

Système de Positionnement Local (LPS) : UWB

I. INTRODUCTION	3
II. SPECIFICATIONS DU SYSTEME	4
A. Technologies LPS existantes	4
B. Définition du LPS basé sur l'UWB	5
C. Description générale du système basé sur l'UWB [4]	5
D. Méthodes de calculs utilisées avec UWB	6
E. Spécifications techniques du prototype du système mis en œuvre	9
III. DÉVELOPPEMENT ET TESTS PRÉLIMINAIRES DU PROTOTYPE	10
A. Module UWB de M5	10
B. Programmation des modules	11
Configuration du module en tant qu'ancre	12
Configuration du module en tant que tag	13
C. Traitement et visualisation des données	15
D. Environnement de test 3D	20
IV. ANALYSE DES RÉSULTATS DU TEST	25
A. Méthode d'analyse	25
B. Analyse de la précision	26
C. Analyse de l'exactitude (% d'erreur)	28
V. CONCLUSION	34
VI. BIBLIOGRAPHIE	35

I. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un partenariat entre l'Icam site de Nantes et le club professionnel des Neptunes de Nantes Volley-Ball, un projet d'innovation a été lancé autour de la mise en place d'un système de suivi des déplacements en salle, dédié à la pratique sportive. Ce projet vise à enrichir les outils de suivi déjà existants, en apportant une solution de localisation précise, capable de fonctionner efficacement dans un environnement indoor.

Le système développé repose sur la technologie Ultra Wide Band (UWB), choisie pour sa grande précision et sa robustesse. Le principe consiste à équiper les joueuses de balises mobiles, dont la position est calculée à partir des distances mesurées entre ces balises et plusieurs ancrés fixes positionnées autour du terrain. Ce dispositif permet de reconstituer la trajectoire de déplacement d'une joueuse en temps réel.

Durant cette première phase du projet, un prototype a été conçu puis testé dans un environnement contrôlé. Plusieurs campagnes de mesure ont été menées, avec deux balises différentes, dans le but d'évaluer les performances du système dans des conditions représentatives d'un usage sportif. Les données collectées ont permis d'analyser la stabilité des mesures et leur proximité avec les positions attendues.

Ce rapport présente tout d'abord le fonctionnement général du système, ainsi que ses spécifications techniques. Il revient ensuite sur les tests réalisés, en détaillant les résultats obtenus et les méthodes utilisées pour les analyser. Enfin, une évaluation globale des performances permet de tirer des conclusions sur la fiabilité du système, et d'identifier les perspectives d'évolution pour les prochaines étapes du projet.

II. SPECIFICATIONS DU SYSTEME

Un Local Positioning System (LPS) est un système permettant de localiser un objet ou une personne dans un espace clos, là où les technologies de positionnement global comme le GPS deviennent inopérantes ou imprécises. Contrairement aux systèmes GNSS qui s'appuient sur des satellites, un LPS repose sur des références locales fixes (appelées ancrées) et des balises mobiles (tags), avec lesquelles il calcule la position par mesure de distance ou d'angle.

Ce type de technologie est utilisé dans divers secteurs : logistique (suivi de palettes), santé (localisation de matériel hospitalier), sport (analyse de performance), ou encore robotique mobile.

A. Technologies LPS existantes

Plusieurs technologies sont employées pour la localisation indoor :

Technologies	Précision typique	Portée	Avantages	Inconvénients
Bluetooth (BLE)	1-5 m	10-50 m	Coût faible, faible consommation	Faible précision, sensible aux obstacles
Wi-Fi	5-10 m	20-100 m	Infrastructure existante	Latence élevée, interférences
Ultrasons	1-2 cm	2-5 m	Bonne précision en ligne directe	Sensible à la lumière, non utilisable sans visibilité
Infra-rouge	< 1 m	5-10 m	Haute précision	Portée très limitée, perturbations sonores

UWB (Ultra Wide Band)	10 à 30 cm	10-50 m	Haute précision, robuste aux interférences	Nécessite des modules spécifiques
-----------------------	------------	---------	--	-----------------------------------

Tableau 1./5]

B. Définition du LPS basé sur l'UWB

Un LPS avec UWB fonctionne grâce à l'émission de signaux radio à large bande passante (≥ 500 MHz), entre 3,1 GHz et 10,6 GHz. Le système repose sur la mesure du temps de vol des signaux pour estimer les distances entre une balise mobile (tag) et des points de référence fixes (ancres), dont les positions sont connues.

Les distances sont ensuite utilisées pour reconstituer la position du tag dans l'espace, via des algorithmes de trilateration ou multilateration. L'ensemble est géré par un système embarqué ou une plateforme externe pour visualiser les données en temps réel.[3][5]

Pour clarifier, la trilateration est une méthode mathématique permettant de déterminer la position relative d'un point en utilisant les distances à trois points de référence. Dans le contexte de notre projet, on parle de multilateration lorsque l'on utilise plus de trois points (distances).

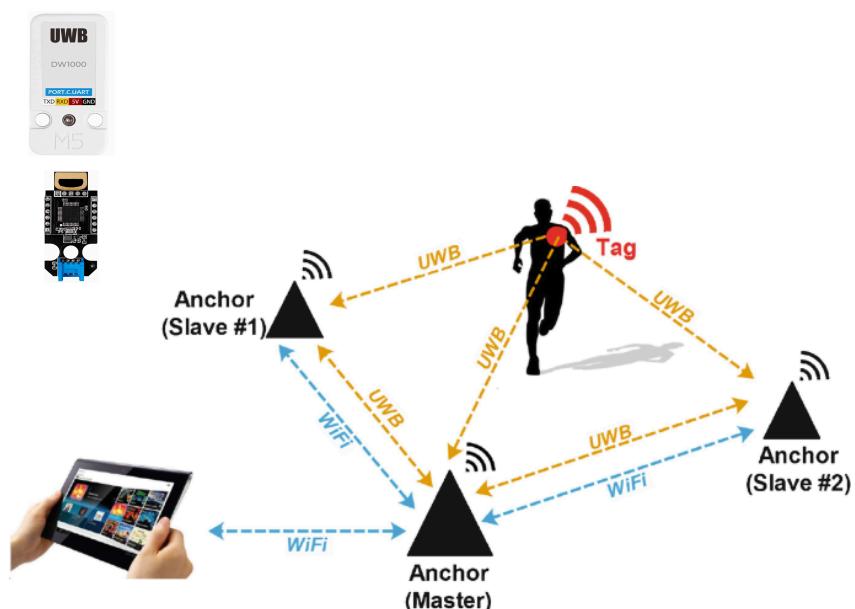
C. Description générale du système basé sur l'UWB [4]

Le système repose sur un principe de communication entre une **balise mobile** (tag) portée par une joueuse, et des **ancres fixes** disposées dans la salle d'entraînement. Ces éléments échangent des signaux UWB, dont les caractéristiques temporelles permettent de calculer la **distance entre le tag et chaque ancre**.

Le système développé comprend :

- **Une balise mobile (tag)** : module M5 UWB monté sur un microcontrôleur M5Stack (ATOM), placé sur la joueuse.
- **Quatre ancre fixes** : placées aux coins du terrain (18×9 m), pour couvrir l'espace de manière optimale.
- **Une unité centrale (PC ou microcontrôleur)** : collecte les données, exécute les calculs de position et assure la visualisation.

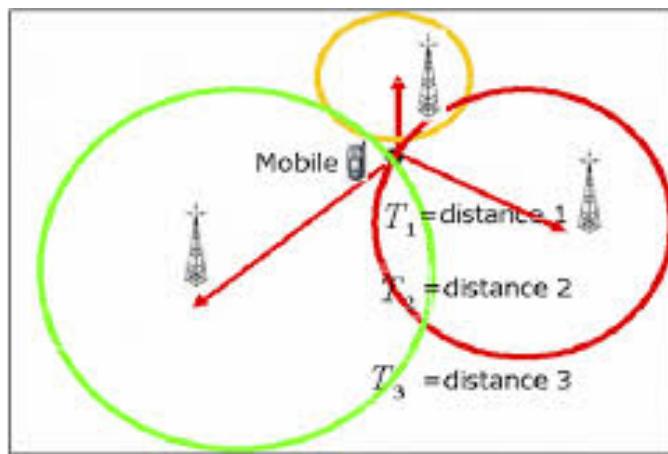
Ce positionnement s'effectue selon des méthodes de calcul basées sur le **temps de vol** ou **l'angle du signal**.



D. Méthodes de calcul utilisées avec UWB

1. Time of Arrival (TOA) Technique [1]

L'heure d'arrivée est la technique de télémétrie la plus simple et la plus courante. Cette méthode est basée sur la connaissance de l'heure exacte à laquelle un signal a été envoyé par la cible, l'heure exacte à laquelle le signal arrive à un point de référence et la vitesse de déplacement du signal (généralement la vitesse de la lumière).



Une fois ces éléments connus, la distance par rapport au point de référence peut être calculée, calculée à l'aide de l'équation simple :

$$d = c * (t_{arrival} - t_{sent})$$

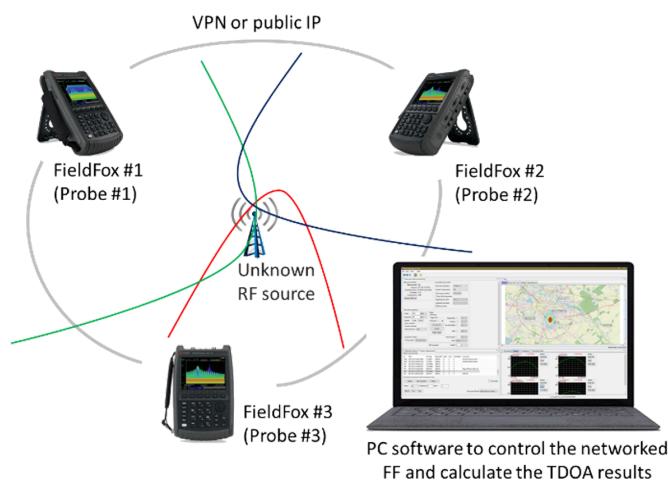
Où C est la vitesse de la lumière. En utilisant cette distance, l'ensemble des emplacements possibles de la cible peut être déterminé. En deux dimensions, on obtient un cercle dont l'équation est la suivante :

$$d = \sqrt{(x_{ref} - x)^2 + (y_{ref} - y)^2}$$

où (x_{ref}, y_{ref}) est la position connue du point de référence. Une fois que cet ensemble est calculé pour suffisamment de points de référence (au moins trois pour les dimensionnels ou au moins quatre pour les tridimensionnels), la position exacte de la cible peut être calculée par en trouvant l'intersection.

