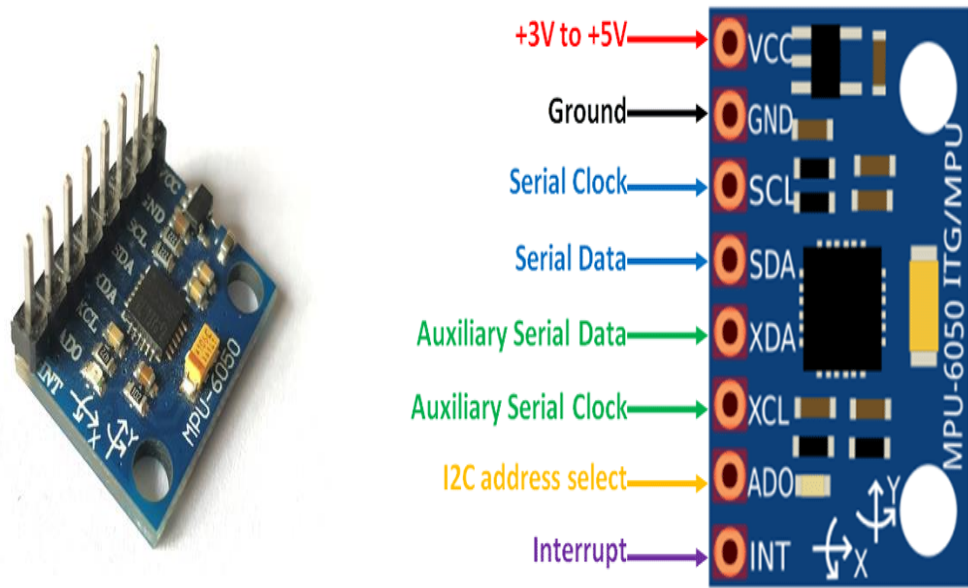


Figure 3.13 : Module MPU6050 et brochage MPU6050

3.3. Description du système de localisation réalisé:

Pour un bon déploiement d'un système de positionnement, un concepteur doit déterminer l'algorithme de localisation approprié en fonction des paramètres système interdépendants suivants :

- Application et environnement : l'application et l'environnement dans lesquels le système doit être déployé déterminent la précision, la topologie et la zone de couverture requises (c'est-à-dire la topologie des mines souterraines).
- Métrique du signal : l'attribut du signal qui est utilisé pour la localisation.
- Algorithme de localisation : un mécanisme de compromis entre la complexité du système et la précision de la localisation est plus approprié [102].

Lorsque l'on considère les paramètres du réseau, la localisation est principalement limitée par la taille (c'est-à-dire le nombre des Anchors), la topologie, l'erreur de télémétrie et la densité du réseau.

Puisque notre système est dédié aux UAV, notre scénario est celui d'un UAV entrant dans n'importe quelle zone intérieure et suivant avec précision sa position au fil du temps. Nous supposons qu'une fois les ancres fixées en position connue, l'UAV peut ensuite extraire des estimations de distance vers les ancres à partir des signaux reçus au Tag, puis utiliser l'algorithme de positionnement pour déterminer sa propre position. Les impulsions

courtes ultra large bande (UWB) sont des candidats idéaux pour les applications de localisation en intérieur, contrairement à méthodes optiques, la courte durée UWB assure la résistance contre les effets de trajets multiples et donne une résolution temporelle suprême. En raison du fait que l'UWB a des limites d'émission de puissance très strictes [103,104] les applications à courte portée (par exemple, à l'intérieur) sont visées [105]. Puisque nous utilisons le module DW1000 désigné respectivement comme initiateur et répondeur, la technique TWR est utilisée, elle présente des avantages par rapport aux autres systèmes de mesure de distance et de localisation en ce sens qu'il peut être utilisé par des appareils autonomes qui n'ont que des distances relatives à mesurer. Il n'y a aucune exigence pour une infrastructure d'appareils communicants fixes pour déterminer les distances de séparation [106].

Après avoir sélectionné les composants appropriés pour notre système, nous passons maintenant à la phase de mise en œuvre. Un prototype de système de localisation indoor basé sur l'UWB a été développé. Comme le montre la figure (3.13).

