

Optimisation du procédé de cadenassage/décadenassage en environnement manufacturier à l'aide des technologies de localisation intérieure

par

Florian CARLIER

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN CONCENTRATION PERSONNALISÉE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE "22 OCTOBRE 2025"

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Florian Carlier, 2025



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Lucas A. Hof, directeur de mémoire
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kénné, codirecteur
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. Kim Khoa Nguyen, président du jury
Département de Génie Électrique, École de technologie supérieure

M. Souheil-Antoine Tahan, membre du jury
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE "8 OCTOBRE 2025"

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire est l'aboutissement du travail de recherche effectué dans l'objectif de l'obtention de la maîtrise en génie avec concentration personnalisé de l'école de technologie supérieure de Montréal. J'ai eu la chance d'intégrer ce programme grâce au partenariat entre l'ÉTS de Montréal et l'ENSAM, université dans laquelle je suivais le cursus d'obtention du diplôme d'ingénieur en France.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, M. Lucas Hof, ainsi qu'à mon codirecteur, M. Jean-Pierre Kenné, pour leur implication, leurs conseils avisés et leur accompagnement tout au long de ces deux années. Leur expertise et leur rigueur scientifique ont été un appui essentiel à la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite également remercier nos partenaires industriels, Cascades et CONFORMiT, dont la collaboration et l'engagement ont été déterminants pour la réussite de ce projet. Leur soutien a permis de relier la recherche académique à la réalité industrielle et d'assurer la pertinence pratique de mes travaux. Une mention spéciale à M. Kévin Chapron, de CONFORMiT, pour sa bienveillance, ses idées et son suivi régulier, qui ont apporté un cadre stimulant à cette recherche. Je remercie aussi chaleureusement M. Michel Préville, de Cascades, pour son implication, son intérêt marqué et sa disponibilité. Cette participation active a donné un sens concret à mes recherches et les a orientées vers des applications industrielles réelles.

Je tiens également à remercier tout particulièrement M. Victor Delpla, dont l'aide et l'accompagnement ont été déterminants dans la réalisation de ce mémoire. Il a eu la sympathie de m'intégrer à son propre sujet de recherche et a su m'en transmettre les clés avec patience et clarté.

Je souhaite également remercier mes camarades de travail, Rayene et Lamyae, pour leur sympathie et leur présence, notamment lors de nos déplacements à l'usine, qui ont rendu cette expérience plus agréable.

Enfin, je veux exprimer ma gratitude à ma famille pour leur soutien indéfectible. Merci à mes parents, et particulièrement à ma mère pour la relecture attentive de ce mémoire. Merci aussi à mon frère pour les parties de golf partagées, et à mes amis pour leur présence, qui a rendu mon quotidien à Montréal plus léger et agréable.

Optimisation du procédé de cadenassage/décadenassage en environnement manufacturier à l'aide des technologies de localisation intérieure

Florian CARLIER

RÉSUMÉ

Les procédures de cadenassage/décadenassage (C/D) constituent un pilier fondamental de la sécurité industrielle lors des opérations de maintenance. Malgré leur rôle central, elles présentent encore des limites significatives : erreurs humaines, manque de traçabilité des actions effectuées, difficultés d'identification des équipements à isoler et retard dans la mise à jour de la documentation technique. Ces limites compromettent la sécurité des opérateurs ainsi que l'efficacité organisationnelle des entreprises industrielles. Dans un contexte d'Industrie 5.0, l'intégration de technologies numériques avancées permettrait de renforcer et automatiser la rigueur des procédures de consignation. Ce mémoire propose d'explorer le potentiel de la technologie de localisation intérieure par Ultra WideBand (UWB) pour pallier ces insuffisances.

L'approche adoptée combine une analyse théorique des apports et limites des systèmes de localisation, le développement d'algorithmes d'optimisation pour le positionnement des ancres UWB, des simulations visant à évaluer la précision obtenue dans différents environnements, ainsi que la mise en œuvre d'une application logicielle dédiée au guidage et au suivi des opérateurs. Ainsi nos résultats montrent que lorsque les obstacles sont considérés dans le modèle de simulation, l'erreur moyenne de positionnement est de 22,5 cm contre 29,5 cm sans intégration, soit une amélioration de près de 30% en termes de précision. De plus, l'introduction de zones critiques dans l'optimisation du placement des ancres permet d'optimiser l'erreur moyenne de 45% en passant de 24,5 cm à 14,7 cm. Afin de démontrer la valeur ajoutée concrète de l'intégration de la localisation UWB dans le processus de consignation une application mobile a été développée. Les tests réalisés montrent que l'application est capable de localiser en temps réel les opérateurs et de retrouver les positions des composants critiques avec une erreur de positionnement d'environ 1 mètre. Cette valeur, bien que supérieure aux simulations, demeure tout à fait acceptable dans le contexte du LOTO.

En conclusion, ce mémoire met en évidence que l'utilisation de la technologie UWB, couplée à des algorithmes d'optimisation et à une application mobile, offre un potentiel considérable pour améliorer la précision, la sécurité et la traçabilité du processus de C/D. Les résultats expérimentaux démontrent la faisabilité et la pertinence de cette approche dans des environnements industriels complexes. Ces avancées contribuent non seulement à renforcer la sécurité des opérateurs, mais également à ouvrir la voie vers une gestion plus intelligente et résiliente des procédures critiques, s'inscrivant pleinement dans la vision de l'Industrie 5.0.

Mots-clés: Localisation en intérieur, Cadenassage/Décadenassage, Ultra WideBand, Sécurité des interventions de maintenance, Environnements industriels complexes, Optimisation du déploiement des capteurs

Optimization of Lockout/Tagout through the use of indoor positioning

Florian CARLIER

ABSTRACT

Lockout/Tagout (LOTO) procedures are a cornerstone of industrial safety during maintenance operations. Despite their critical role, they still present significant limitations : human errors, lack of traceability of performed actions, difficulties in identifying the equipment to be isolated, and delays in updating technical documentation. These shortcomings compromise both operator safety and the organizational efficiency of industrial companies. In the context of Industry 5.0, the integration of advanced digital technologies could reinforce and automate the rigor of lockout procedures. This thesis explores the potential of Ultra WideBand (UWB) indoor localization technology to address these shortcomings.

The adopted approach combines a theoretical analysis of the benefits and limitations of localization systems, the development of optimization algorithms for UWB anchor placement, simulations assessing the accuracy achieved in different environments, and the implementation of a dedicated software application for guiding and monitoring operators. Our results show that when obstacles are taken into account in the simulation model, the average positioning error decreases from 29.5 cm to 22.5 cm, representing an improvement of nearly 30% in accuracy. Furthermore, the introduction of critical zones in anchor placement optimization reduces the average error by 45%, from 24.5 cm to 14.7 cm. To demonstrate the concrete added value of integrating UWB localization into the lockout process, a mobile application was developed. Tests show that the application can locate operators in real time and retrieve the positions of critical components with a positioning error of approximately 1 meter. Although higher than simulation results, this level of accuracy remains fully acceptable in the LOTO context.

In conclusion, this thesis highlights that the use of UWB technology, combined with optimization algorithms and a mobile application, offers considerable potential to improve the accuracy, safety, and traceability of LOTO procedures. The experimental results demonstrate both the feasibility and the relevance of this approach in complex industrial environments. These advances not only reinforce operator safety but also pave the way for a smarter and more resilient management of critical procedures, fully aligned with the vision of Industry 5.0.