2. Time Different of Arrivals (TDOA) Technique [2]

La différence de temps d'arrivée est la deuxième technique de télémétrie la plus répandue et elle est un peu plus polyvalente que la ToA. Cette méthode ne nécessite pas l'heure à laquelle le signal a été envoyé par la cible, mais seulement l'heure à laquelle le signal a été reçu et la vitesse à laquelle le signal a été envoyé. Une fois le signal reçu à deux points de points de référence, la différence de temps d'arrivée peut être utilisée pour calculer la différence de distance entre la cible et les deux points de référence.



Cette différence peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta d = c * (\Delta t)$$

où c est la vitesse de la lumière et Δt la différence entre les temps d'arrivée à chaque point de référence. Entre les temps d'arrivée à chaque point de référence. Dans deux dimensions, cela conduit à l'équation suivante :

$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x)^2 - (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 - (y_1 - y)^2}$$

où (x_1, y_1) et (x_2, y_2) sont les positions connues des balises. En utilisant la régression non linéaire, cette équation peut être convertie en forme d'hyperbole. Une fois que d'hyperboles, la position de la cible peut être calculée en trouvant l'intersection.

E. Spécifications techniques du prototype du système mis en œuvre

Eléments	Spécification/ Valeur
Technologie	UWB (Ultra Wide Band)
Modules utilisés	M5Stack ATOM + M5 UWB module
Fréquence UWB	3,1 à 10,6 GHz
Largeur de bande	≥ 500 MHz
Méthodes de mesure	TOA (principalement), explorations TDOA
Intervalle de mesure	5 à 50 fois (selon configuration du tag)
Nombre d'ancres	4 (aux coins du terrain de 18 m \times 9 m)
Précision attendue	Entre 10 et 30 cm dans les meilleures conditions
Traitement des données	Visualisation / interface série
Environnement testé	Gymnase sans obstacle

III. DÉVELOPPEMENT ET TESTS PRÉLIMINAIRES DU PROTOTYPE

A. Module UWB de M5

Les modules UWB de M5 sont préfabriqués et préconfigurés pour être simplement connectés sur n'importe quel microcontrôleur M5, de sorte que seule une configuration minimale est requise pour leur utilisation. En ce cas, nous avons utilisé le M5 Atom Matrix, mais le principe est toujours le même avec ce module. Ce microcontrôleur assure l'interface avec l'utilisateur, la communication série, et l'alimentation.

Selon la documentation du fabricant, les modules sont prêts à être intégrés dans un système de positionnement. Ils adoptent le module Ai-Thinker BU01, un module émetteur-récepteur à bande ultra-large (UWB) basé sur le DW1000 de Decawave, ainsi qu'un STM32 intégré avec un algorithme (firmware) de télémétrie qui ne prend en charge que la transmission des informations relatives à la distance. Il n'est pas possible d'accéder, ou du moins d'accéder directement, au microcontrôleur STM32, de sorte que cet algorithme ne peut pas être modifié. Le seul moyen de communiquer avec ce microcontrôleur pour configurer le module UWB est d'utiliser des commandes AT via la communication série. Les commandes prises en charge sont les suivantes:

- AT+RST : Réinitialise le module
- AT+version : Récupère le fabricant, la série du module et le numéro de version. Cela peut être utile pour vérifier la connexion.
- AT+interval=value : Définit l'intervalle de mesure de distance. “value” détermine combien de mesures sont effectuées avant d'envoyer la distance.
 - Plage acceptable : de 5 à 50.
 - Des valeurs plus élevées entraînent des taux de rafraîchissement plus lents, mais une mesure théoriquement plus fiable.
- AT+anchor_tag=model,ID : Définit le mode de l'appareil et son identifiant.
 - model=1 : Définit le module en mode ancre.
 - model=0 : Définit le module en mode tag.

- ID : Assigne un identifiant à l'ancre ou au tag.
- AT+switchdis=value : Contrôle si le mesurage de distance est activé (valable uniquement en mode tag).
 - value=0 : Désactive le mesurage de distance.
 - value=1 : Active le mesurage de distance.

Ces commandes nous donnent déjà un indice sur la méthode de positionnement par défaut utilisée dans ces modules, que nous confirmerons plus tard dans leur mise en œuvre. Le module utilise TWR (Two-Way Ranging) par défaut. Même si la documentation indique qu'il prend en charge TWR et TDOA, il n'est pas possible de le modifier. C'est pourquoi l'implémentation de ces modules est si simple et ne nécessite aucune synchronisation entre eux. Cela explique également que l'information envoyée par le tag est uniquement la distance à chaque ancre et pas la position, il est donc nécessaire d'implémenter un algorithme de trilateration ou de multilatération par la suite.

Dans la mise en place d'un système, il prend en charge la configuration d'un maximum de 4 dispositifs comme ancrés, mais un seul dispositif configuré comme tag en même temps. Cela signifie que nous avons trouvé le premier inconvénient de ce module pour répondre aux exigences, car si nous voulons suivre au moins une équipe complète de volley-ball, nous avons besoin d'un système avec 6 tags fonctionnant simultanément. Cependant, en tant que prototype pour le développement initial de ce projet, il fonctionne très bien.

B. Programmation des modules

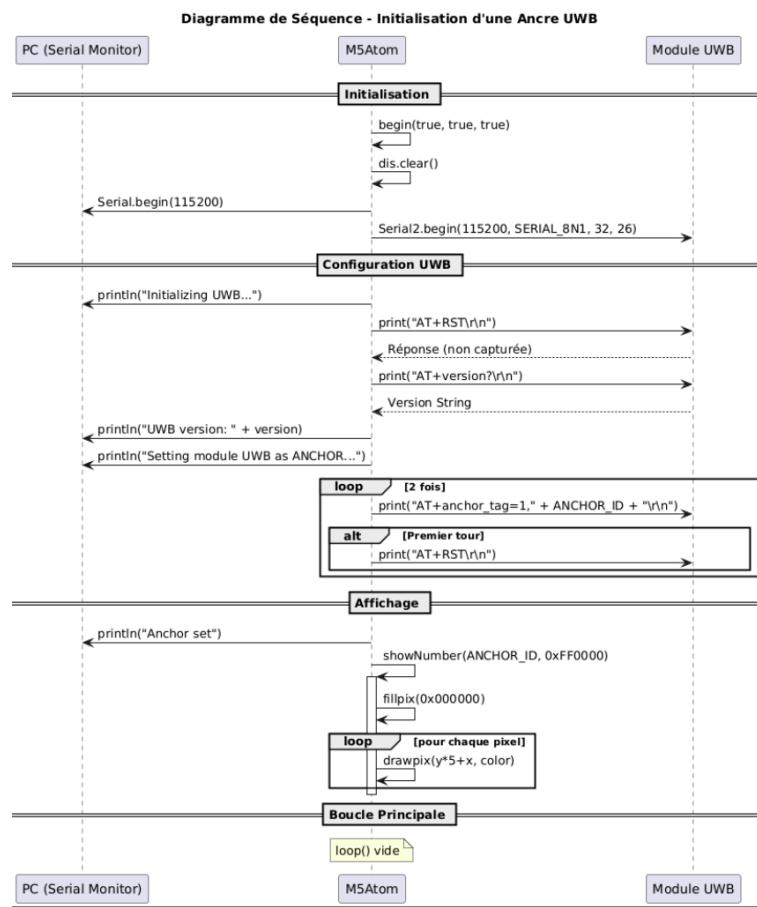
Pour la programmation des modules nous avons utilisé l'IDE Arduino. Après la configuration de l'environnement et l'installation des bibliothèques, conformément à la documentation, la programmation peut commencer. Comme indiqué précédemment, la configuration des modules se fait au moyen d'un script chargé sur le microcontrôleur connecté au module UWB, dans notre cas le M5 Stack Atom Matrix. Ce microcontrôleur est chargé de transmettre les commandes AT au module par l'intermédiaire de l'UART (communication série). Il reçoit également les données de distance lorsque le module est configuré comme un tag.

Configuration du module en tant qu'ancre

Ce code n'utilise que la fonction `setup()`, car son objectif principal est de configurer le module UWB en tant qu'ancre, ce qui ne doit être fait qu'une seule fois. Le processus est le suivant :

1. Initialisation des périphériques: Activation de la matrice LED du M5 Atom et des interfaces série.
2. Communication avec le module UWB:
 - a. Envoi de la commande de réinitialisation (“AT+RST”) pour s’assurer que le module démarre dans un état propre.
 - b. Vérification de la connexion avec la commande “AT+version?”.
3. Configuration en mode ancre:
 - a. Utilisation de la commande “AT+anchor_tag=1,X”, où X correspond à l’identifiant de l’ancre.
 - b. Cette commande est envoyée deux fois, après un nouveau redémarrage du module, conformément à la documentation technique du fabricant.
4. Affichage de l’identifiant: Pour faciliter l’identification physique des ancre dans l’environnement, la matrice LED 5x5 de l’Atom Matrix est utilisée pour afficher l’identifiant assigné à l’ancre en rouge. Une fonction spécifique permet d’allumer les LEDs nécessaires afin de former le chiffre correspondant.