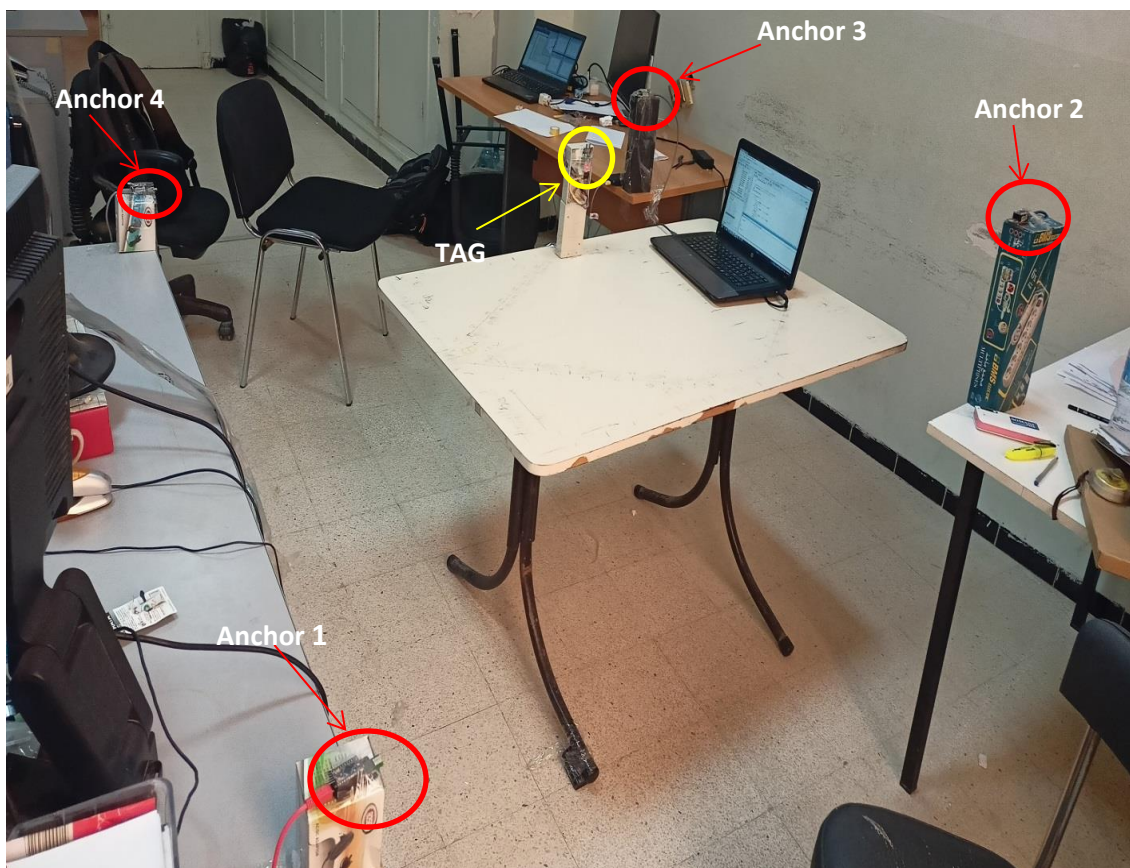


Figure 3.14 : Le prototype composé de 4 Anchors et d'un Tag.

3.4. Mise en œuvre logiciel :

Cette section décrit la mise en œuvre du logiciel, Le processus de la lecture des données de TWR au PC affichant le modèle 3D.

Outils informatique utilisé :

3.4.1. Arduino (IDE) :

L'environnement de développement intégré Arduino - ou logiciel Arduino (IDE) - est une plate-forme électronique open source gratuite il vous permet d'écrire des programmes et de les télécharger sur votre carte. Il se connecte au matériel Arduino pour télécharger des programmes et communiquer avec lui. [107]

3.4.2. Visual Code Studio :

Visual Code Studio (VCS) est un éditeur de code source léger mais puissant qui s'exécute sur votre bureau et est disponible pour Windows, mac OS et Linux. Il dispose d'un riche écosystème d'extensions pour différents langages (tels que Python), et c'est celui qu'on utilisera au cours de cette expérience.

3.4.3. MATLAB :

Pour la simulation 3D on utilisera l'outil MATLAB qui est couramment utilisé dans le milieu universitaire et de recherche, c'est une plate-forme de programmation et de calcul numérique utilisée pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles. Ce qui nous a le plus motivé à l'utiliser et qu'il combine un environnement de bureau adapté aux processus d'analyse et de conception itératifs avec un langage de programmation qui exprime directement les mathématiques des matrices et des tableaux.

3.5. Procédure d'acquisition :

Cette section présente les performances du prototype implémenté et les résultats de l'évaluation, ainsi qu'une discussion des résultats.

Les codes pour la collecte des données (distances) sont développés sur Arduino. La bibliothèque arduino-dw1000 Open source permet l'utilisation des Puces/modules DW1000 de Deca Wave [108]. Chaque Anchor est définie par sa propre adresse fixe afin de pouvoir combinées et transformées les distances mesurées en une position unique dans l'espace.

Comme la mémoire flash Atmega 328 n'était pas suffisante pour téléverser le programme complet au Tag, on a décidé de réaliser le processus en deux parties. Une première pour l'acquisition des données puis dans la deuxième partie un traitement de ces données. La fonction d'Arduino était de seulement faire les mesures de distances en temps réel, puis

on a réalisé une acquisition de toutes ces mesures avec python 3.6 sur VCS, qui nous à permit d'enregistrées les données collectées dans un fichier pour un traitement hors ligne figure (3.14). Par la suite grâce à la fonction (importdata) sur MATLAB on a pu appliquer la méthode des moindres carrés, ainsi que le filtrage de Kalman sur les distances enregistrées pour obtenir la position 3D estimée. Les résultats obtenus seront discutés dans la partie suivante.

Pour caractériser la performance du capteur dans la localisation du Tag, le Tag et l'Anchor sont placées sur un bureau de façon à ce que le haut des antennes soit face à face. La position de l'Anchor est ensuite fixée sur le bureau à une distance connue du Tag et un ensemble de mesures est pris, l'erreur peut alors être modélisée comme suit :

$$d_{error} = d_{meas} + d_{expected} , \quad (3.5)$$

Où $d_{expected}$ est enfaite la mesure réel. Ce processus est complétées pour toutes les Anchors communiquant avec le Tag, les erreurs moyennes sont ensuite stockées et soustraites de toutes les mesures avant simulation [109].

La position des Anchors est fixée dans des positions (x, y, z) bien connus comme le montre la figure (3.13) et les étapes suivantes sont suivies :

- Après avoir téléverser le programme de mesure de distance à l'Anchor et au tag depuis Arduino, on lance la collecte des données sur VCS.
- Sur le Terminal du VCS on observe les mesures défiler en temps réel.
- Lorsque les mesures de toutes les Anchors sont collectées, on arrête l'acquisition.
- Ce processus est répété jusqu'à ce que le point d'arrêt du plan soit atteint.

```

4
5  ports = serial.tools.list_ports.comports()
6  serialInst = serial.Serial()
7  f = open('D:/Real.dist.measur_Table_Q2.csv', 'w')
8  writer = csv.writer(f, delimiter=',')
9
10 serialInst.baudrate = 115200
11
12 serialInst.port = "COM9" # portVar
13 serialInst.open()
14
15 try:
16     T = []
17     while True:

```

PROBLEMS	OUTPUT	DEBUG CONSOLE	TERMINAL
			['8997.52', '4371.08', '30841.76', '26215.88']
			['8997.52', '4371.01', '30841.75', '26215.60']
			['8997.52', '4371.03', '30841.68', '26215.60']
			['8997.55', '4371.01', '30841.64', '26215.45']
			['8997.52', '4371.08', '30841.65', '26215.54']
			['8997.47', '4371.00', '30841.68', '26215.60']
			['8997.55', '4371.07', '30841.65', '26215.56']
			['8997.51', '4371.20', '30841.72', '26215.44']
			['8997.52', '4371.21', '30841.70', '26215.39']
			['8997.51', '4371.23', '30841.62', '26215.39']
			['8997.49', '4371.28', '30841.61', '26215.40']
			['8997.50', '4371.27', '30841.63', '26215.31']
			['8997.50', '4371.28', '30841.65', '26215.40']
			['8997.47', '4371.21', '30841.64', '26215.38']

Figure 3.15 : Données collectées au point A

3.6. Résultats et discussion:

Afin de tester la mise en œuvre de notre système, une forme particulière a été tracée sur un plan ensuite le Tag a été déplacé autour de cette forme à un rythme approximativement régulier.