Keywords: Indoor localization, Lockout/Tagout, Ultra WideBand, Maintenance safety, Complex industrial environments, Sensor deployment optimization

TABLE DES MATIÈRES

		Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE	3
1.1	Introduction	3
1.2	Contextualisation	3
1.2.1	La production industrielle et ses enjeux	3
1.2.2	Les maintenances	4
1.2.3	La Maintenance Corrective	5
1.2.4	La Maintenance Préventive	5
1.2.5	La Maintenance Prédictive	7
1.2.6	Les Accidents / Incidents pendant la phase de maintenance	8
1.3	Le procédé du Cadenassage/ Décadenassage (C/D)	11
1.3.1	Le déroulé du procédé du C/D	12
1.3.2	Équipements utilisés dans le C/D	13
1.3.3	Le respect et la compréhension du procédé du C/D	14
1.3.4	Le C/D au coeur des problématiques des industries 5.0	16
1.3.5	L'intégration du C/D dans le planning de maintenance	18
1.3.6	Les équipements automatisés pour un C/D intelligent	19
1.4	Les systèmes de localisation en milieux industriels	22
1.4.1	La localisation en intérieur	22
1.4.2	Comparaison des méthodes existantes	22
1.4.3	Fonctionnement de l'UWB pour la localisation de précision	24
1.4.4	Utilisation des technologies de localisation dans les environnements industriels	27
1.4.5	Limites de l'UWB en environnement industriel et approches de correction des conditions NLOS	29
1.5	Conclusion	31
CHAPITRE 2	PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	33
2.1	Introduction	33
2.2	Présentation des partenaires industriels	33
2.3	Problématique	35
2.4	Objectifs de recherche	36
2.5	Méthodologie	38
2.5.1	Étude expérimentale de la technologie UWB	38
2.5.2	Optimisation du positionnement des ancrs	39
2.5.3	Développement d'une application mobile d'assistance au C/D	40
2.6	Conclusion	41

CHAPITRE 3	EVALUATING UWB LOCALIZATION PERFORMANCE IN MULTI-LEVEL INDUSTRIAL ENVIRONMENTS	43
3.1	Abstract	43
3.2	INTRODUCTION	44
3.3	MATERIALS AND METHODS	47
3.3.1	Qorvo DWM1001-DEV	47
3.3.2	TWR Estimations	47
3.3.3	Errors induced by Materials	48
3.3.4	Multilateration	50
3.3.5	Environment	51
3.4	Experimentation	52
3.4.1	Impact of the Floor on UWB Distance Measurement	54
3.4.2	Trajectory tracking in a multi-story environment	54
3.4.3	Optimization of Tracking Through Additional Anchors	58
3.5	DISCUSSION	58
3.6	CONCLUSION	59
CHAPITRE 4	OBSTACLE-AWARE OPTIMIZATION OF UWB ANCHOR DEPLOYMENT FOR INDUSTRIAL INDOOR LOCALIZATION	63
4.1	Abstract	63
4.2	Introduction	64
4.3	Methodology	68
4.3.1	UWB Technology and Multilateration	69
4.3.2	Impact of materials on UWB distance measurement	71
4.3.3	Impact of anchor dispersion on location accuracy	72
4.3.4	Anchor placement availability	74
4.3.5	Hybrid optimization approach development	75
4.3.6	Statistical Analysis	77
4.4	Experimental Results	77
4.4.1	Impact of Materials on UWB Distance Measurements	78
4.4.2	Effects of Obstacles on Optimized Anchor Placement	79
4.4.3	Effectiveness of Importance Zone Definition	84
4.4.4	Experimental validation in a real Environment	88
4.4.5	Comparison between Obstacle-Aware and Obstacle-Agnostic Optimization	88
4.4.6	Study of zones of importance	92
4.5	Discussion	97
4.5.1	Influence of Obstacle Materials on Localization Accuracy	97
4.5.2	Trade-Off Between Coverage and Deployment Cost	98
4.5.3	Benefits of Context-Aware Optimization in Industry	98
4.5.4	Limitations and Future Directions	100
4.6	Conclusion	100

CHAPITRE 5	CONCEPTION ET INTÉGRATION DUNE SOLUTION DE GUIDAGE PAR LOCALISATION EN INTÉRIEUR POUR LE CADENASSAGE/DÉCADENASSAGE	103
5.1	Introduction	103
5.2	Limites actuelles du procédé de Cadenassage/Décadenassage (C/D)	103
5.3	Utilisation de la localisation en intérieur pour améliorer le procédé de Cadenassage/Décadenassage	106
5.3.1	Sécurité et supervision en temps réel	106
5.3.2	Traçabilité renforcée et mise à jour automatisée des bases de données ...	106
5.3.3	Protocole de communication et architecture technique	107
5.3.4	Fonctionnalités de l'application développée	108
5.3.5	Détails techniques et méthodologiques	111
5.4	Limites actuelles de l'application développée	111
5.5	Conditions essentielles au bon fonctionnement du système	112
5.5.1	Infrastructure de localisation	112
5.5.2	Dispositifs de capture d'information	112
5.5.3	Maintien dynamique de la base de données	113
5.6	Conclusion	113
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	115
	BIBLIOGRAPHIE	119

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Tableau de comparaison des différentes technologies réalisées à partir des revues (Hayward, van Lopik, Hinde & West, 2022; Majeed, Mu'azzah <i>et al.</i> , 2024; Zafari, Gkelias & Leung, 2019) et valeur numérique* tirée de (Qorvo) 23
Tableau 3.1	Anchor coordinates (X, Y, Z) in meters for both environments 52
Tableau 3.2	Coverage and accuracy for various anchor configurations across three areas 57
Tableau 4.1	Comparative overview of anchor deployment optimization strategies for indoor localization 66
Tableau 4.2	SInterpretation of HDOP values for localization accuracy assessment . 74
Tableau 4.3	Materials and dimensions of obstacles used in experimental UWB tests 78
Tableau 4.4	Dimensions of experimental environment (A) and simulated environments (B-G) 80

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Bathtub Curve	6
Figure 1.2 Maintenance prédictive	8
Figure 1.3 Accidents/ Incidents liés à la maintenance	9
Figure 1.4 Les étapes du C/D	13
Figure 1.5 Station de cadenassage	14
Figure 1.6 Compréhension du procédé C/D	15
Figure 1.7 Évolution de l'industrie	17
Figure 1.8 Optimisation du procédé dans la maintenance	19
Figure 1.9 Incidents avec cadenas connectés	20
Figure 1.10 Amélioration du temps de C/D	20
Figure 1.11 Bande passante de l'UWB	25
Figure 1.12 Impulsion des radio fréquences UWB	25
Figure 1.13 Impulsion des autres radio fréquences	26
Figure 2.1 Améliorations de la procédure de C/D proposées	38
Figure 2.2 Contributions scientifiques, articles de revue et chapitres associés	41
Figure 3.1 Déflexion du signal UWB par un obstacle	49
Figure 3.2 Schéma de la multilatération UWB	51
Figure 3.3 Présentation des environnements expérimentaux étudiés	51
Figure 3.4 Dispersion des mesures UWB avec et sans sol	54
Figure 3.5 Précision et couverture selon le nombre d'ancres sur plusieurs étages ...	56
Figure 4.1 Cadre méthodologique de l'étude	69
Figure 4.2 Schéma de fonctionnement de la multilatération	70