Ce processus peut être visualisé dans le diagramme suivant:



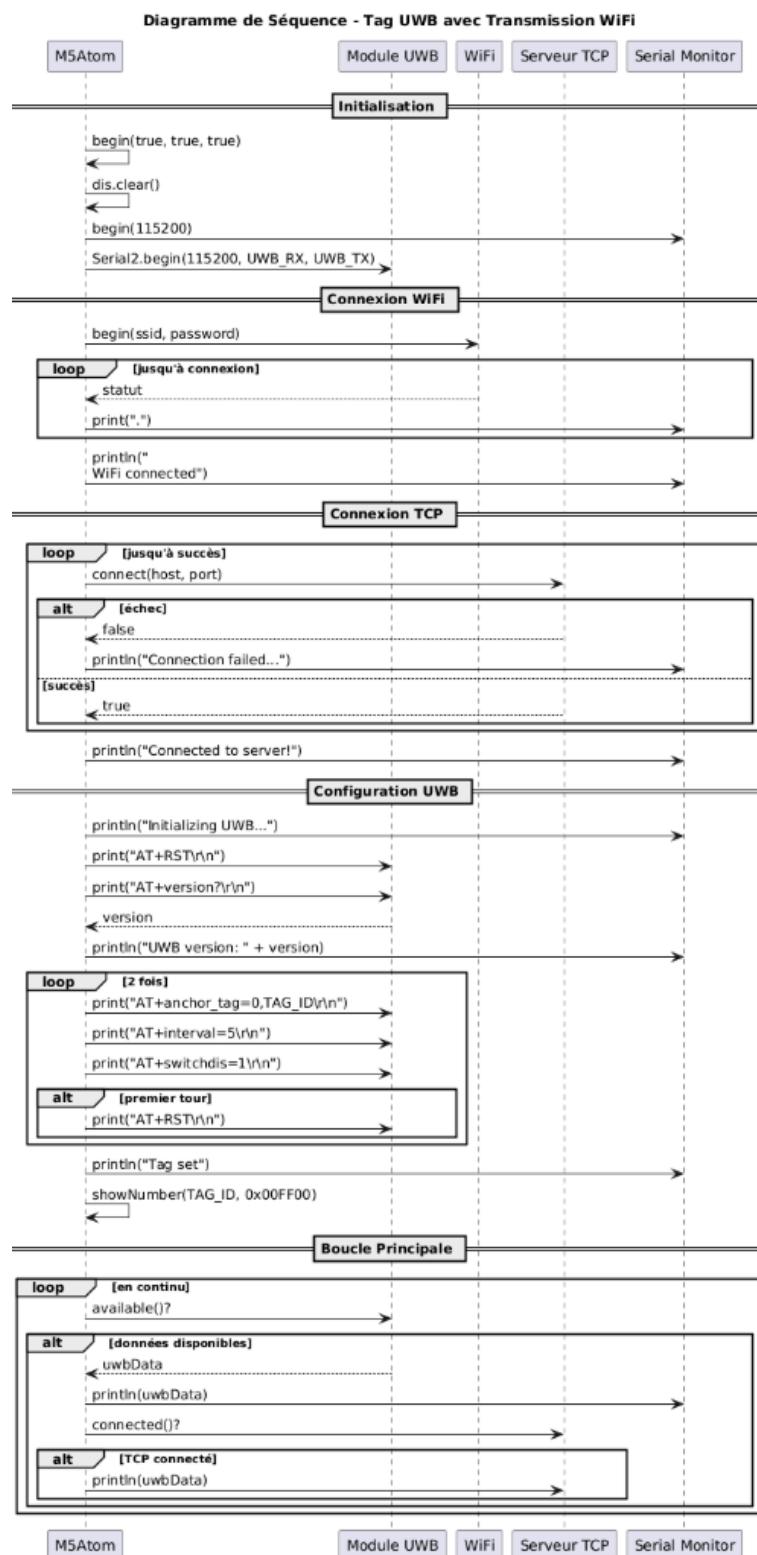
Configuration du module en tant que tag

Comme pour la configuration en tant qu'ancre, la configuration en tant que tag ne doit être effectuée qu'une seule fois. Cependant, la configuration d'un module en tant que tag implique l'envoi constant de données au microcontrôleur, de sorte qu'il faut gérer la réception de ces informations et leur envoi ultérieur au dispositif qui les traitera, en ce cas, un ordinateur. Le processus est le suivant:

1. Initialisation des périphériques: Activation de la matrice LED du M5 Atom et des interfaces série.
2. Connexion au Wi-Fi et au serveur TCP:
 - a. Connexion au réseau Wi-Fi avec les identifiants définis
 - b. Tentative de connexion à un serveur TCP avec l'adresse IP et le port spécifiés.
Le programme attend qu'une connexion réussie soit établie.
3. Communication avec le module UWB:
 - a. Envoi de la commande de réinitialisation (“AT+RST”) pour s’assurer que le module démarre dans un état propre.
 - b. Vérification de la connexion avec la commande “AT+version?”.
4. Configuration en mode tag:
 - a. Envoi des commandes AT :
 - i. “AT+anchor_tag=0,X”, où X correspond à l'identifiant du tag.

- ii. “AT+interval=5” pour définir la fréquence de mesure.
 - iii. “AT+switchdis=1” pour activer la mesure de distance.
 - b. Cette commande est envoyée deux fois, après un nouveau redémarrage du module, conformément à la documentation technique du fabricant.
5. Affichage de l'identifiant: Pour faciliter l'identification physique des ancre dans l'environnement, la matrice LED 5x5 de l'Atom Matrix est utilisée pour afficher l'identifiant assigné à l'ancre en vert. Une fonction spécifique permet d'allumer les LEDs nécessaires afin de former le chiffre correspondant.
6. Transmission des données
- a. Les données reçues depuis le module UWB via UART sont lues.
 - b. Si la connexion TCP est active, ces données sont immédiatement transmises au serveur. Toutefois, les données sont également envoyées par voie sérielle en cas de connexion physique.

Ce processus peut être visualisé dans le diagramme suivant:



C. Traitement et visualisation des données

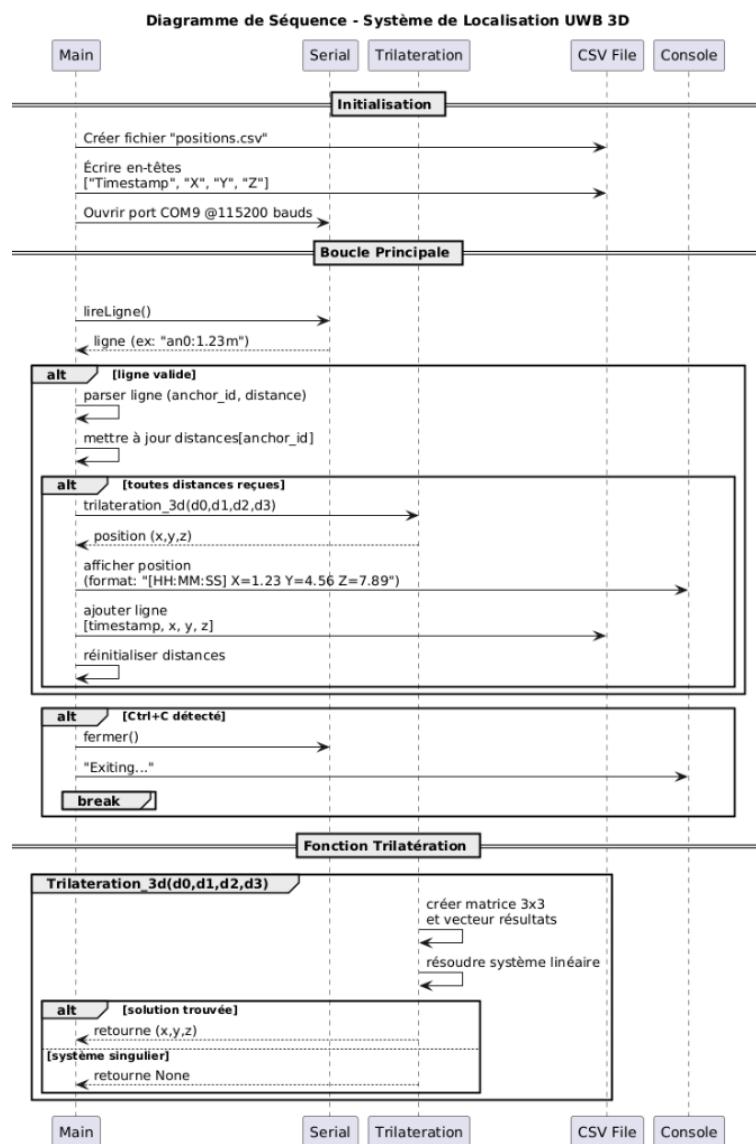
Une fois les données envoyées, soit par voie serielle, soit par WiFi via un serveur TCP, deux scripts Python se chargent de les recevoir, de les traiter et de les afficher.

Tout d'abord, il est important de noter que les données pour un système à 4 ancre ont la structure suivante, où, par exemple, "an2:2.88m" signifie que la distance du tag actuel par rapport à l'ancre dont l'id est 2 est de 2.88 mètres. :

```
an0:0.79m  
an1:6.25m  
an2:2.88m  
an3:1.14m
```

Ainsi, le premier script reçoit simplement ces informations, applique un algorithme de multilatération pour calculer la position du tag dans l'espace sous forme de coordonnées d'un plan cartésien et enregistre ces informations ainsi que l'horodatage (moment du calcul de la position) dans un fichier CSV.

Le diagramme ci-dessous correspond à l'explication complète de ce script pour le calcul de la position en 3D. Cependant, la logique du code est toujours la même, qu'il soit bidimensionnel ou tridimensionnel, la seule chose qui varie un peu est la mathématique appliquée dans la fonction de trilateration ou multilatération.



Pour la version finale de notre système, nous avons mis en œuvre une technique de multilatération 2D. Il s'agit de calculer la position dans un plan (x et y) à partir de la distance du tag par rapport à 4 points (ancres), où la distance entre chaque point est connue. Le processus de cette méthode, tel qu'il est mis en œuvre dans le code, est expliqué ci-dessous :

1. Chaque distance mesurée par le tag définit un cercle autour de chaque ancre, dont le rayon est précisément cette distance. C'est-à-dire qu'au final, nous aurions 4 équations de ce style, une pour chaque ancre, où (x_i, y_i) est le centre du cercle (la position de chaque ancre dans le plan) et d_i est le rayon (la distance calculée par le tag).