Comme le montre indiqué les résultats obtenus dans les figures 3.16, l'estimateur de position produit de bons résultats, avec quelques écarts dans la position estimée en raison d'une mauvaise configuration des nœuds d'ancrage, ainsi que de la nature imprécise de cette expérience.

Pour avoir une référence pseudo-réel de notre forme particulière à suivre, le Tag a été déplacée par un pas d'une distance de 3.5cm sur le périmètre de la forme en relevant les distances qui séparent le Tag avec Anchor 1, Anchor 2, Anchor 3 et Anchor 4. La capture de l'échantillon est faite d'une manière manuel, puis on continue le déplacement jusqu'à l'arrivée au point de départ. Les résultats ont été enregistrés dans le but de faire une reconstitution 3D pseudo-réel à l'aide de l'algorithme statique.

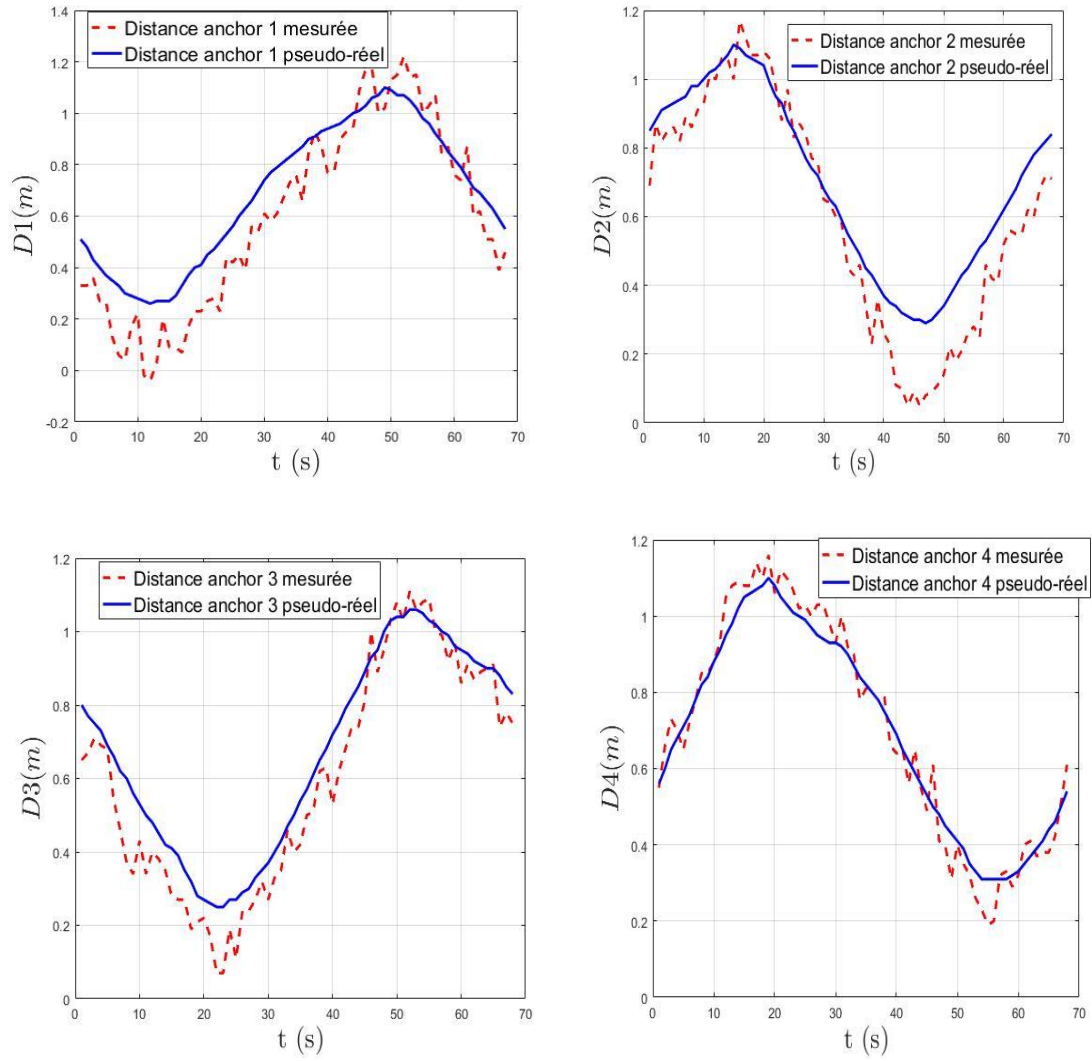


Figure 3.16 : distance mesurée vs désirée