Figure 4.3	Effet des matériaux sur la distance mesurée	72
Figure 4.4	Représentation des domaines de localisation	74
Figure 4.5	Effet des obstacles sur la mesure directe UWB	79
Figure 4.6	Environnements A à G sans murs en béton	80
Figure 4.7	Environnements A à G avec murs en béton	81
Figure 4.8	Nombre d’ancres après optimisation (avec/sans murs)	82
Figure 4.9	Effet de la proportion d’obstacles sur le nombre d’ancres	83
Figure 4.10	Nombre d’ancres selon la couverture des meubles	84
Figure 4.11	Impact des zones : nombre, taille, distance	85
Figure 4.12	Amélioration de la précision dans les zones critiques	87
Figure 4.13	Résultats expérimentaux avec considération d’obstacles	89
Figure 4.14	Comparaison des trajectoires avec/sans obstacles	90
Figure 4.15	Comparaison statistique des optimisations (obstacles)	92
Figure 4.16	Précision de suivi avec ou sans zones prioritaires	93
Figure 4.17	Comparaison des trajectoires avec/sans zones prioritaires	95
Figure 4.18	Comparaison statistique des optimisations (zones)	96
Figure 5.1	Schéma du protocole de communication entre les balises UWB l’opérateur et la tablette actuel	107
Figure 5.2	Schéma du protocole de communication entre les balises UWB l’opérateur et la tablette souhaité	108
Figure 5.3	Image de la fonctionnalité guider les opérateurs sur l’application	109
Figure 5.4	Enregistrement de la position du composant via l’application	110

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	2 dimensions
3D	3 dimensions
AGPS	GPS assisté
AoA	Angle d'arrivée
BLE	Bluetooth Low energy
C/D	Cadenassage/ Décadenassage
CSA	Association canadienne de normalisation
DOP	Dilution de la précision
DORS	Décret d'urgence ou réglementaire, série
FCC	Commission fédérale des communications
GDOP	Dilution globale de la précision
GPS	Système de positionnement global
HDOP	Dilution horizontale de la précision
HDPE	Polyéthylène Haute Densité
IA	Intelligence Artificielle
IMU	Unité de mesure inertielle
IoT	Internet des Objets
IRSST	Institut de recherche Robert Saint Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISO	Organisation internationale de normalisation
LOS	Ligne de vue
LOTO	Cadenassage/ Décadenassage
NLOS	Pas de ligne de vue
OSHA	Loi sur la santé et la sécurité au travail
PDR	Navigation à l'estime pour piétons
QR	Réponse rapide

RF	Radio Fréquences
RFID	Identification par radiofréquence
RSSI	Indicateur de Force du Signal Reçu
SA	Recuit simulé
TS	Recherche Tabou
TWR	Télémétrie bidirectionnelle
UWB	Ultra WideBand
Wi-Fi	Wireless Fidelity

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

f	Fréquence en Hertz (Hz)
d	Distance en centimètres (cm)
S	Superficie en mètres carrés (m ²)
MSE	Erreur quadratique moyenne (Mean Square Error)
c	Vitesse de la lumière dans le vide
ToF	Temps de vol d'une onde (Time of Flight)
T_{RTT}	Temps aller-retour d'une onde (Round-trip time)
Δ_T	Délai introduit par le receveur
d_m	Distance mesurée
d_r	Distance réelle
ϵ	erreur
w	Largeur de l'obstacle
R	Indice de réfraction
A_i	Ancre d'indice i
d_i	Distance entre le tag et l'ancre d'indice i
P_R	Puissance du signal reçu
P_T	Puissance du signal transmis
f_c	fréquence du signal UWB
G	Gain de l'antenne UWB
$L_{MATERIAL}$	Perte de puissance dans l'obstacle
π	Constante
H	Matrice jacobienne
C	Matrice de covariance

INTRODUCTION

L'industrie manufacturière moderne évolue dans un contexte où l'efficacité opérationnelle doit cohabiter avec des exigences de sécurité toujours plus strictes. Parmi les procédures critiques garantissant la protection des travailleurs lors des opérations de maintenance, le cadenassage/décadenassage (C/D) demeure une exigence réglementaire incontournable. Ce processus, encadré par des normes telles que la CSA Z460-13, vise à neutraliser les sources d'énergie dangereuses avant toute intervention. Pourtant, malgré son importance, la mise en œuvre du C/D sur le terrain reste sujette à des erreurs humaines, un manque de traçabilité, des retards liés à l'identification des composants à isoler, et une dépendance à des données souvent obsolètes.

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche appliquée menée en collaboration avec deux partenaires industriels. Le premier, Cascades, est un acteur majeur de la production de cartons et de papiers, dont les usines représentent un environnement industriel complexe et exigeant en matière de sécurité. Le second, CONFORMiT, est spécialisé dans la gestion et la digitalisation du procédé de cadenassage en industrie, avec pour mission de rendre ce procédé plus efficaces, plus traçables et mieux adaptées aux réalités du terrain. Cette double collaboration permet d'ancrer le travail de recherche à la fois dans un cadre industriel concret et dans une dynamique de transformation numérique des pratiques de sécurité.

Dans ce contexte, les technologies de localisation en intérieur, et plus particulièrement l'Ultra WideBand (UWB), ouvrent de nouvelles perspectives. Grâce à sa précision, cette technologie permet de suivre avec fiabilité les opérateurs et les équipements, même dans des environnements complexes. Ce mémoire adopte une approche pluridisciplinaire pour traiter cette problématique. Dans un premier temps, une étude expérimentale menée dans un environnement multi-étages met en évidence les contraintes matérielles ainsi que les phénomènes d'atténuation affectant les mesures UWB. Dans un second temps, une analyse approfondie de l'influence des obstacles

industriels et des matériaux sur les performances de localisation est réalisée, afin de mieux cerner les conditions nécessaires à la fiabilité de cette technologie. Enfin, l'ensemble de ces résultats est intégré dans une application mobile d'assistance au procédé de C/D, combinant algorithmes de positionnement, guidage des opérateurs, collecte de preuves visuelles et traçabilité géolocalisée.

En combinant simulations, expérimentations réelles, développement logiciel et analyse des besoins industriels exprimés par Cascades et CONFORMiT, ce travail démontre que l'intégration raisonnée de la localisation UWB constitue un levier efficace pour sécuriser, automatiser et moderniser le procédé de C/D dans l'optique de l'industrie 5.0.

Afin d'aborder cette problématique de manière exhaustive, ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Le Chapitre 1 propose une revue de littérature critique portant sur les enjeux de maintenance industrielle, le procédé de C/D, et les technologies de localisation en intérieur, en mettant en évidence les limites actuelles et les opportunités offertes par l'UWB. Le Chapitre 2 présente une évaluation expérimentale de la précision de la technologie UWB dans un environnement industriel réel et complexe, en identifiant les facteurs influençant la performance. Le Chapitre 3 explore l'optimisation du positionnement des ancres UWB en présence d'obstacles, en intégrant les propriétés des matériaux et des zones critiques, à l'aide d'un algorithme dédié. Le Chapitre 4 se concentre sur l'application concrète de ces travaux au contexte du C/D, via le développement d'une application mobile et l'analyse des conditions nécessaires à sa mise en œuvre efficace. Enfin, la conclusion présente une synthèse des contributions et des recommandations pour les déploiements industriels futurs ainsi que pour les recherches à venir.

CHAPITRE 1

REVUE CRITIQUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

La mise en sécurité des machines et des équipements lors des interventions de maintenance constitue un enjeu majeur pour l'industrie. Le procédé de C/D, largement utilisé à cette fin, offre un cadre rigoureux visant à protéger les opérateurs. Toutefois, son application présente encore certaines limites, notamment en termes de suivi des opérations, de traçabilité et d'efficacité organisationnelle.