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2$$

2. Ces équations ne sont pas linéaires car elles contiennent des termes élevés au carré. En développant ces équations et en soustrayant la équation 0 de chacune des autres équations, on élimine les termes au carré, ce qui permet d'obtenir des équations linéaires.

Équation 0 :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = d_0^2$$

$$x^2 - 2xx_0 + x_0^2 + y^2 - 2yy_0 + y_0^2 = d_0^2$$

Équation 1 :

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2$$

$$x^2 - 2xx_1 + x_1^2 + y^2 - 2yy_1 + y_1^2 = d_1^2$$

Maintenant on soustrait l'équation 0 de l'équation 1 :

$$-2x(x_1 - x_0) - 2y(y_1 - y_0) = d_0^2 - d_1^2 - x_0^2 + x_1^2 - y_0^2 + y_1^2$$

3. La même procédure peut être appliquée aux deux autres équations restantes, ce qui donne un système linéaire d'équations représenté par :

$$A \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = b$$

Où A est :

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_0) & 2(y_1 - y_0) \\ 2(x_2 - x_0) & 2(y_2 - y_0) \\ 2(x_3 - x_0) & 2(y_3 - y_0) \end{bmatrix}$$

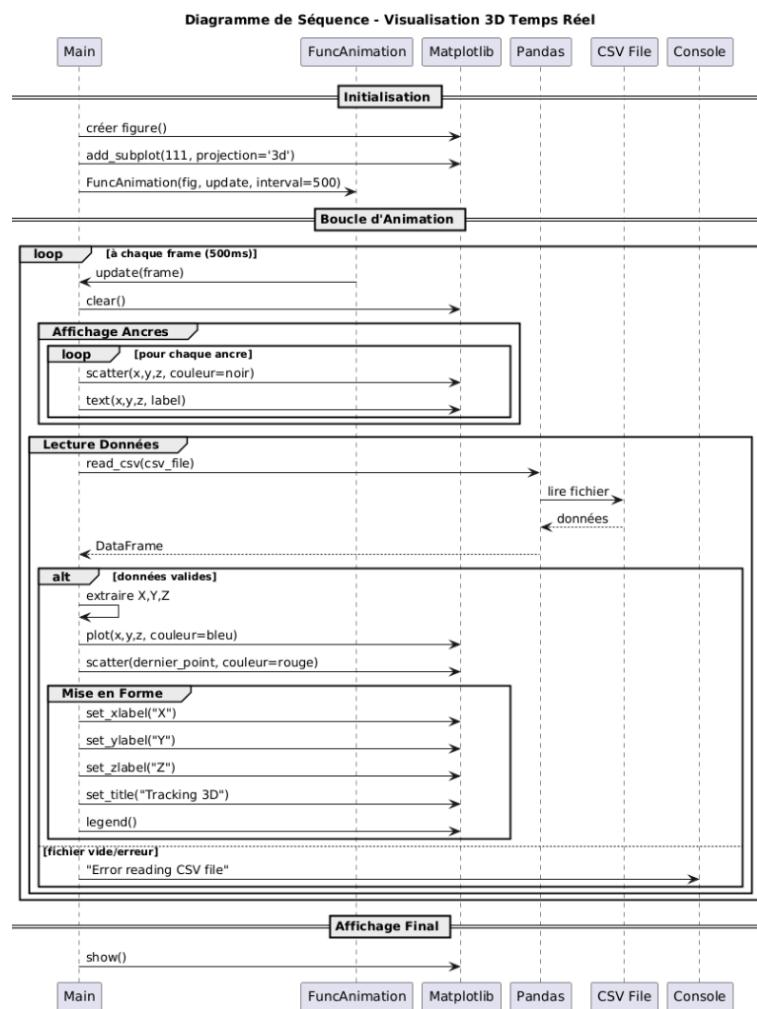
Et b est :

$$b = \begin{bmatrix} d_0^2 - d_1^2 - x_0^2 + x_1^2 - y_0^2 + y_1^2 \\ d_0^2 - d_2^2 - x_0^2 + x_2^2 - y_0^2 + y_2^2 \\ d_0^2 - d_3^2 - x_0^2 + x_3^2 - y_0^2 + y_3^2 \end{bmatrix}$$

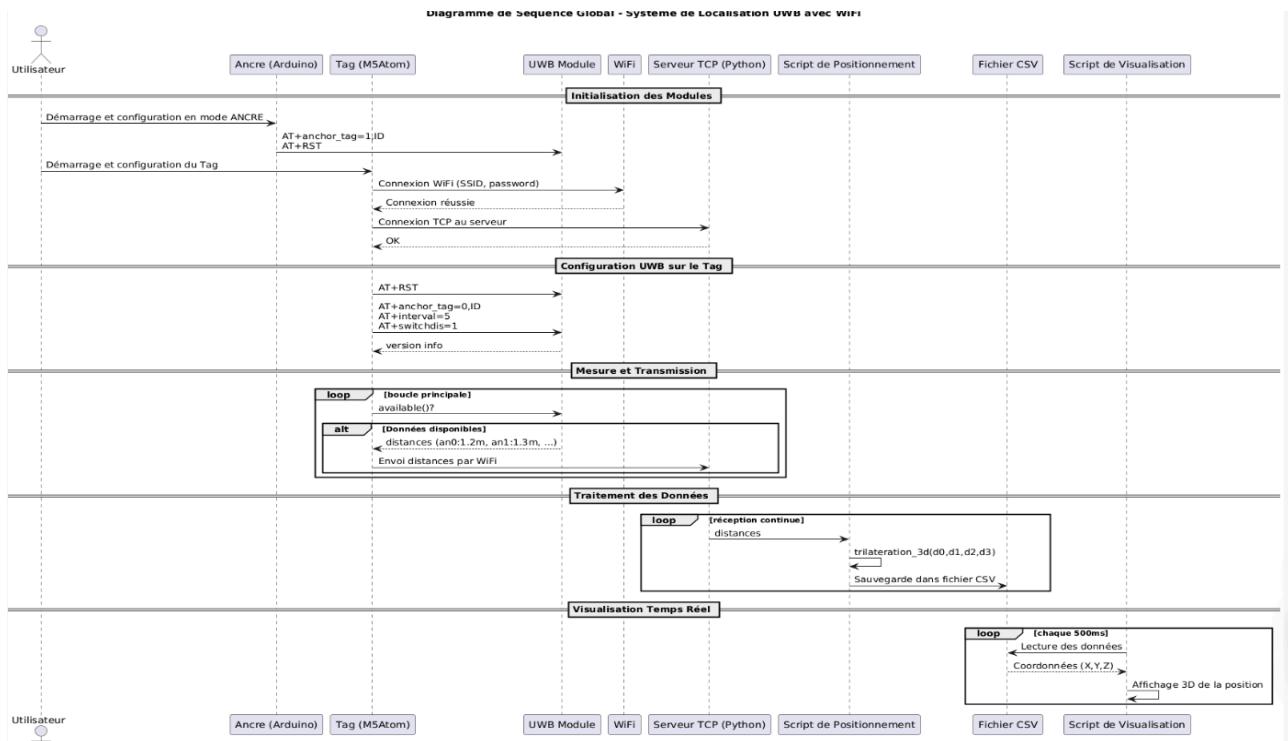
4. Notez que nous avons 3 équations mais seulement deux inconnues. Cela signifie que le système est surdéterminé et qu'il n'existe pas de solution exacte. C'est pourquoi il a été décidé de résoudre le système par la méthode des moindres carrés, car il s'agit d'une méthode qui trouve le vecteur X qui a la meilleure estimation statistique. Pour

ce faire, la bibliothèque python numpy possède une fonction `np.linalg.lstsq(A, b)` qui calcule la meilleure solution en utilisant uniquement les matrices A et b comme paramètres. Ceci même si les mesures sont bruitées ou imparfaites.

Il est important de mentionner que ce calcul et le stockage du résultat dans un fichier CSV s'effectuent en temps réel, alors que le tag continue d'envoyer des données. C'est à ce stade que le script de visualisation joue un rôle important, car il ouvre ce fichier CSV et affiche la position calculée dans le plan. En d'autres termes, il trace la position du tag, les points où les ancre sont placées et montre également en temps réel comment le tag se déplace dans l'espace.