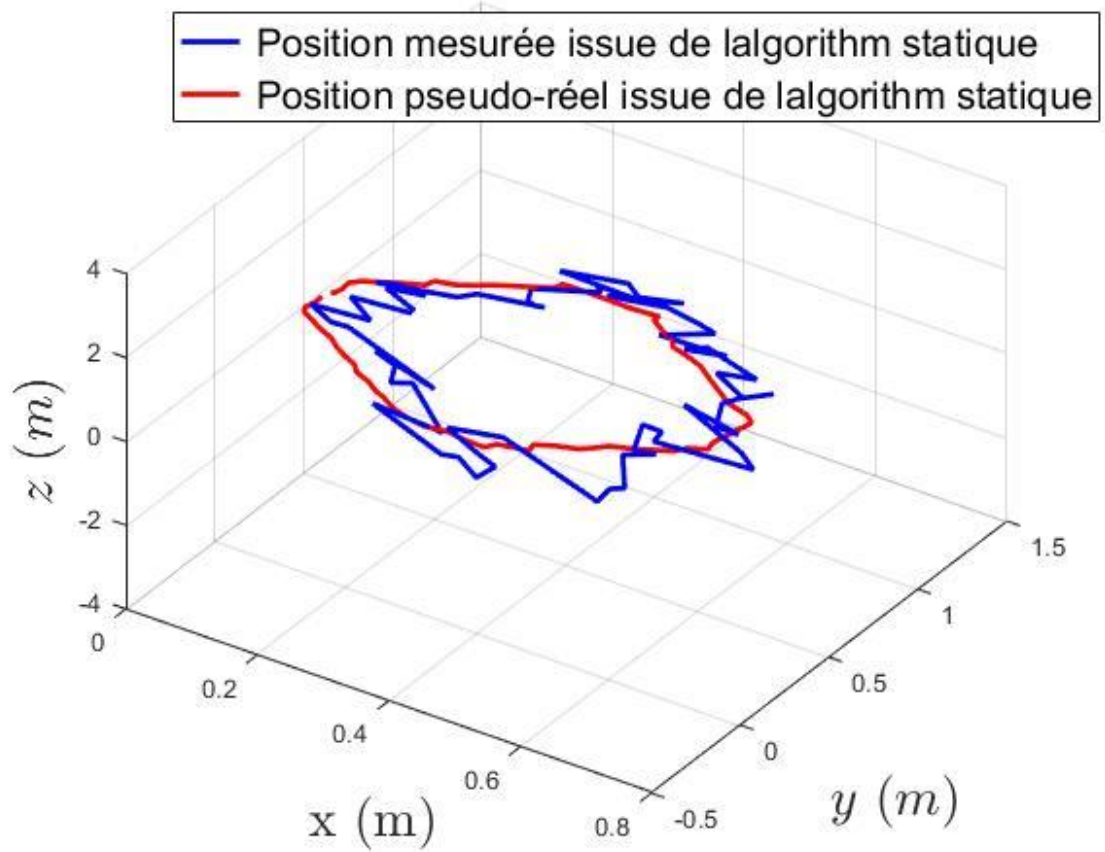


Figure 3.17 : position estimer vs désiré de l'octogone en appliquant l'algorithme statique

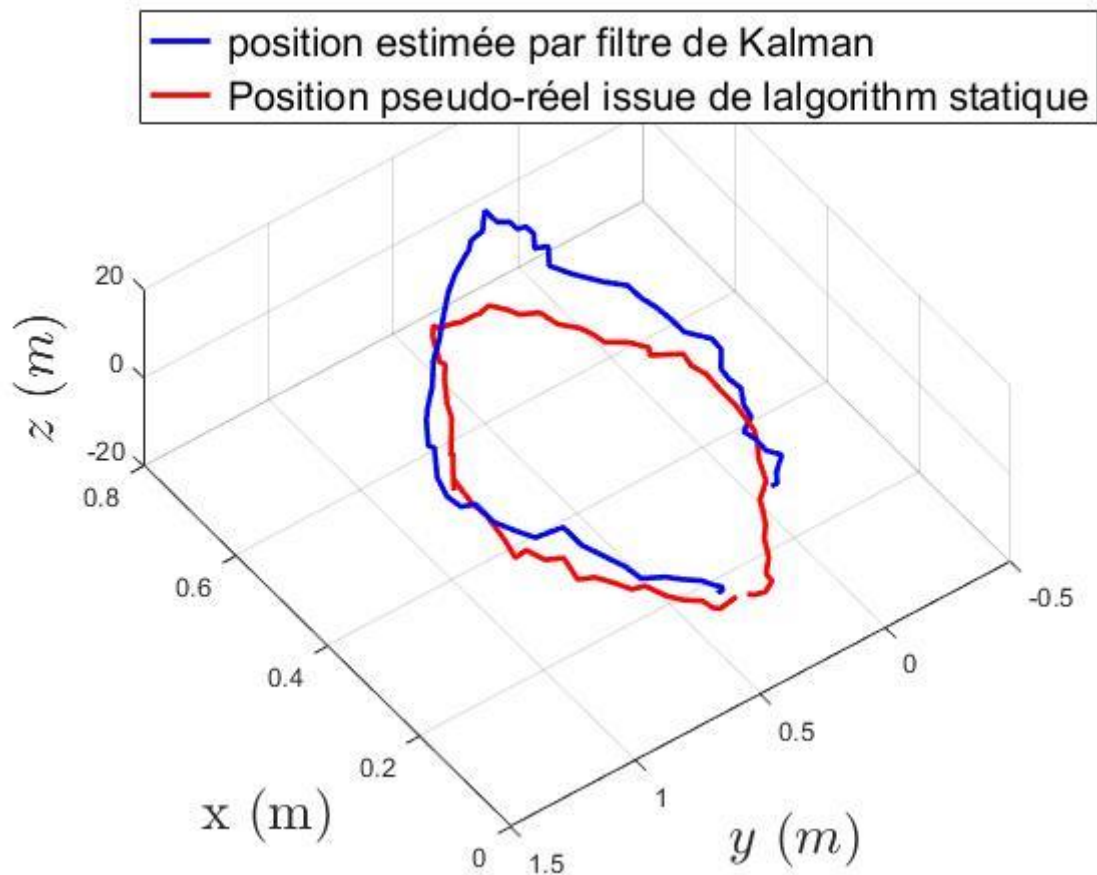


Figure 3.18 : position 3D estimé en appliquant l'algorithme dynamique vs désirer

La figure (3.16) montre le résultat d'estimation de la distance contre celle désiré, Ces résultats correspondent à la trajectoire que nous avons choisie. Tandis que les résultats fournis par la figure (3.17) et (3.18) montrent les résultats de simulation de la position 3D obtenus avec les différents algorithmes. Comme on arrive à le voir L'algorithme statique à des estimations de position considérablement plus bruyantes. Par contre on appliquant la méthode dynamique (filtre de Kalman) L'erreur de localisation obtenue en 3-D reste satisfaisante comparativement à la taille de la zone de mesure.