Dans ce contexte, la localisation en intérieur apparaît comme une piste prometteuse pour renforcer le contrôle et l'assistance aux opérateurs. Plusieurs technologies ont été explorées au cours des dernières décennies, qu'il s'agisse de solutions basées sur le Wi-Fi, le Bluetooth, les capteurs inertiels ou encore l'UWB. Chacune présente des atouts mais également des contraintes, en particulier face aux environnements industriels complexes.

Cette revue de littérature propose d'abord une mise en contexte du procédé de C/D et de ses limites, avant d'examiner les principales approches de localisation intérieure disponibles. Elle s'achève par l'analyse critique des obstacles techniques et scientifiques qui persistent, et qui justifient le développement de nouvelles approches, notamment celles explorées dans le cadre de ce mémoire.

1.2 Contextualisation

1.2.1 La production industrielle et ses enjeux

Dans le secteur industriel, l'amélioration de l'efficacité et l'optimisation de la production constituent des enjeux majeurs. Afin de maintenir leur compétitivité et leur rentabilité, les entreprises manufacturières définissent des objectifs stratégiques qui évoluent en fonction des impératifs économiques et technologiques. Aujourd'hui, de nombreuses technologies permettent

de collecter des données, d'assister les opérateurs et d'optimiser le fonctionnement des usines (Zhou, Liu & Zhou, 2015). L'un des principaux objectifs dans cette quête de performance est la maximisation du temps d'utilisation des équipements industriels, ce qui implique la réduction des périodes d'arrêt. Pour y parvenir, il est essentiel de limiter autant que possible les interruptions imprévues, qu'elles résultent d'une panne mécanique ou d'un incident opérationnel (Lu, 2017). En effet, ces arrêts non planifiés engendrent des retards, des pertes financières et une diminution de la satisfaction des clients (Mobley, 2002). Ce défi, particulièrement d'actualité, fait l'objet de nombreuses recherches exploitant des technologies avancées, notamment l'intelligence artificielle, afin d'optimiser la gestion des arrêts machines (Alam, Islam & Shil, 2023). Par ailleurs, l'amélioration des stratégies de maintenance constitue un levier essentiel pour réduire ces interruptions et garantir une disponibilité accrue des équipements (Li, Peng, Li & Jiang, 2020).

1.2.2 Les maintenances

Le bon fonctionnement des équipements industriels repose sur des interventions de maintenance régulières. Ces opérations, effectuées dans divers contextes, visent soit à préserver l'état optimal des machines, soit à restaurer celles en panne ou défectueuses. L'objectif principal est d'assurer le maintien des performances des équipements tout en minimisant l'impact sur la production (Viaposte, 2023). Élément clé de la productivité industrielle, la maintenance fait l'objet de stratégies adaptées aux spécificités de chaque entreprise. Celles-ci dépendent de l'organisation interne, des exigences en matière de qualité et des technologies disponibles sur les sites de production (ministère de l'Éducation, 1999). Ainsi, chaque usine adopte des pratiques spécifiques en fonction de ses besoins et de ses contraintes. Un système de maintenance fiable est essentiel pour garantir la continuité des opérations en limitant les interruptions liées aux pannes ou aux dysfonctionnements. Ce système repose principalement sur trois approches complémentaires : la maintenance corrective, préventive et prédictive, qui seront détaillées dans les sections suivantes.

1.2.3 La Maintenance Corrective

La défaillance d'une machine industrielle peut entraîner l'arrêt partiel ou total d'une chaîne de production, engendrant des pertes économiques significatives. La maintenance corrective constitue une composante essentielle de la stratégie de maintenance globale d'une entreprise. Son objectif est de rétablir le bon fonctionnement d'un équipement en remédiant à une panne ou à un dysfonctionnement. En raison de son caractère imprévu, la maintenance corrective engendre des coûts particulièrement élevés. D'une part, elle implique des interruptions prolongées de la production, générant des retards et une baisse de productivité. D'autre part, elle nécessite une mobilisation rapide des ressources techniques et humaines, ce qui augmente les coûts de main-d'œuvre et de logistique. Afin de limiter l'impact financier et opérationnel de ces interventions, certaines entreprises adoptent des stratégies visant à améliorer la réactivité des équipes de maintenance. L'optimisation de la gestion des stocks de pièces de rechange, l'automatisation du diagnostic des pannes et l'intégration de technologies prédictives permettent, dans certains cas, de réduire le temps d'indisponibilité des équipements. Toutefois, la maintenance corrective demeure un processus réactif, dont la fréquence et la gravité peuvent être atténuées par des stratégies de maintenance préventive ou prédictive.

1.2.4 La Maintenance Préventive

La maintenance préventive intervient avant qu'une panne ne survienne. Comme son nom l'indique, elle vise à prévenir les dysfonctionnements en assurant un entretien régulier des équipements et en corrigeant les anomalies mineures avant qu'elles ne deviennent critiques. Contrairement à la maintenance corrective, elle est planifiée à l'avance, ce qui permet d'anticiper les besoins en pièces de rechange et en personnel qualifié.

Cette stratégie repose sur la courbe en baignoire (bathtub curve), qui est introduite dans la figure 1.1, un modèle théorique décrivant l'évolution du taux de défaillance des machines au cours de leur cycle de vie. Dans les premières phases, des défaillances peuvent survenir en raison de défauts de fabrication ou de problèmes liés au transport et à l'installation, entraînant une

diminution progressive du taux de pannes. Par la suite, ce taux se stabilise durant la période d'exploitation normale de l'équipement. En fin de vie, il augmente brusquement en raison de l'usure et du vieillissement des composants, rendant les pannes plus fréquentes et plus graves (Kumar Bora, 2022)(Wikipedia, 2023). La planification des maintenances préventives est généralement fondée sur ce cycle, bien que son application ne soit pas optimale pour tous les équipements. En effet, certaines machines pourraient fonctionner plus longtemps sans intervention, ce qui conduit à des interruptions inutiles.

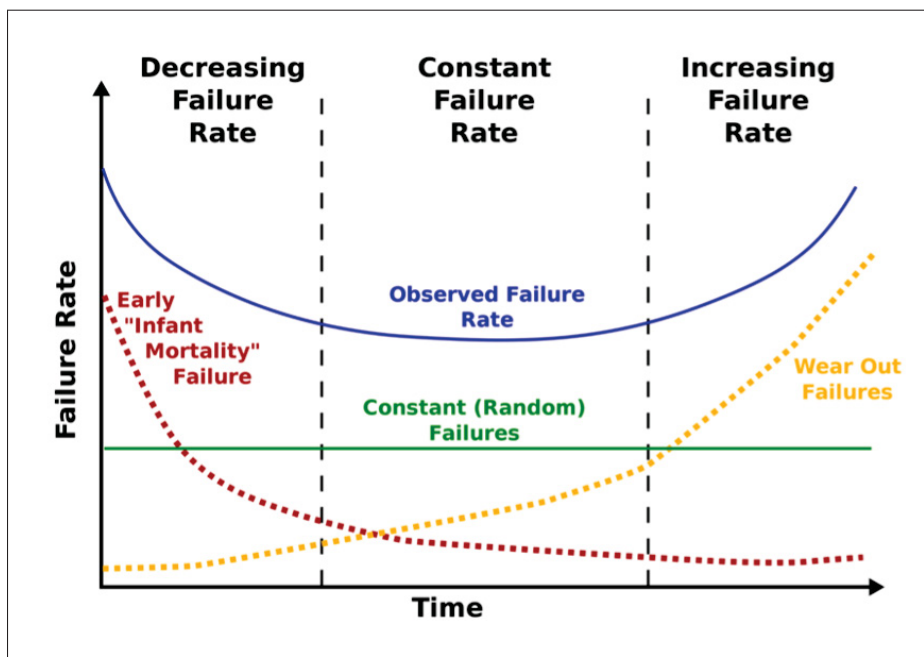


Figure 1.1 Courbe en baignoire
tirée de (Wikipedia, 2023)

Si la maintenance préventive permet de limiter les pannes et de réduire les coûts liés aux arrêts imprévus, elle présente néanmoins des inconvénients. Une planification trop systématique peut entraîner un phénomène de « surmaintenance », où les interventions sont excessives par rapport aux besoins réels. De plus, chaque intervention humaine accroît le risque de dommages accidentels sur l'équipement. Face à ces limites, les entreprises s'orientent de plus en plus vers la maintenance prédictive, qui sera abordée dans la section suivante.