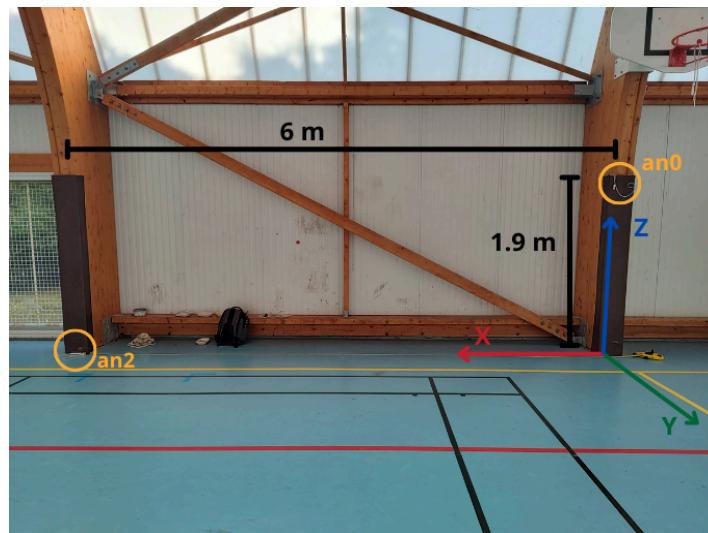


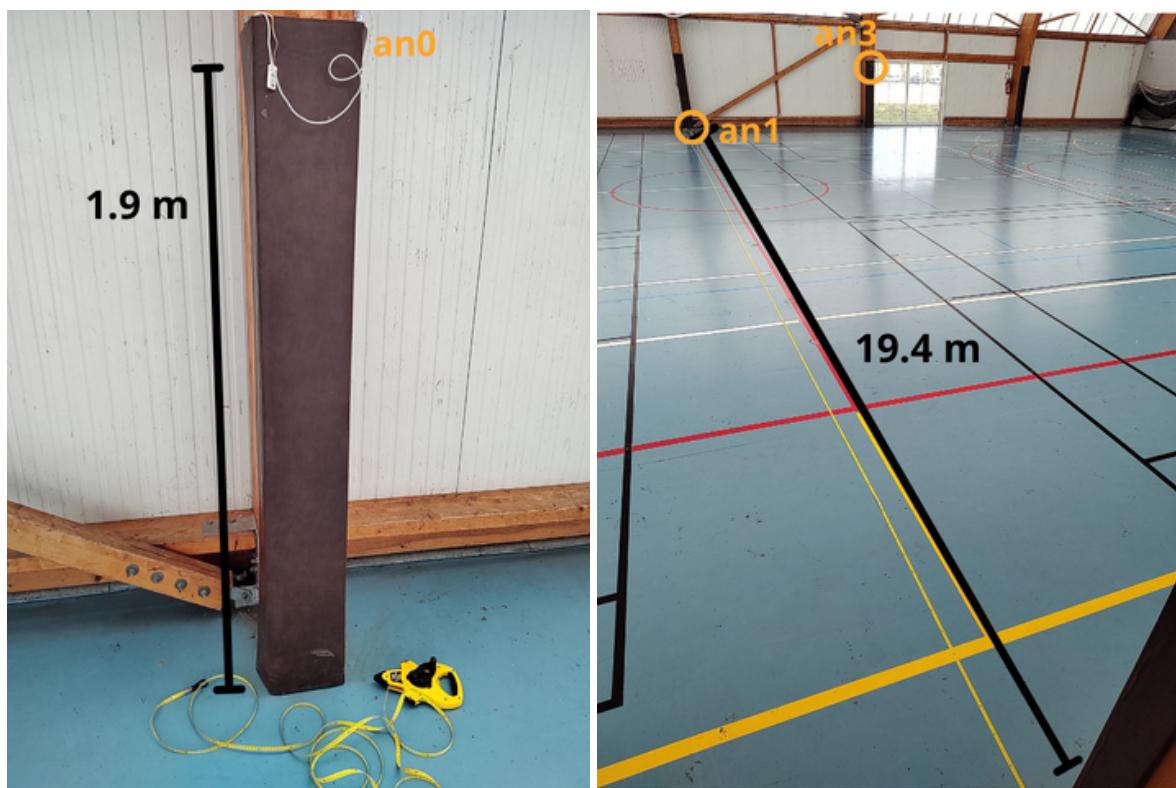
Le diagramme de séquence global pour l'ensemble du système avec communication WiFi est présenté ci-dessous :



D. Environnement de test 3D

L'environnement de test était un gymnase spacieux et dégagé, sans obstacles. Nous avons placé les ancre dans une forme rectangulaire, créant ainsi un espace tridimensionnel dont l'origine se situe au niveau du sol sous l'ancre 0. Ainsi, l'axe X positif part de ce point vers l'ancre 2, l'axe Y positif vers l'ancre 1 et l'axe Z positif au-dessus du sol. Cette distribution peut être vue plus clairement ci-dessous.

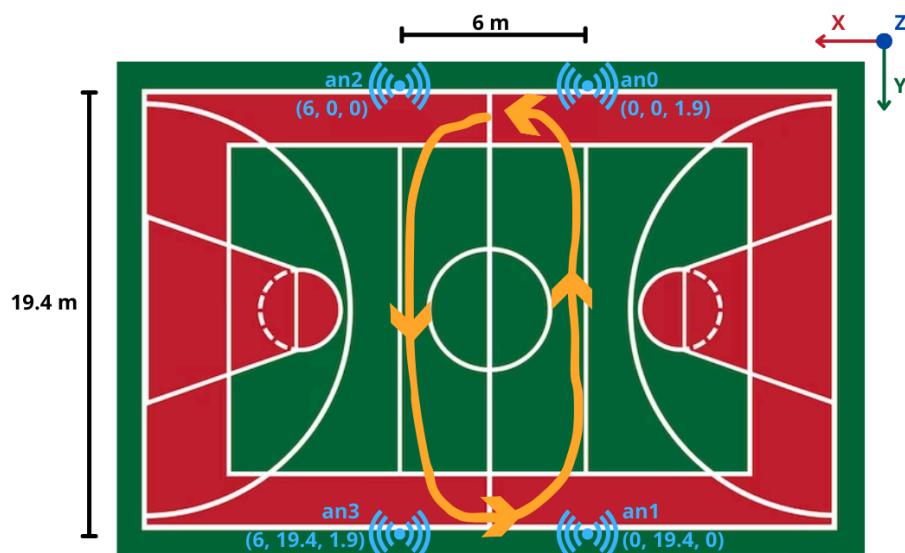




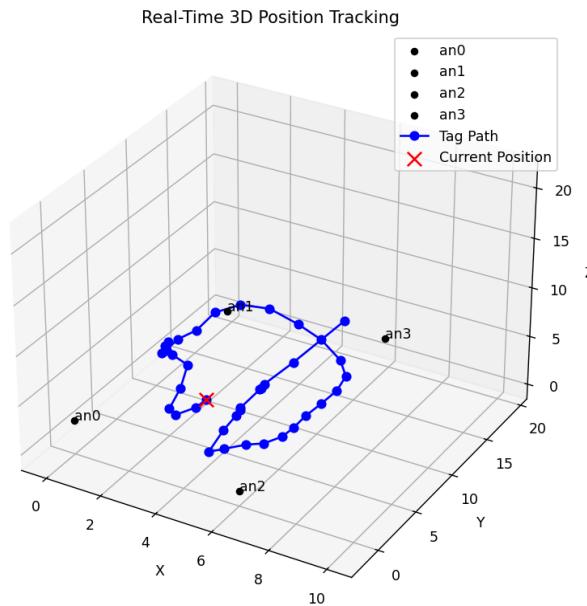
Une représentation de la vue de dessus, ainsi que le parcours réalisé pour chaque test, sont présentés ci-dessous. C'est important de noter que pour chaque parcours, les tags se sont déplacés verticalement dans la limite de l'amplitude naturelle des mouvements humains (jusqu'à environ 1 mètre). Le mouvement horizontal était le rythme de marche normal d'un adulte.

- Test 1

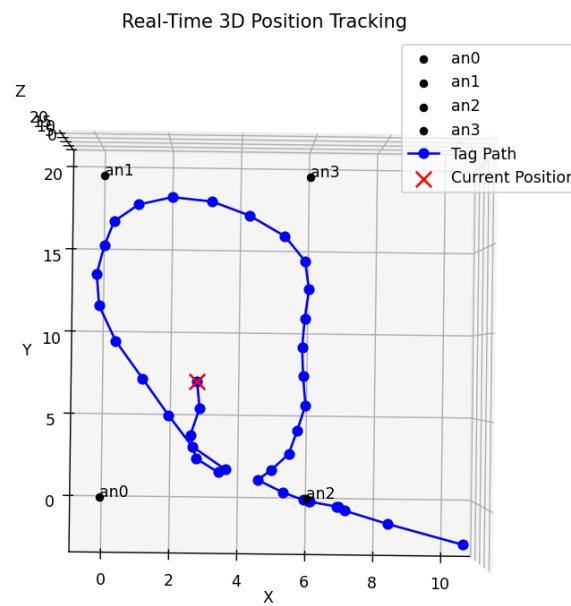
Pour ce premier test nous avons utilisé le tag dont l'id est 0. La différence avec l'autre tag réside dans la configuration de l'intervalle d'envoi de données (commande "AT+interval")



Vue tridimensionnelle par défaut du premier test où l'on peut voir la trajectoire calculée par l'algorithme de multilatération.

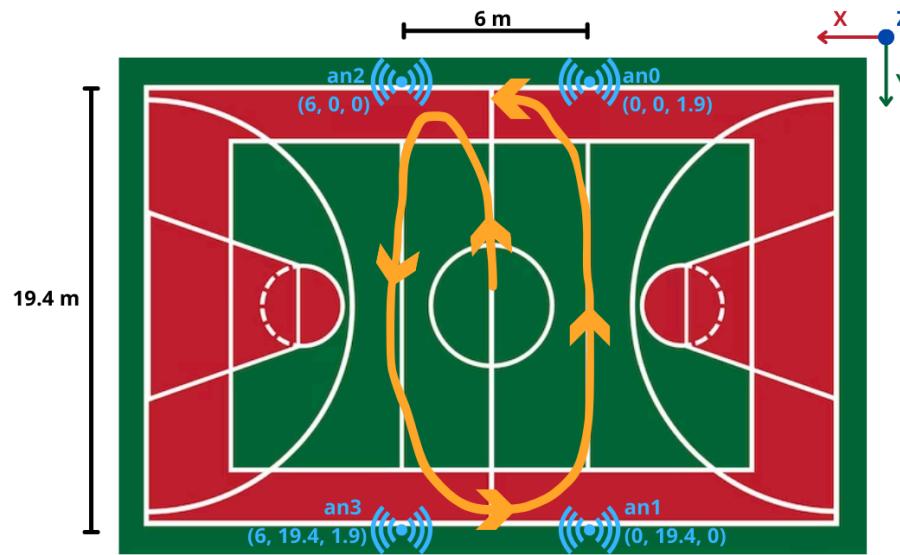


Vue de dessus (plan XY) de la trajectoire, où seul le mouvement horizontal calculé par l'algorithme est visible.