4.1. Conclusion :

Ce chapitre a permis de tester un système de localisation 3-D utilisant les techniques de transmission UWB pour des applications indoor. Nous avons en premier détaillé le

matériel utilisé pour la conception de notre prototype puis les différents éléments nécessaires pour effectuer des tests du système UWB.

Tout d'abord on devait collecter les mesures de distances entre le Tag et les 4 Anchors pour une trajectoire octogone et une autre rectangle avec deux plan différent, puis ces données devaient être utilisées dans la méthode des moindres carrés sur Matlab pour estimer la position du Tag. Avec cette méthode, la solution p minimise l'erreur quadratique moyenne, ce qui donne un bon résultats, certe les résultats ont montré qu'une étape de filtrage était nécessaire, l'introduction du filtre de Kalman avec l'utilisation des bons paramètres à permit de fournir une meilleure estimation des position on éliminant le bruit causer par les modules DWM1000. Nous retenons de ces résultats que Le système de localisation proposé permet d'attendre des erreurs de localisation centimétriques en 3-D. Ces erreurs restent assez satisfaisantes pour un système de localisation 3-D.

Conclusion générale

Le système de localisation des drones généralement utilise la vision par ordinateur en intérieur, ou le système mondial de navigation par satellite (GNSS) en extérieur. Cependant, le matériel est coûteux, énergivore, et pour l'intérieur, du matériel supplémentaire doit être installé dans l'infrastructure (ce qui rend son utilisation limitée dans ce domaine).

Ce projet de master Présenté dans ce mémoire repose sur l'utilisation de la technologie UWB (Ultra-Wide Band) pour calculer la mesure de la distance en temps réel entre les Anchors et le Tag, qui sera ensuite utilisée pour estimer la position relative du drone lors du vol.

Dans ce mémoire, nous avons tout d'abord présenté dans le chapitre 1 une rétrospective sur les systèmes de localisation existants. Les limites des systèmes de localisation à grande échelle en termes de disponibilité et voire en termes de précision dans les applications Indoor. Parmi toutes les technologies existantes, nous avons montré que l'UWB, de par sa singularité en termes de précision et de faible puissance d'émission, s'impose avantageusement pour optimiser les performances de localisation. De fait, dans cette optique, nous avons présenté dans le chapitre 2 les différentes techniques de localisation, en dressant un tableau de comparaison qui nous a éclairci le choix approprié. Par la suite on a détailler aussi l'approche statique (la méthode des moindres carrées) et dynamique (le Filtre de Kalman) pour l'estimation de la position. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les éléments de base qui permettent de concevoir un système de localisation 3-D basé sur l'UWB sur le plan matériel et aussi et logiciel. Finalement la dernière partie du chapitre a parcouru l'ensemble d'évaluations et d'expérimentations auxquelles nous avons soumis notre système afin de tester son efficacité du point de vue précision.

Le travail que nous avons réalisé, a contribué à mettre en avant les avantages de l'UWB dans la localisation indoor, Il s'est avéré efficace pour une bonne pénétration des obstacles

et peut résister aux effets de trajets multiples et aux interférences avec d'autres technologies sans fil ainsi qu'à la mesure en temps réel.

Comme perspectives nous pourrions pousser encore plus loin nos recherches dans ce sens de « temps réel » afin d'obtenir encore plus d'exactitude et précision aux résultats retournés par notre système et ce en adoptant les mesures suivantes:

- ❖ Utilisation des capteurs inertiels IMU pour l'estimation de la position et de l'orientation (Un travail à étudier mais non réalisé pour limite de temps).
- ❖ L'intégration d'un capteur visuel dans le système UWB est un autre point qui fera partie des travaux futurs.

Bibliographie

- [1]: Evanaska Maria Barbosa Nogueira. Conception d'un système d'antennes pour la localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fils. août 2006
- [2]: Misra, P.; Enge, P. Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance, 2nd ed; Ganga-Jamuna Press: Lincoln, MA, USA, 2006.
- [3]: Li, B.; Quader, I.J.; Dempster, A.G. On outdoor positioning with Wi-Fi. J. Glob. Position. Syst. 2008, 1, 18–26.
- [4]: THÈSE DE DOCTORAT Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de valenciennes et du hainaut-cambresis et de l'Université felixhouphouet-boigny d'abidjan
Discipline : Electronique Présentée et soutenue par Kobenan Ignace KOSSONOU le 27 mai 2014 à l'Amphithéâtre IEMN-DOAE de l'Université de Valenciennes à 14 h Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) Laboratoire : Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie, Département d'Opto-Acousto-Electronique (IEMN/DOAE) Etude d'un système de localisation 3-D haute précision basé sur les techniques de transmission Ultra Large Bande à basse consommation d'énergie pour les objets mobiles communicants.
- [5]: Article An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems Trong-Hop Do and Myungsik Yoo *School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea; dotronghop@gmail.com* Correspondence: myoo@ssu.ac.kr; Tel.: +82-2-820-0717 Academic Editor: Yael Nemirovsky Received: 3 March 2016; Accepted: 6 May 2016; Published: 12 May 2016
- [6]: Brice Barben, Visualisation et cartographie à l'intérieur de bâtiments, 07.2016
- [7]: Mekhfi Nadia, Lahbab Noura, Mise au point d'une application de Géolocalisation Indoor via WiFi, 07.2018