1.2.5 La Maintenance Prédictive

La maintenance prédictive repose sur l'acquisition et l'analyse en temps réel des données des machines afin d'anticiper les pannes avant qu'elles ne surviennent. Grâce à des capteurs intelligents mesurant des paramètres tels que la température, l'humidité ou encore le taux de poussière, elle permet d'identifier les signes précoces d'usure et de dysfonctionnement. Contrairement à la maintenance préventive, qui suit un calendrier fixe, la maintenance prédictive adapte les interventions en fonction de l'état réel des équipements, optimisant ainsi leur durée de vie et leur disponibilité.

Cette approche se distingue par son intégration d'algorithmes avancés et de techniques d'apprentissage automatique, permettant une analyse fine des tendances et des comportements des machines. En détectant les anomalies de manière précoce, elle offre aux entreprises la possibilité de programmer les opérations de maintenance de manière proactive, réduisant ainsi les arrêts imprévus et améliorant la continuité de la production. Elle se positionne ainsi comme une solution hybride, surmontant les limites de la maintenance corrective et préventive en minimisant à la fois les coûts liés aux pannes soudaines et ceux engendrés par des interventions superflues.

Avec l'émergence de l'industrie 4.0, la maintenance prédictive s'est imposée comme un levier stratégique pour améliorer la performance des sites industriels (Çınar *et al.*, 2020). En plus d'optimiser la disponibilité des équipements, elle permet aux techniciens d'identifier la nature des problèmes avant même d'intervenir sur site, grâce aux données collectées en continu (Lee, Bagheri & Kao, 2015). Cette anticipation renforce la réactivité des équipes de maintenance et contribue directement à l'amélioration de la rentabilité et de la compétitivité des entreprises en réduisant les coûts et les interruptions de production. La figure 1.2 synthétise le procédé de la maintenance prédictive.

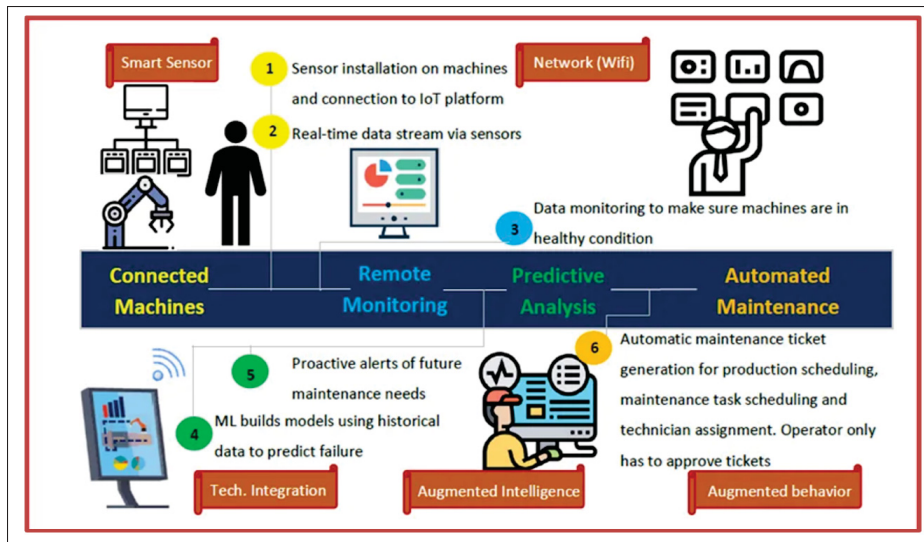


Figure 1.2 Procédé de la maintenance prédictive
tirée de (Çınar *et al.*, 2020)

La définition des différents types de maintenances est inspirée du blog (Amiral Technologies, 2022). De nombreuses nouvelles technologies et nouveaux outils tel que l'intelligence artificielle ou le machine learning sont de plus en plus utilisés dans ce contexte de maintenance prédictive pour analyser les signaux de tous les capteurs des différentes machines (Kumar Bora, 2022).

1.2.6 Les Accidents / Incidents pendant la phase de maintenance

Au-delà de son rôle stratégique dans l'optimisation de la productivité et la rentabilité des usines, la maintenance représente une phase critique en matière de sécurité industrielle. En effet, lors des interventions de maintenance, les machines sont généralement mises à l'arrêt, ce qui entraîne non seulement une interruption temporaire de la production, mais expose également les travailleurs à des risques accrus. La maintenance est l'un des secteurs où les employés sont les plus vulnérables, que ce soit lors de travaux de réparation, de nettoyage, de désassemblage, de test ou de remise en service des équipements (Bulzacchelli, Vernick, Sorock, Webster & Lees, 2008). Les opérateurs se retrouvent fréquemment confrontés à des situations à haut risque, notamment en raison de contacts directs avec des machines potentiellement dangereuses. Ces

incidents peuvent être liés à plusieurs facteurs, tels que l'absence d'équipements de protection adéquats, une formation insuffisante des opérateurs, ou encore une mauvaise planification des interventions de maintenance (Okoh & Haugen, 2014). Le caractère imprévisible de certaines pannes et l'urgence des réparations augmente également le niveau de danger, obligeant parfois les employés à intervenir dans des conditions précaires et sous pression. L'ampleur du phénomène est alarmante. Selon une étude menée par l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA european, 2010) en 2010, 10 à 15 % des accidents mortels dans l'industrie en Europe sont directement liés aux opérations de maintenance, ce qui constitue une part significative des risques professionnels. Un rapport de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) publié en 2008 a également démontré que la maintenance était l'un des secteurs où se produisent les accidents les plus graves (Giraud, Ait-Kadi, Ledoux, Paques & Tanchoux, 2008). De manière similaire, une étude australienne de 2002 portant sur les accidents mortels liés aux équipements fixes confirme la prépondérance des accidents survenant lors des interventions de maintenance, présenté dans la figure 1.3, alors même que ces dernières ne représentent qu'une faible proportion du temps total consacré à l'utilisation de ces équipements (Giraud *et al.*, 2008).