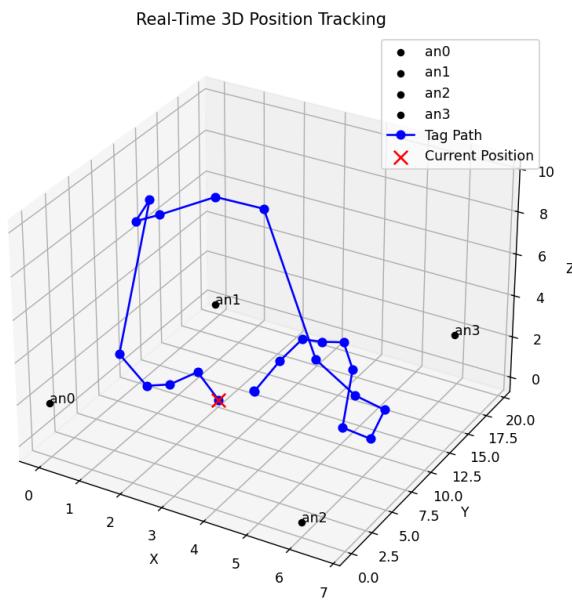


- Test 2

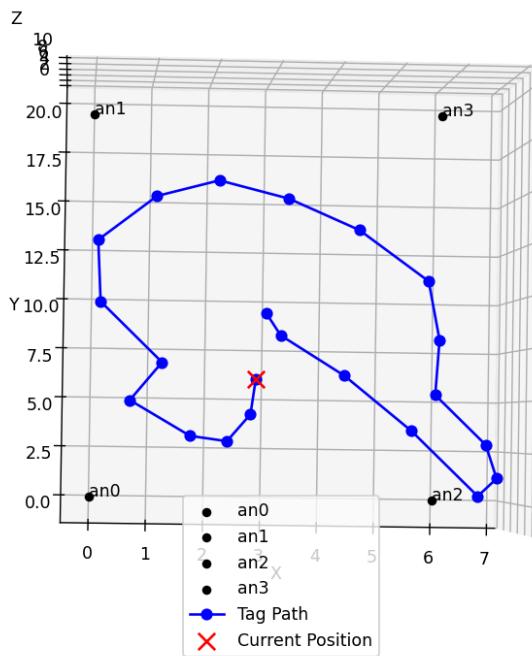
Pour ce deuxième test, le tag dont l'id est 1 a été utilisé. En ce cas, l'intervalle d'envoi de donnés était de 25.



Vue tridimensionnelle par défaut du deuxième test où l'on peut voir la trajectoire calculée par l'algorithme de multilatération.



Vue de dessus (plan XY) de la trajectoire, où seul le mouvement horizontal calculé par l'algorithme est visible.



En gros, les coordonnées en Z obtenues pour les deux tests sont incorrectes, puisqu'elles se situent en moyenne entre 1 et 10 mètres. Cela n'a pas de sens car aucun mouvement similaire n'a été effectué pendant les tests.

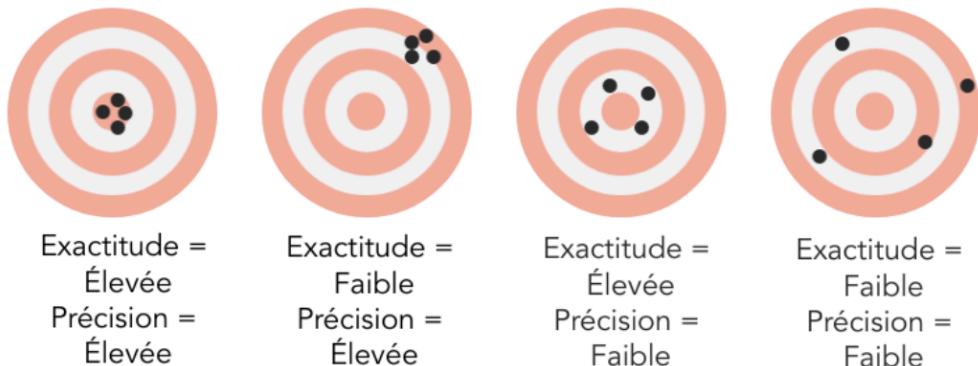
Néanmoins, la trajectoire 2D calculée dans le plan XY est cohérente avec le parcours suivi lors de l'essai. Sans tenir compte de certains points visiblement faux, la forme dessinée est très proche de la trajectoire réelle.

Enfin, il est évident qu'il y a plus de points dans les graphiques du test 1 par rapport au test 2 et pour le test 1 chaque point est plus proche de l'autre. Cela est dû à l'intervalle d'envoi de données défini pour chaque test. La mesure de la différence entre les horodatages de chaque point montre que le temps total entre l'obtention des distances et le calcul de la position à l'aide de l'algorithme de multilatération pour le test 1 est d'environ 2 secondes alors que pour le test 2 il est d'environ 7 secondes.

IV. ANALYSE DES RÉSULTATS DU TEST

A. Méthode d'analyse

Pour évaluer les performances du système de positionnement développé à partir de modules UWB, deux critères principaux ont été étudiés : l'exactitude et la précision. L'exactitude correspond à la capacité du système à fournir une mesure proche de la vraie distance, tandis que la précision concerne la stabilité des mesures (c'est-à-dire, à quel point elles sont proches les unes des autres lorsqu'on répète le test.)



©2022 Parlons sciences

Les tests ont été réalisés dans un environnement contrôlé, à savoir un gymnase vide, pour éviter autant que possible les interférences ou les réflexions de signal. Le protocole consistait à placer un tag à différentes distances bien connues par rapport à quatre ancre fixes positionnées aux coins du terrain. Pour chaque position, plusieurs mesures ont été enregistrées afin de pouvoir analyser la régularité des résultats. Deux tags différents ont été utilisés (Tag 0 et Tag 1), chacun configuré avec un intervalle d'envoi de données différent (commande “AT+interval”) : 10 fois pour le Tag 0 et 5 fois pour le Tag 1, ce qui permettait aussi d’observer si la fréquence de mesure avait un impact sur les performances.

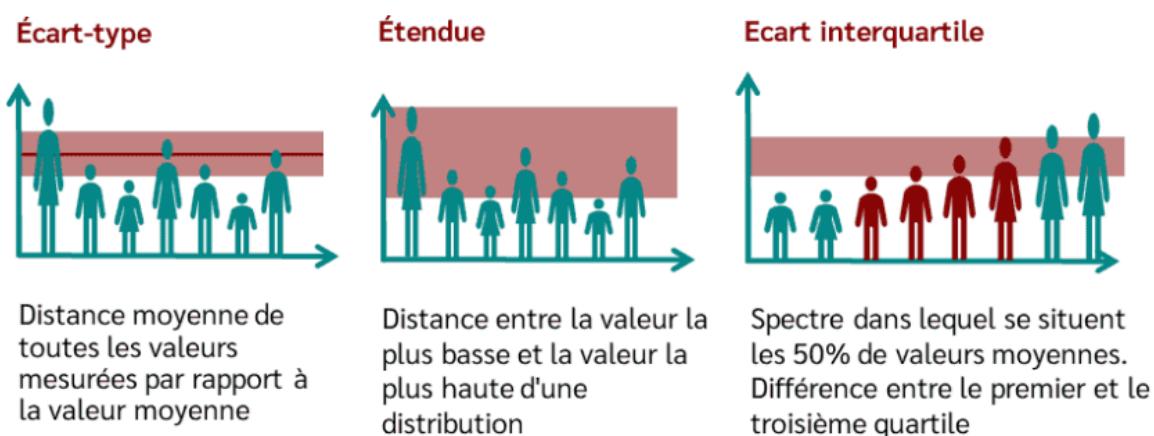
Les données ont ensuite été traitées avec Excel et Google Sheets, ce qui a permis de visualiser les résultats et de calculer les indicateurs nécessaires. L'exactitude a été évaluée à

l'aide de l'erreur moyenne absolue (MAE), qui donne une idée de l'écart moyen entre les distances mesurées et les distances réelles. Pour ce qui est de la précision, elle a été analysée à travers la dispersion des valeurs mesurées, en observant à quel point les données varient autour de la moyenne pour une même position. Ces deux approches ont permis de mieux comprendre le comportement du système.

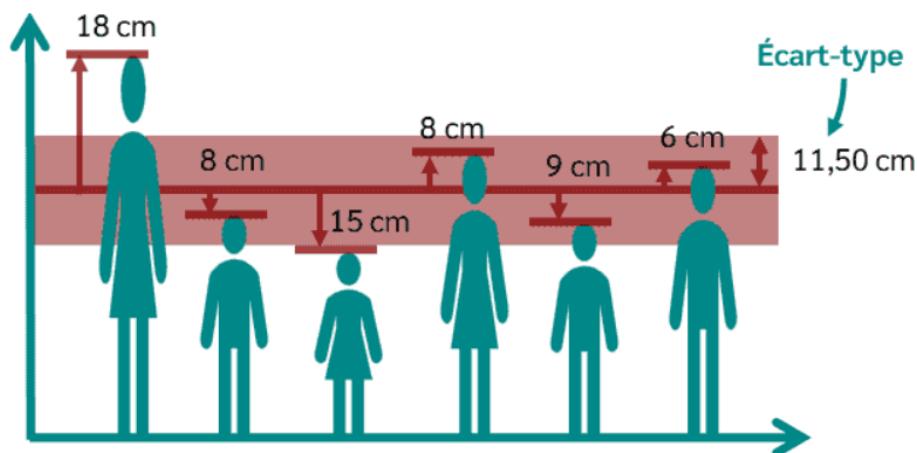
B. Analyse de la précision

1. Méthode de calcul

Comme mentionné précédemment, la précision est évaluée à travers l'analyse de la dispersion des mesures. Il existe plusieurs indicateurs permettant de décrire cette dispersion, notamment l'écart-type, la variance et l'étendue. Ces outils statistiques servent à quantifier dans quelle mesure les valeurs d'un échantillon s'éloignent d'une valeur centrale, généralement la moyenne. En d'autres termes, ils permettent de mesurer l'ampleur des fluctuations des données autour de leur valeur moyenne.