- [8]: Review of UAV positioning in indoor environments and new proposal based on US measurements M. C. Pérez, D. Gualda, J. de Vicente, J. M. Villadangos, J. Ureña Department of Electronics, University of Alcalá, Spain.
- [9]: Balamurugan, G., Valarmathi, J., Naidu, VPS.: Survey on UAV Navigation in GPS Denied Environments. International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), 198-204, 2016.
- [10]: Yousif, K. Bb-Hadiashar, a. and Hoseinnezhad, R. An overview to visual odometry and visual SLAM: Applications to Mobile Robots. Intelligent Industrial Systems, vol. 1, no. 4, pp. 289-311, 2015.
- [11]: 8. Sagitov A., Shabalina K., Lavrenov R., Magid E. Comparing fiducial marker systems in the presence of occlusion; Proceedings of the 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC); St. Petersburg, Russian. 19–21 May 2017.
- [12]: 1. Yassin A., Nasser Y., Awad M., Al-Dubai A., Liu R., Yuen C., Raulefs R. Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications. IEEECommun.Surv. Tutor. 2016;**19**: 13271346.doi: 10.1109/COMST.2016.2632427
- [13]:Sensors(Basel). 2020May;20(9):2641.Publishedonline2020May6. doi: 10.3390/s20092641PMCID: PMC7249029PMID: 32384605A Comprehensive Survey of Indoor Localization Methods Based on Computer VisionAnca Morar,^{1,*} Alin Moldoveanu,¹ Irina Mocanu,¹ Florica Moldoveanu,¹ Ion Emilian Radoi,¹ Victor Asavei,¹ Alexandru Gradinaru,¹ and Alex Butean²
- [14]: Guide pour le positionnement GPS, Ministre des Approvisionnements et services Canada, No de cat. M52-74/1995F, ISBN 0-660-94918-0,130p, (juillet 1993, Troisième impression, avec corrections, avril 1998).
- [15]: YanyingGu, A. Lo et I. Niemegeers. Une enquête sur les systèmes de positionnement intérieur pour les réseaux personnels sans fil. Tutoriels sur les enquêtes de communication, IEEE, 11(1):13– 32, trimestre 2009.
- [16]: ANTHONY TAOK. Localisation dans les milieux confinés :

Combinaison de L'UWB et les réseaux de neurones dans un algorithme de localisation par signature. Université du QUÉBEC à CHICOUTIMI comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie Mai 2008 .151p

[17] : Paul Deguire.Département de mathématiques et statistique.Université de Moncton, Canada.

[18] : Thierry Dudok de Wit, « GPS et localisation par satellites », cours Licence de Chimie-Physique 1ère année, 2010.

[19] : Geolocalisation> Support technique >Principe GPS :
https://www.d3e.fr/geolocalisation/geo_support_principe-gps.html

[20]: Azzedine Boukerche, « Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks », Wiley, November 2008.

[21] : ABDELALI GOUNDAFI. « développement d'un modèle de gestion d'objets géo-localisables centralisé utilisant différents moyens de communication dans un environnement osgi» .Université du QUEBEC .4 décembre 2010

[22]: SHCHEKOTOV, Maxim. Indoor localization method based on Wi-Fi trilateration technique. In : Proceeding of the 16th conference of fruct association. 2014. p. 177-179.

[23] : BOUZIANE, Fairouz. *HTL*: Une approche pour l'hybridation des techniques de localisation. 2015. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.

[24],:Yapeng Wang, Xu Yang. Yutian Zhao. Yue Liu, Laurie Cuthbert. « Bluetooth Positioning using RSSI and Triangulation Methods ». 31 May 2018.

[25]: Olivier Boitel DenisGuillon Cédric Fodouop Kamologne.« Exposé NT réseaux – Bluetooth ».Université de Marne la Vallée.2000.

- [26] : Anja Bakkeliën. « Positionnement intérieur Bluetooth » Master of Computer Science University of Geneva. Mars 2012.
- [27] : M. A. Abid, « Systèmes de localisation en temps réel basés sur les réseaux de Communication sans fil », thèse doctorat, université de Sherbrooke, 2016.
- [28] : Boushaba Mustapha. « Localisation des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil », Université de Montréal, Avril 2007
- [29] : M. Terré, "Communication en Ultra Large Bande (UWB)", RNRT: projet ERABLE séminaire CNFRS/URSL 2001.
- [30]: Federal Communication Commission. First Report and Order-Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission System.FCC 02 48; 2002.
- [31]: Y. Bai and X. Lu, "Research on UWB indoor positioning based on TDOA technique," in Proceedings of the 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI '09), pp. 1167–1170, August 2009.
- [32]: Chong C-C, Watanabe F, Inamura H. Potential of UWB technology for the next generation wireless communications. In: IEEE Ninth Inter-National Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications; Manaus, Amazon, Brazil. 2006.
- [33]: Passive Components for Ultra-Wide Band (UWB) Applications By Dalia N. Elsheakh and Esmat A. Abdallah Submitted: March 12th 2019Reviewed: July 8th 2019Published: August 8th 2019.
- [34]: Ultra-Wideband(UWB)Here's everything you need to knowbleesk® Proximity marketing platform to acquire, engage and retain customers on mobile.
- [35]: H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, 2007.

- [36]: S. Gezici, "A survey on wireless position estimation," *Wireless Personal Communications*, vol. 44, no. 3, pp. 263–282, 2008.
- [37]: D. H. Titterton and J. L. Weston. *Strapdown inertial navigation technology*. IEE radar, sonar, navigation and avionics series 5. Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1997.
- [38]: National Aeronautics and Space Administration. Earth factsheet. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>, 2016. Accessed on September 7.
- [39]: *Advances in Computer Science Research*, volume 89 2019 International Conference on Wireless Communication, Network and Multimedia Engineering (WCNME 2019) A Review: The Survey of Attitude Estimation in Autonomous UAV Navigation Zhaomin Ma^{1,*}, Zhengqiang Chen¹ and Ling Huang¹ ¹ College of Electric and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, China * Corresponding author
- [40]: J. Diebel. Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors. Stanford University, Stanford, California, Tech. Rep. 94301{9010, 2006.
- [41]: W. R. Hamilton. On quaternions; or on a new system of imaginaries in algebra. *Philosophical Magazine*, xxv, 1844.
- [42]: Quaternions and Rotations* (Com S 477/577 Notes) Yan-Bin Jia Sep 10, 2013
- [43]: J.-Y. Wen and K. Kreutz-Delgado, "The attitude control problem", *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 36, no. 10, pp. 1148-1162, 1991.
- [44]: T. W. Barrett., « History of Ultra Wideband radar and communication: Pionners and innovators ». *Progress in Electromagnetic Symposium*, Juillet 2000.
- [45]: Nour ZAAROUR : « modélisation d'un canal minier ultra large bande (uwb) en utilisant les réseaux de neurones artificiels rbf ». Université du québec en abitibi-témiscamingue. Avril 2013