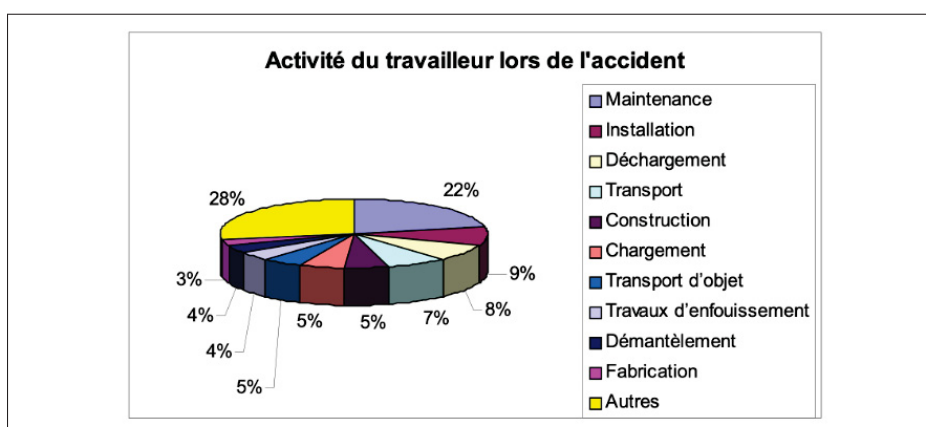


Figure 1.3 Activités des travailleurs blessés mortellement par des machines et des équipements fixes en Australie de 1989 à 1992 tirée de (Giraud *et al.*, 2008)

Les coûts associés à ces accidents sont considérables et peuvent être classés en trois catégories principales : coûts directs, coûts indirects et coûts humains (Dubuc, 2021).

- Les coûts directs incluent les frais médicaux des employés blessés, les coûts des réparations matérielles et des indemnités compensatoires.
- Les coûts indirects englobent les pertes de production, les salaires des employés non productifs en raison de l'interruption des opérations, les coûts de formation pour remplacer les travailleurs accidentés, ainsi que l'impact sur l'image de l'entreprise, qui peut souffrir d'une mauvaise réputation en matière de sécurité.
- Les coûts humains sont les plus graves, car ils affectent directement le bien-être des employés. Ils se traduisent par des séquelles physiques et psychologiques, une détérioration de l'ambiance de travail, une augmentation du stress au sein des équipes, et dans les cas les plus dramatiques, des décès.

Pour faire face à ces enjeux majeurs, les entreprises déploient diverses stratégies visant à réduire les risques associés aux opérations de maintenance et à renforcer la sécurité des travailleurs. Dans cette optique, de nombreuses normes de santé et de sécurité ont été mises en place par les autorités publiques afin d'imposer des protocoles stricts et d'assurer un encadrement réglementaire rigoureux des pratiques industrielles. Au Canada, plusieurs textes législatifs encadrent spécifiquement les interventions de maintenance, notamment le Code canadien du travail et les différentes législations provinciales en matière de prévention des risques professionnels. Ces dispositifs réglementaires imposent des exigences précises, telles que la mise en oeuvre obligatoire de systèmes de C/D pour neutraliser les sources d'énergie dangereuses, ainsi que l'instauration de programmes de formation continue pour les employés appelés à intervenir dans des contextes à risque. Des normes techniques telles que l'ISO 13849-1 :2015 (sécurité des machines), la CSA Z462-18 (sécurité électrique), le règlement DORS/2021-248 (travail en espace clos) et la norme CSA Z460-13 (gestion des énergies dangereuses) viennent compléter ce cadre. Elles précisent les exigences minimales en matière de sécurité, décrivent les procédures opérationnelles à suivre, exigent la tenue d'analyses de risques préalables, définissent les responsabilités des superviseurs, et spécifient les équipements de protection à utiliser.

L'ensemble de ces normes vise non seulement à assurer la protection des travailleurs face aux dangers inhérents aux opérations de maintenance, mais également à encadrer la responsabilité des employeurs en matière de sécurité. C'est dans ce contexte réglementaire et préventif que des procédures spécifiques, telles que le C/D, ont été instaurées. Celles-ci jouent un rôle central dans la sécurisation des interventions en permettant de neutraliser efficacement les énergies dangereuses avant toute opération sur les équipements.

L'application rigoureuse de ces réglementations, combinée à l'adoption de nouvelles technologies et de bonnes pratiques organisationnelles, est un levier essentiel pour limiter les accidents et garantir un environnement de travail plus sûr pour les techniciens de maintenance.

1.3 Le procédé du Cadenassage/ Décadenassage (C/D)

Dans un contexte d'amélioration continue de la santé et de la sécurité au travail, le procédé de C/D a été mis en oeuvre afin de réduire les risques liés aux interventions sur les équipements industriels. Ce procédé, défini par la norme canadienne CSA Z460-13, vise à garantir l'isolation des sources d'énergies dangereuses lors des opérations de maintenance, de réparation, de nettoyage ou d'inspection. Il repose sur l'utilisation de dispositifs de verrouillage (cadenas à clé unique) permettant d'empêcher toute remise en marche involontaire ou intempestive des équipements. Chaque cadenas ne peut être retiré que par la personne l'ayant posé, ce qui confère au procédé une robustesse essentielle en matière de sécurité.

Lorsqu'il est correctement appliqué, le procédé de C/D constitue une solution fiable pour l'isolation des énergies et la prévention des accidents. Cette section propose une description détaillée du déroulement du procédé, une présentation des équipements couramment utilisés, ainsi qu'une analyse de sa compréhension et de son respect par les travailleurs, afin de mettre en lumière les limites du système actuel.

1.3.1 Le déroulé du procédé du C/D

Le procédé de C/D se décompose en plusieurs étapes rigoureusement définies par la norme CSA Z460. Dans un premier temps, une phase préparatoire d'identification et de planification est réalisée. Cette phase consiste à inventorier les sources d'énergies dangereuses, à identifier les dispositifs permettant leur isolation, et à formaliser les procédures spécifiques à chaque équipement. Cette tâche est souvent confiée à des experts externes, qui rédigent les instructions de cadenassage et d'étiquetage, tout en précisant les équipements requis et les personnes autorisées à les utiliser.

Lors de l'intervention, les travailleurs doivent d'abord notifier les personnes présentes dans la zone afin d'éviter tout incident. Ensuite, les équipements sont mis à l'arrêt, puis isolés des sources d'énergie par l'installation de cadenas. Un étiquetage clair est apposé sur les dispositifs de verrouillage pour indiquer qu'une opération de maintenance est en cours. Une étape cruciale de vérification est ensuite réalisée, consistant à tester l'arrêt effectif de l'équipement afin de s'assurer qu'aucune énergie résiduelle ne subsiste. Une fois toutes ces vérifications effectuées, la maintenance peut être réalisée en toute sécurité. À l'issue des travaux, seul le travailleur ayant initialement posé le cadenas est habilité à le retirer, ce qui permet de restaurer le fonctionnement normal de l'équipement. Ces différentes étapes sont résumées dans la figure 1.4.