Dans le cadre de cette analyse, l'écart-type sera utilisé comme indicateur principal pour évaluer la stabilité des mesures, l'écart-type indique la dispersion d'une variable autour de sa valeur moyenne. Ainsi, l'écart-type est la déviation moyenne (moyenne quadratique) de toutes les valeurs mesurées par rapport à la moyenne.[7]



Formule :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

où :

- x_i = chaque mesure individuelle
- \bar{x} = moyenne des mesures
- n = nombre total de mesures

2. Résultat de Calcul avec Ancre 0

Tag 0	Interval=10	Ancre 1	Ancre 2	Ancre 3
Distance (m)	Ancre 0	Ancre 1	Ancre 2	Ancre 3
1	0,0993	0,0082	0,0047	0,0047
2	0,0082	0,0047	0,0000	0,0047
3	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047
4	0,0125	0,0047	0,0047	0,0047
5	0,0082	0,0082	0,0047	0,0047
6	0,0163	0,0082	0,0047	0,0403
7	0,0189	0,0047	0,0047	0,0047
8	0,0082	0,0047	0,0047	0,0047
9	0,0082	0,0047	0,0047	0,0047
10	0,0047	0,0082	0,0047	0,0047
15	0,0000	0,0047	0,0082	0,0000
20	0,0082	0,0896	0,0000	0,0082
25	0,0047	0,0082	0,0125	0,0082
30	0,0163	0,0094	0,1203	0,0125

Tableau 3.[6]

3. Résultat de Calcul avec Ancre 1

Tag 1	Interval=5			
Distance (m)	Ancre 0	Ancre 1	Ancre 2	Ancre 3
1	0,0047	0,0116	0,0047	0,0082
2	0,0047	0,0226	0,0047	0,0047
3	0,0047	0,0389	0,0047	0,0047
4	0,0047	0,0337	0,0082	0,0047
5	0,0047	0,0175	0,0047	0,0000
6	0,0047	0,0251	0,0047	0,0047
7	0,0047	0,0193	0,0047	0,0047
8	0,0047	0,0213	0,0047	0,0047
9	0,0047	0,0452	0,0082	0,0047
10	0,0047	0,0259	0,0047	0,0082
15	0,0047	0,0340	0,0000	0,0047
20	0,0047	0,0176	0,0047	0,0082
25	0,0047	0,0198	0,0125	0,0047
30	0,0082	0,0164	0,0047	0,0047

Tableau 4.[6]

C. Analyse de l'exactitude (% d'erreur)

1. Méthode de calcul

L'erreur moyenne absolue (MAE) est un indicateur utilisé pour évaluer l'exactitude d'un système de mesure, c'est-à-dire sa capacité à fournir des résultats proches des valeurs réelles. Dans notre cas, elle permet de quantifier l'écart moyen entre les distances mesurées par le système de positionnement UWB et les distances réelles connues. Le MAE est obtenu en calculant la moyenne des différences absolues entre chaque mesure et la valeur de référence. Contrairement à d'autres métriques comme l'erreur quadratique moyenne (MSE), le MAE ne donne pas plus de poids aux grandes erreurs, ce qui le rend plus intuitif et plus facile à interpréter.

Formule :

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

où :

- y_i est la valeur réelle,
- \hat{y}_i la valeur mesurée,
- n le nombre total de mesures

2. Résultat de Calcul avec Ancre 0

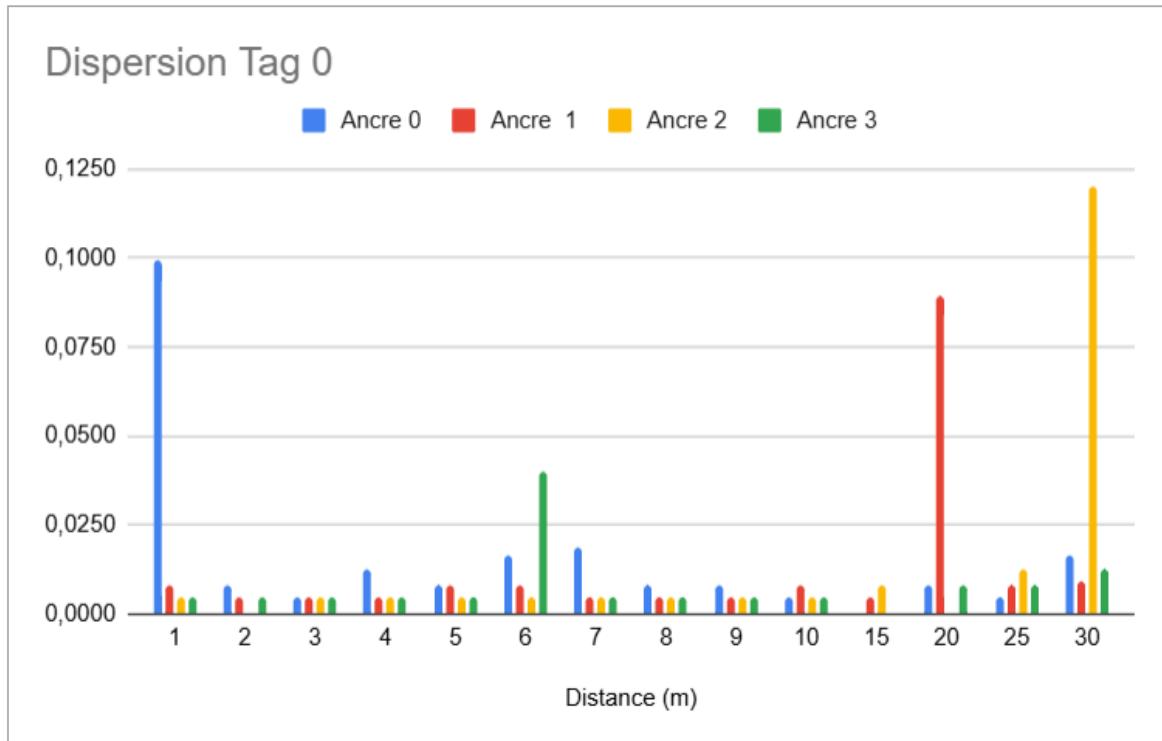
Tag 0	Interval=10				
Distance (m)	Ancre 0	Ancre 1	Ancre 2	Ancre 3	Moyenne
0	0,2000	0,1733	0,1300	0,0833	0,1467
1	0,0800	0,0400	0,1933	0,1933	0,1267
2	0,0700	0,0567	0,2000	0,1933	0,1300
3	0,0600	0,0233	0,1833	0,2567	0,1308
4	0,0300	0,1133	0,1467	0,1667	0,1142
5	0,0800	0,1400	0,1333	0,0667	0,1050
6	0,0200	0,0400	0,0133	0,3433	0,1042
7	0,0100	0,0367	0,1967	0,0667	0,0775
8	0,0000	0,1967	0,1667	0,0133	0,0942
9	0,0100	0,1567	0,1467	0,0667	0,0950
10	0,1500	0,1500	0,1367	0,0667	0,1258
15	0,0000	0,0433	0,0700	0,0200	0,0333
20	0,0200	0,0933	0,1000	0,0700	0,0708
25	0,0300	0,0100	0,0833	0,1000	0,0558
30	0,0400	0,0167	0,1700	0,1833	0,1025
Moyenne	0,0533	0,0860	0,1380	0,1260	0,1008

3. Résultat de Calcul avec Ancre 1

Tag 1	Interval=5				
Distance (m)	Ancre 0	Ancre 1	Ancre 2	Ancre 3	Moyenne
0	0,1100	0,1233	0,4233	0,1900	0,2117
1	0,0767	0,1000	0,0767	0,0700	0,0808
2	0,0533	0,0500	0,1133	0,1133	0,0825
3	0,0567	0,0667	0,1667	0,1067	0,0992
4	0,0467	0,1133	0,0200	0,0733	0,0633
5	0,0033	0,0967	0,1267	0,0900	0,0792
6	0,0167	0,0667	0,1267	0,0867	0,0742
7	0,0133	0,0500	0,0967	0,0767	0,0592
8	0,0333	0,0300	0,0933	0,0733	0,0575
9	0,0467	0,0267	0,1400	0,0667	0,0700
10	0,0367	0,0033	0,0833	0,0500	0,0433
15	0,0533	0,0500	0,1400	0,0767	0,0800
20	0,0733	0,0133	0,0233	0,0400	0,0375
25	0,0767	0,0100	0,0467	0,0533	0,0467
30	0,1600	0,0733	0,0433	0,0233	0,0750
Moyenne	0,0571	0,0582	0,1147	0,0793	0,0773

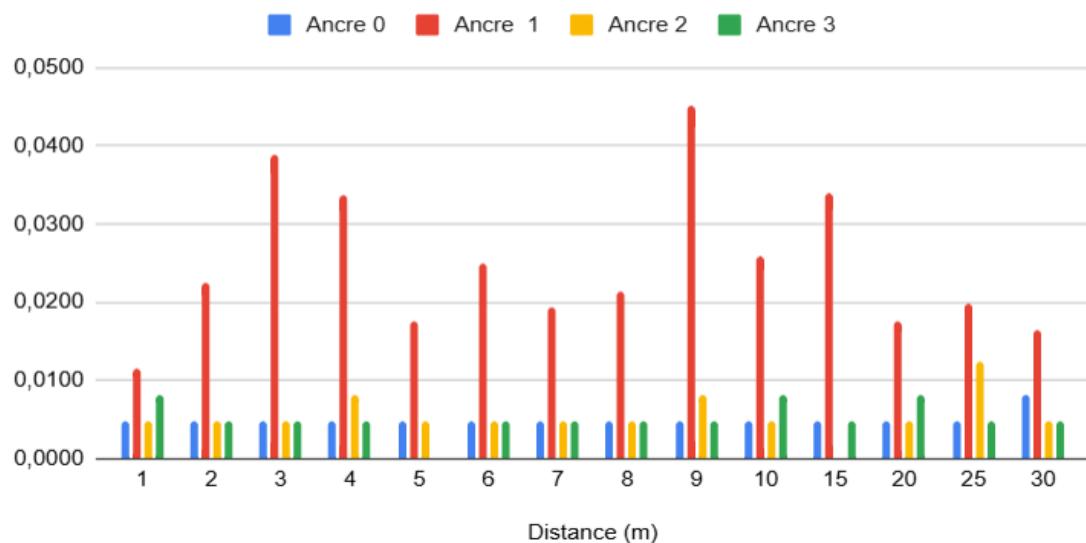
D. Graphiques et interprétations

1. Précision



Graphique 1.[6]