- [46] : RAFRAFI, Wassim. Intégration d'un système radio à bande ultra-large pour la navigation de robots mobiles. 2016. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal.
- [47] : « Caractéristiques de la technologie à bande ultralarge » RECOMMANDATION UIT-R SM.1755-0*.2006
- [48] : Mohamed Ayyach, Etude d'un système d'acquisition rapide des signaux UWB à très large bande en milieu miné souterrain 2013.
- [49] : Jorge Arturo PARDIÑAS MIR. Contribution à l'étude de la détection des signaux UWB. Etude et implémentation d'un récepteur ad hoc multicapteurs. Applications indoor de localisation. Ecole doctorale : Informatique, Télécommunications et Electronique (EDITE de Paris). décembre 2012
- [50] DUROC, Yvan. Contribution au développement de modèles orientés système pour les antennes des communications Ultra Large Bande. 2007. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [51] : Michel Terré « Cours du Conservatoire National des Arts et Métiers » Conservatoire National des Arts et Métiers. Novembre 2006
- [52]: F. Nekoogar, « Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications », Prentice Hall, ISBN-13: 978-0132782234, September 2005.
- [53] : Fofana NezoIbrahim , « contribution aux architectures protocolaires pour un système de localisation dans un réseau de capteurs sans fil basé sur une couche physique 802.15.4a UWB » . Université de Toulouse-Jean Jaurès . 6 juillet 2017 .
- [54]: UWB Anchors for Indoor Location Tracking
- [55]: <http://m.woxuuwb.com/info/uwb-localization-techniques-tof-and-tdoa-33994308.html>
- [56]: Taponecco, L. D'Amico, A.A. Mengali, U, « Joint TOA and AOA Estimation for UWB Localization Applications », IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume : 10, Issue: 7, 2011.

[57] : DALCE Réjane. « Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur ». Université de Toulouse 26 juin 2013

[58] : techniques de localisation TDoA et ToA. Février 2018

[59]; Rami Mazraani, Manuel Saez, Leonardo Govoni, Daniel Knobloch, « Experimental Results of a Combined TDOA/TOF Technique for UWB Based Localization Systems » . Research and Development Department Munich,Germany.

[60]: RéjaneDalce, Adrien van den Bossche, Thierry Val. « A study of the ranging error for Parallel Double Sided-Two Way Ranging protocol ». HAL Id: hal-01523697. 16 May 2017.

[61] : Ibrahim Nezo Fofana, Adrien van den Bossche, Thierry Val. Un banc de mesure de ranging pour la localisation par ToF de nœuds UWB pour les Réseaux de Capteurs Sans Fil et l'Internet des Objets. Toulouse-Blagnac, France.Juin 2015

[62] : Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO).2015

[63] : Mathias Pelka, Daniel Amann, Marco Cimdins et Horst Hellbrück. Évaluation des méthodes de télémétrie basées sur le temps : Le choix est-il important ?.Université de Lübeck, Allemagne,

[64]: AzzedineBoukerche, « Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks », Wiley,November 2008.

[65]: Kobenan Ignace Kossonou. Étude d'un système de localisation 3-D haute précision basé sur les techniques de transmission Ultra Large Bande à basse consommation d'énergie pour les objets mobiles communicants.Mai 2014

[66] : Markus Hempel . Programmation et évaluation d'un système de mesure de distance à ultra-large bande pour robots mobiles. 22 janvier 2019
Superviseur

[67] : Bilal Wehbé .Radiolocalisation en milieu interne dynamique avec la technique d'empreinte digitale et les réseaux ANN. Université de Québec en Abitibi-Témiscamingue. Novembre 2015

[68] : ANTHONY TAOK. « Localisation dans les milieux confinés : combinaison de l'UWB et les réseaux de neurones dans un algorithme de localisation par signature ». Université du QUÉBEC.Mai 2008.

[69] : G. Wassi, «Radio localisation en milieu confiné non stationnaire », Master's thesis, pp. 29-33, May 2005.

[70] : Evanaska Maria Barbosa Nogueira, « Conception d'un système d'antennes pour la Localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fils », thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.

[71]: Inpixon indoor intelligence: <https://www.inpixon.com/blog/uwb-localization-tdoa-vs-twr>

[72]: Yan, Junlin Algorithms for indoor positioning systems using ultra-wideband signals Remote Sensing (RS), Mathematical Geodesy and Positioning (MGP), Delft University of Technology 23 december 2010.

[73]: Zeke SEDOR « UWB Localization for Autonomous Indoor Position Control of VTOL UAVs ». September 15,2018

[74]: Wang EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2015) 2015Linear least squares localization in sensor networks Yue Wang

[75]: K.W. Cheung, H.C. So, W.K. Ma, and Y.T. Chan, «Least squares algorithms for time-ofarrival-based mobile location » IEEE Trans. Signal Process., vol.52, April 2004.

[76]: Richard B. Langley. « Dilution of Precision ».University of New Brunswick. GPS WORLD May 1999.

[77]: STROHMEIER, Martin, LENDERS, Vincent, et MARTINOVIC, Ivan. Lightweight location verification in air traffic surveillance networks. In : Proceedings of the 1st ACM Workshop on Cyber-Physical System Security. 2015. p. 49-60.

[78]: Analog devices .Understanding Global Positioning System Receiver Specifications

[79] : LONCHAY, Matthieu. Précision du positionnement par satellites: influence de la géométrie de la constellation. 2009. Thèse de doctorat. Université de Liège, Liège, Belgium.