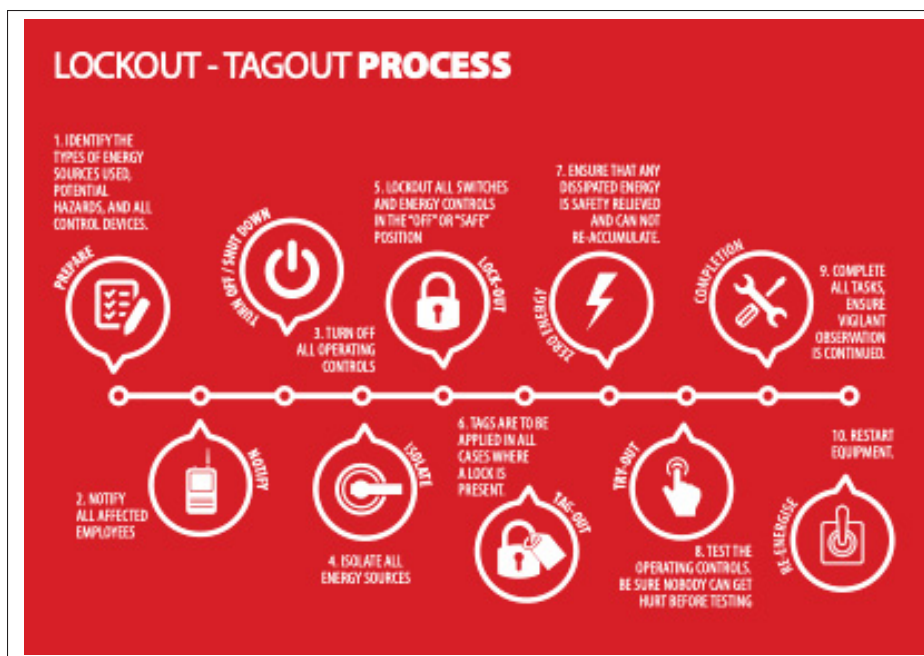


Figure 1.4 étapes du procédé de C/D
tirée de (Spectrum industrial, 2020)

1.3.2 Équipements utilisés dans le C/D

La mise en oeuvre du procédé de C/D repose sur une variété d'équipements spécialement conçus pour verrouiller les différentes sources d'énergies dangereuses. Ces équipements remplissent des fonctions précises (Kumar & Tauseef, 2018). Par exemple, des dispositifs de verrouillage adaptés aux poignées des panneaux électriques permettent de les bloquer en position "arrêt". Des morillons de consignation sont utilisés dans les situations nécessitant l'intervention de plusieurs opérateurs ou la consignation de plusieurs sources d'énergie simultanément.

Les flux concernés incluent non seulement l'électricité, mais aussi les énergies mécaniques et divers gaz (argon, oxygène, azote, GPL, PNG, etc.). Ces dispositifs de consignation sont généralement centralisés dans des stations de cadenassage, qui regroupent les cadenas, les étiquettes de sécurité, ainsi que d'autres outils nécessaires à l'opération. Ces stations ont un double intérêt : elles facilitent l'accès rapide aux équipements requis et elles permettent, par leur

visibilité, de signaler qu'une opération est en cours sur un équipement donné. L'emplacement du cadenas peut également servir d'indicateur visuel sur la machine concernée par la maintenance. La figure 1.5 illustre un exemple de station de cadenassage.



Figure 1.5 Station de cadenassage
tirée de (Kay & Schuster, 2020)

1.3.3 Le respect et la compréhension du procédé du C/D

Le facteur humain constitue un élément central du bon déroulement du procédé de C/D. Une mauvaise application, même ponctuelle, peut engendrer des conséquences importantes, notamment des interruptions non planifiées de la production, une baisse de productivité, et des coûts additionnels liés au stockage de sécurité destiné à pallier les arrêts imprévus (Emami-Mehrgani, Kenné & Nadeau, 2013). Mais plus grave encore, une erreur dans l'exécution

du procédé peut compromettre l'intégrité physique des travailleurs lors des opérations de maintenance.

Ces erreurs peuvent survenir à différentes étapes du procédé et être liées à de nombreux facteurs : oubli ou mauvaise exécution d'une étape (par exemple une vérification insuffisante de l'arrêt effectif de la machine), manque d'entraînement pratique, ou encore sensibilisation insuffisante des opérateurs et des superviseurs (Almutairi, Albeladi & Elrashidi, 2022; Braglia *et al.*, 2021; Bulzacchelli *et al.*, 2008; Dewi, 2018). Ces différentes erreurs sont présentées dans la figure 1.6.

La compréhension fine du procédé par les travailleurs est donc essentielle. Or, plusieurs études montrent que certains employés ne perçoivent pas toujours l'importance du C/D ni les risques liés à un non-respect des procédures (Illankoon, Manathunge, Tretten, Abeysekara & Singh, 2019). Ce manque de compréhension peut être attribué à des lacunes dans la formation, à des informations techniques trop complexes ou mal formulées, ou encore à des procédures perçues comme inadaptées au contexte opérationnel. Ces limites soulignent l'importance d'une intégration plus efficace de la formation, d'une communication claire et d'une adaptation des outils aux réalités du terrain.

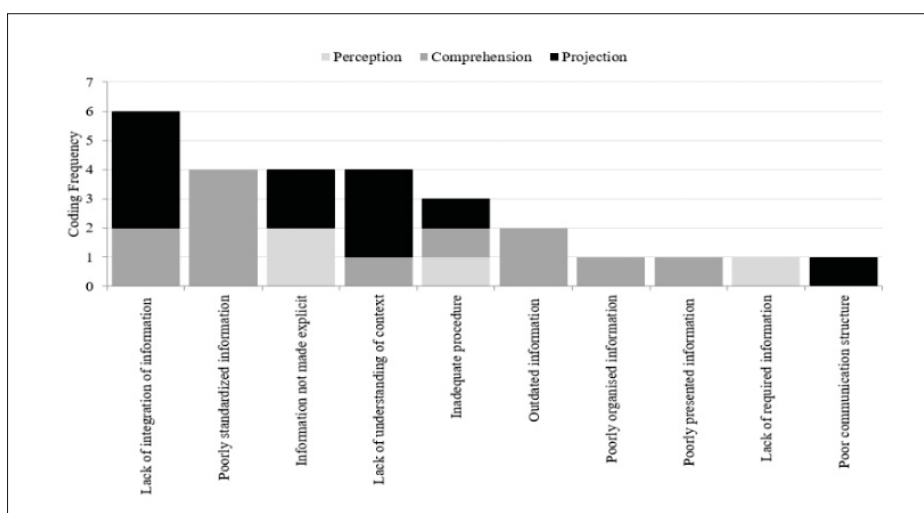


Figure 1.6 Erreurs liées au cadenassage
tirée de (Illankoon *et al.*, 2019)

Malgré son efficacité reconnue, le procédé classique de C/D présente encore plusieurs limites sur le terrain, notamment en matière de planification, de compréhension et d'exécution. Les sections suivantes explorent ces problématiques en détail et présentent différentes pistes d'amélioration, telles que l'intégration du C/D dans la planification des maintenances, l'utilisation de l'intelligence artificielle pour assister la rédaction des fiches, l'optimisation de la fusion des fiches de cadenassage, ainsi que l'émergence des cadenas connectés.

1.3.4 Le C/D au coeur des problématiques des industries 5.0

Historiquement, le procédé de C/D s'est imposé comme une réponse concrète à la nécessité de réduire les accidents en milieu industriel, en structurant les interventions de maintenance dans une logique de sécurité systématique. Cette logique s'inscrit aujourd'hui dans une dynamique plus large portée par les révolutions industrielles successives. La chronologie de ces révolutions est présentée dans la figure 1.7.

L'industrie 4.0, amorcée autour de 2011, a marqué une rupture technologique en mettant la digitalisation, l'automatisation et l'interconnectivité au centre des processus de production. Toutefois, cette révolution a parfois été perçue comme déshumanisante, en éloignant les opérateurs des prises de décision et des systèmes qu'ils utilisent.