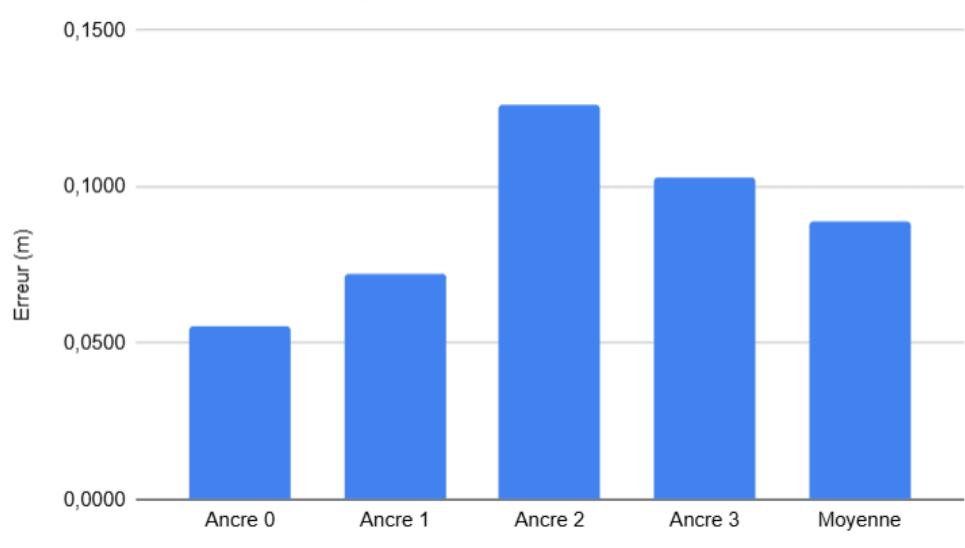
Dispersion Tag 1



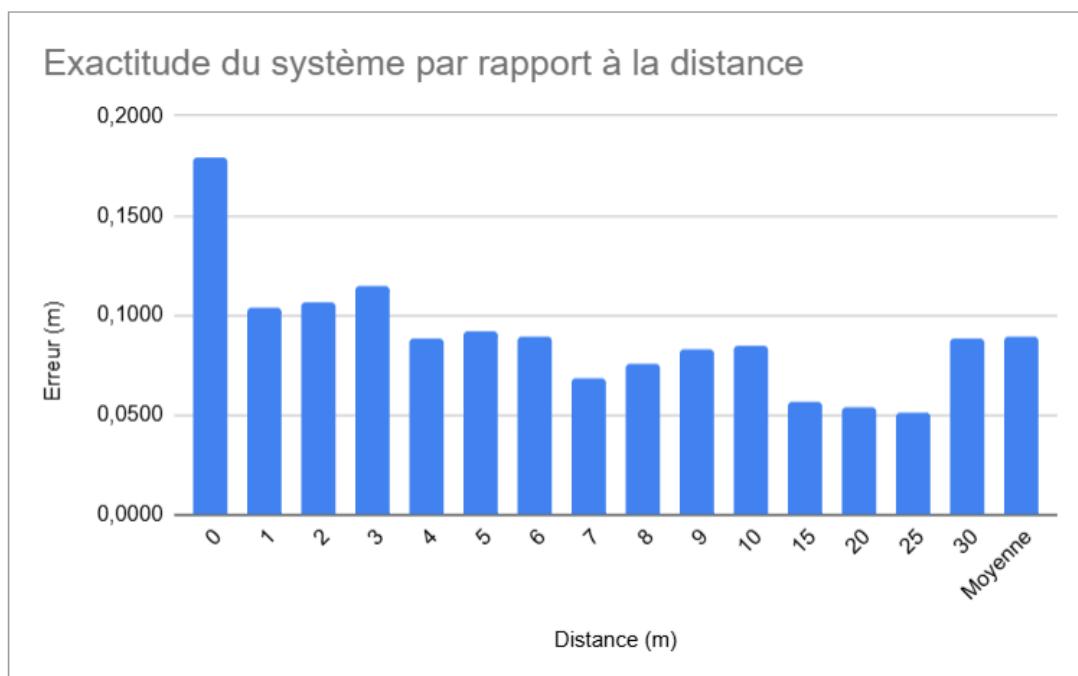
Graphique 2.[6]

2. Exactitude

Exactitude du système par ancre



Graphique 3.[6]



Graphique 4.[6]

3. Interprétation

Les résultats obtenus à travers les différents tests permettent de mieux comprendre les performances du système de positionnement UWB, tant en termes d'exactitude que de précision.

Du point de vue de l'exactitude, les mesures indiquent que le système est globalement capable de fournir des valeurs proches des distances réelles. Les erreurs moyennes absolues restent généralement inférieures à 10 cm, ce qui est tout à fait acceptable pour une utilisation dans le cadre d'un suivi de positionnement sportif ou pédagogique. Toutefois, certaines ancre (notamment l'ancre 2) présentent des erreurs plus importantes, suggérant qu'elles sont plus sensibles à l'environnement ou au positionnement. De plus, les erreurs sont plus marquées à très courte distance (0 à 3 m), ce qui peut s'expliquer par des phénomènes comme la réflexion ou la saturation des signaux à proximité immédiate.

Concernant la précision, les résultats révèlent une dispersion relativement faible des mesures, notamment avec le tag configuré à un intervalle de mesure plus rapide (5 fois). Les valeurs d'écart-type observées sont pour la plupart très faibles, souvent proches de quelques millimètres, ce qui montre une bonne répétabilité des mesures. Quelques hausses ponctuelles de la dispersion sont visibles pour certaines distances (par exemple à 20 m et 30 m), mais elles restent isolées et ne remettent pas en cause la stabilité globale du système.

Enfin, la comparaison entre les deux configurations de tags permet de souligner l'importance de la fréquence d'échantillonnage sur les performances. Le tag à 5 fois d'intervalle présente une meilleure stabilité et une erreur moyenne légèrement plus faible que celui à 10 fois, ce qui ouvre des perspectives d'optimisation pour les futures phases de développement.

En résumé, le système présente des performances globalement satisfaisantes : les mesures sont cohérentes, avec une bonne précision et une exactitude convenable. Quelques ajustements restent possibles pour améliorer certains points spécifiques (placement des ancrages, gestion des distances proches), mais les bases sont solides pour envisager une intégration dans des cas d'usage réels.

V. CONCLUSION

- Malgré sa simplicité de mise en œuvre, le module M5 UWB nous a permis d'avoir, dans cette première phase, une excellente approche de cette technologie. Nous comprenons maintenant son principe de fonctionnement, son électronique et sa programmation, et comment il est mis en œuvre pour le développement de systèmes de positionnement fonctionnels, la principale utilisation de cette technologie. Cependant, cela a été quelque peu compliqué au début en raison du manque de documentation et d'exemples dans l'utilisation de la technologie de la société M5
- C'est précisément en raison de la simplicité de ces modules que nous avons constaté deux inconvénients majeurs qui ne permettent pas de répondre aux exigences définies pour le projet :
 - La vitesse à laquelle le système obtient les relevés de position est de 1 s, alors que l'exigence est de 100 ms. En d'autres termes, notre système est 10 fois plus lent que ce qui est nécessaire. Cela est probablement dû à l'utilisation par défaut de la méthode TWR (Two-Way Ranging).
 - Un seul tag peut être utilisée à la fois, ce qui n'est pas utile dans ce contexte car si vous voulez suivre une équipe de volley-ball, vous devez avoir au moins 6 tags simultanées
- Comme indiqué dans le document, nous avons essayé de travailler avec le positionnement tridimensionnel conformément à la demande du client, mais il semble que l'ajout de cet axe supplémentaire dans les calculs rende nos approximations erronées, ce qui se traduit par des solutions mathématiques inexactes, principalement dans l'axe vertical.
- Nous avons également essayé de développer une visualisation 3D complète à l'aide d'Unity, mais cela s'est avéré très exigeant et n'entrait pas dans le cadre de ce projet. Cependant, il est recommandé de l'utiliser pour le travail de production en raison de sa robustesse, en particulier pour la visualisation 3D.

VI. BIBLIOGRAPHIE

[1] Fonctionnement LPS avec UWB. (n.d.). Google Docs.

https://docs.google.com/document/d/1jZOKJOKn_eImAFei9yuf6IhfXIDmDPbM0-5uELwNnOk/edit?tab=t.0

[2] Analyse et Test. (n.d.). Google Docs.

https://docs.google.com/document/d/1Y7HSENo59DH6T0TGZRKZN7vP2jCQZZL_C412pSam8e0/edit?tab=t.0#heading=h.tvhrv532y6ly

[3] Hasan, H. S., Hussein, M., Saad, S. M., & Dzahir, M. A. M. (2018). An Overview of Local Positioning System : Technologies, Techniques and Applications.

International Journal Of Engineering & Technology, 7(3.25), 1.

<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.25.17459>

[4] Qorvo search landing page. (s. d.). Qorvo - RF Solutions For Mobile, Infrastructure And Defense.

[https://www.qorvo.com/search?mode=1&key=Getting+Back+to+Basics+with+Ultra-Wideband+\(UWB\)&des=&exact=&any=&none=&pageNumber=1&pageSize=10&FacetCategory.DesignHub=White+Papers](https://www.qorvo.com/search?mode=1&key=Getting+Back+to+Basics+with+Ultra-Wideband+(UWB)&des=&exact=&any=&none=&pageNumber=1&pageSize=10&FacetCategory.DesignHub=White+Papers)

[5] Finding location with time of arrival and time difference of arrival techniques. (s. d.).
sites.tufts.edu.https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrock_OKeefe_F1.pdf

[6] Module tests. (n.d.). Google Docs.

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1R3G_vWIEKFL70r_vBWWefqud7cp8Kc6Iz-xjoQP1PA/edit?gid=7329166#gid=7329166

[7] *t-Test, khi-deux, ANOVA, Régression, Corrélation . . .* (n.d.).

<https://datatab.fr/tutorial/dispersion-parameter>

[8] Gustafsson, F., & Gunnarsson, F. (2005). Evaluation of Localization Algorithms. *ResearchGate*.

https://www.researchgate.net/publication/243972443_Evaluation_of_Localization_Algorithms

[9] M5Stack. (n.d.). *UWB Unit – Product Documentation*.

<https://docs.m5stack.com/en/unit/uwb>

[10] M5Stack. (n.d.). *ATOM Matrix – Core Product Documentation*.

<https://docs.m5stack.com/en/core/ATOM%20Matrix>

[11] Gustafsson, F., & Gunnarsson, F. (2005). Evaluation of Localization Algorithms.

ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/243972443_Evaluation_of_Localization_Algorithms