[80] : François Glineur. Etude des méthodes de point intérieur appliquées a la programmation linéaire et à la programmation semi définie,1997.

[81]: F. A. Potra and S. J. Wright, "Interior-point methods", Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 124, no. 1-2, pp. 281-302, 2000.

[82] : Hichem BELATTAR, « Quelques considérations sur le filtre de Kalman discret », université de Sherbrooke, Québec, Canada, mars 2017.

[83] : Caroline Keramsi Thibault Porteboeuf Florian Thorey, « Les filtres de Kalman ». Mars 2011.

[84] : Sciences et Techniques From Chaos to Control « le filtre Kalman intérêts et limites ».22 Avril 2011.

[85] : ARNAUD, Elise. Méthodes de filtrage pour du suivi dans des séquences d'images- Application au suivi de points caractéristiques. 2004. Thèse de doctorat. Université Rennes 1.

[86], Youngjoo Kim and Hyochoong Bang. introduction to Kalman filter and its applications. November 2018

[87]: KOSSONOU, Kobenan Ignace. Étude d'un système de localisation 3-D haute précision basé sur les techniques de transmission Ultra Large Bande à basse

consommation d'énergie pour les objets mobiles communicants. 2014. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis; Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire).

[88]: M. Ghavami, Ultra wideband signals and systems in communication engineering, John Wiley & Sons Ltd, Angleterre, 2e édition, 2007.

[89]: 10e Symposium de l'IFAC sur le contrôle des robots Fédération internationale de contrôle automatique 5-7 septembre 2012. Dubrovnik, Croatie Un filtre de Kalman étendu biaisé pour la localisation intérieure d'un agent mobile à l'aide d'une IMU à faible coût et d'un réseau de capteurs sans fil UWB A. Benini, A. Mancini, A. Marinelli, S. Longhi Université Polytechnique des Marches, Département d'Ingénierie de l'Information (DII), Ancône, Italie (email: a.benini@univpm.it) Afin d'améliorer le poste

[90]: Manon Kok, Jeroen D. Hol et Thomas B. Schöon (2017), "Using Inertial Sensors for Position and Estimation de l'orientation", Fondements et tendances du traitement du signal : Vol. 11 : No. 1-2, pp 1-153.

<http://dx.doi.org/10.1561/2000000094>

[91]: M. Ghavami, Ultra wideband signals and systems in communication engineering, John Wiley & Sons Ltd, Angleterre, 2e édition, 2007.][UPTEC E 18 020 Examensarbete 30 hp Juni 2018 Réseau de capteurs sans fil UWB avec application médicale Joakim Lindström UPPSALA UNIVERSITET

[92]: DW1000 User manual how to use, configur and program the DW1000 UWB TRANSCEIVER © Decawave Ltd 2017 DW1000 User Manual Version 2.18

[93]: Fiche technique DWM1000 © Decawave Ltd 2016 Sujet à changement sans préavis Version 1.7

[94]: APH001 Note d'application guide de conception matériel DW1000 Version 1.1 © Decawave 2018.

[95]: Fiche technique ATMEGA328 (PDF) - ATMEL Corporation

[96]:<https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardProMini>

[97]: Module de dérivation Ftdi basé sur l'usb pleine vitesse FT230xq à la broche de prise IcUart de base

[98]: Future Technology Devices International Ltd UMFT201XB, UMFT220XB et UMFT230XB Datasheet Version 1.3 Document Reference No.: FT_000506 Clearance No.: FTDI# 272

[99]: S. Adler, S. Schmitt, K. Wolter et M. Kyas. Une enquête sur l'évaluation expérimentale dans la recherche en localisation intérieure. Dans Actes de la conférence internationale IEEE sur le positionnement intérieur et la navigation intérieure (IPIN), pages 1{10, Ban_, Alberta, Canada, octobre 2015.

[100]: I. Skog et P. Händel. Technologies de positionnement et de navigation embarquées { Une enquête. Transactions IEEE sur les systèmes de transport intelligents, 10(1):4{21, 2009., H. Chao, Y. Cao et Y. Chen. Pilotes automatiques pour petits véhicules aériens sans pilote : une enquête. The International Journal of Control, Automation and Systems, 8(1):36(44, 2010).

[101]: MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions Document Number: RM-MPU-6000A-00 Revision: 4.2 Release Date: 08/19/2013

[102]: InvenSense Inc.

1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A.

Tel: +1 (408) 988-7339 Fax: +1 (408) 988-8104

Website: www.invensense.com

Document Number: PS-MPU-6000A-00

Revision: 3.4

Release Date: 08/19/2013 MPU-6000 and MPU-6050

Product Specification

[103]: ABDELLAH CHEHRI Étude d'un réseau de capteur UWB pour la localisation et la communication dans un environnement minier Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en génie

électrique pour l'obtention du grade de Philosophiae docteur (Ph.D.)FACULTE DES SCIENCES ET DE GENIEUNIVERSITÉ LAVALQUÉBEC2009.

[104]Federal Communications Commission (FCC), "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems," First Report and Order, ET Docket 98-153, FCC 02-48; Adopted: February 2002; released: April 2002.

[105]: Electronic Communications Committee (ECC), "The harmonised conditions for devices using Ultra-Wideband (UWB) technology in bands below 10.6 GHz," Decision (06)04, Approved: March 2006.

[106]: LukaszZwirello, Tom Schipper, Marlene Harter, Thomas Zwick, "UWB Localization System for Indoor Applications: Concept, Realization and Analysis", Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 2012, Article ID 849638, 11 pages, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/849638>

[107]: ZWIRELLO, Lukasz, SCHIPPER, Tom, HARTER, Marlene, et al. UWB localization system for indoor applications: concept, realization and analysis. Journal of Electrical and Computer Engineering , 2012, vol. 2012 , Article ID 849638, 11 pages, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/849638>

[108]:<https://docs.arduino.cc/foundations/basics/whats-arduino>