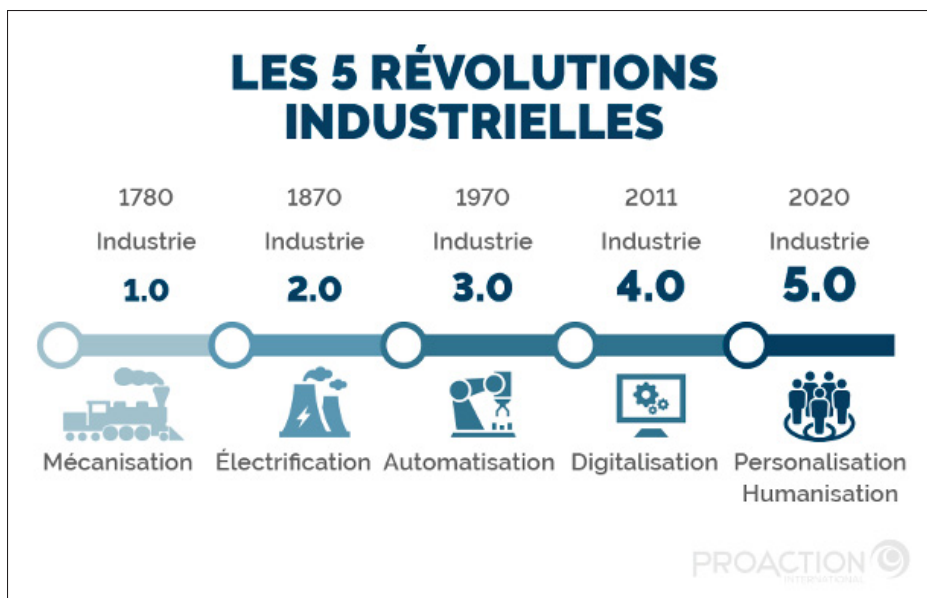


Figure 1.7 Chronologie des révolutions industrielles
tirée de (Raiche, 2022)

En réaction à cette tendance, l'industrie 5.0, apparue vers 2020 (Raiche, 2022), ambitionne de replacer l'humain au coeur de la transformation industrielle (Lu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024). Elle mise sur une collaboration harmonieuse entre les technologies avancées (intelligence artificielle (IA), robotique, IoT) et les opérateurs, afin de valoriser leur créativité, leur capacité d'adaptation et leur rôle dans la prise de décision. L'enjeu est double : améliorer la qualité de vie au travail et renforcer la sécurité des environnements industriels.

Dans ce contexte, le C/D devient un levier symbolique et opérationnel de l'industrie 5.0. Il s'agit non seulement de préserver l'intégrité physique des travailleurs, mais aussi de concevoir des systèmes de sécurité plus intelligents, mieux intégrés aux flux de production, et adaptés aux réalités humaines. L'automatisation et la digitalisation des procédures de C/D s'inscrivent donc pleinement dans les objectifs de cette cinquième révolution industrielle, en conjuguant performance, éthique et sécurité.

1.3.5 L'intégration du C/D dans le planning de maintenance

Dans le cadre des transformations numériques portées par les paradigmes de l'industrie 4.0 et 5.0, la maintenance prédictive tend à devenir le modèle de référence. Toutefois, la maintenance préventive reste largement déployée dans les environnements industriels actuels, notamment pour sa robustesse et sa simplicité de mise en oeuvre.

L'objectif des entreprises demeure inchangé : réduire simultanément les coûts de production et les coûts liés aux stocks, tout en assurant un haut niveau de sécurité pour les opérateurs. La planification optimale de la maintenance préventive fait ainsi l'objet de nombreuses recherches. Des modèles stochastiques, tels que les chaînes de Markov ou les équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman, sont utilisés pour établir des politiques dynamiques de maintenance. Ces approches permettent de déterminer, en fonction de l'âge des machines, les périodes optimales d'intervention tout en tenant compte des besoins en stock. L'intégration du procédé de C/D dans ces modèles influe directement sur ces décisions : lorsque la machine est relativement neuve, la création de stocks en vue d'une future maintenance n'est pas nécessairement rentable. En revanche, à mesure que la machine vieillit, anticiper son indisponibilité en générant des stocks devient une stratégie pertinente (Emami-Mehrgani *et al.*, 2013; Emami-Mehrgani, Nadeau & Kenné, 2011).

Par ailleurs, certaines recherches récentes, notamment celles de (Delpla, Kenné & Hof, 2023), proposent une nouvelle approche dite de maintenance opérationnelle, qui intègre explicitement les contraintes du C/D dans le planning de maintenance. Cette méthode consiste à réaliser le cadénassage durant les phases de ralentissement progressif de la machine (perte d'inertie), et à effectuer le decadenassage pendant la phase de redémarrage. Une telle synchronisation permet de réduire significativement le temps d'arrêt total des équipements. Le chevauchement des opérations est présenté dans la figure 1.8. L'optimisation du temps d'intervention améliore ainsi la disponibilité des machines, augmentant leur rentabilité globale.

Il convient toutefois de souligner que cette approche n'est pas universellement applicable. Elle est particulièrement adaptée aux environnements industriels utilisant des machines à forte inertie, où les phases de mise à l'arrêt et de redémarrage sont longues et coûteuses.

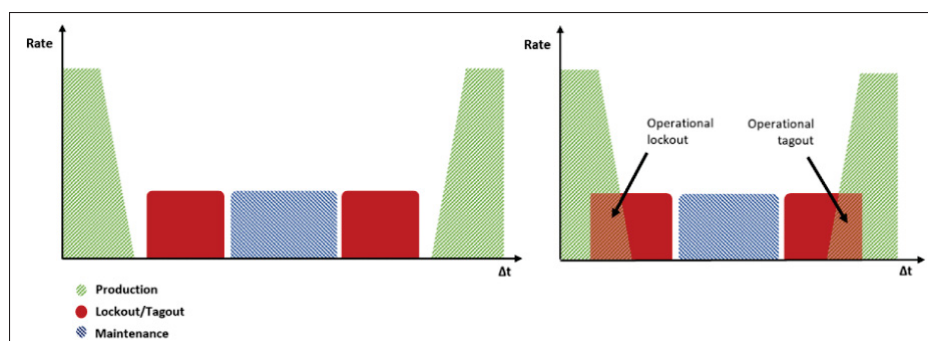


Figure 1.8 Séquence des opérations. Sans le C/D opérationnel,
avec le C/D
tirée de (Delpla *et al.*, 2023)

1.3.6 Les équipements automatisés pour un C/D intelligent

L'émergence des technologies de localisation intérieure et des objets connectés ouvre de nouvelles perspectives pour la sécurisation et l'optimisation du C/D en industrie. En permettant de suivre en temps réel la position des opérateurs et des équipements, ces technologies rendent possible une automatisation plus fine et plus réactive des étapes critiques du C/D, en adéquation avec les exigences de l'industrie 5.0, qui place l'humain et sa sécurité au coeur du système productif.

Dans cette dynamique, plusieurs innovations ont vu le jour pour automatiser partiellement ou totalement les opérations de C/D. L'une des plus prometteuses concerne l'intégration de cadenas connectés, conçus pour être pilotés à distance via un centre de contrôle, permettant une exécution rapide et sécurisée du verrouillage des sources d'énergie. Ces dispositifs, en plus de réduire le temps d'intervention, améliorent la traçabilité des opérations en informant en temps réel de l'état (ouvert/fermé) de chaque cadenas. En France, Enedis a développé un tel système adapté à son réseau électrique haute tension, avec des cadenas géolocalisables intégrant des puces RFID, permettant d'identifier précisément leur localisation et l'équipement sécurisé (La Revue du Digital, 2017). L'étude de (Kumar & Tauseef, 2021) confirme que ces technologies permettent de réduire significativement les incidents liés au C/D, tout en optimisant le temps de cadenassage. Ces avantages, mis en avant par cette étude, sont représentés dans les figures 1.9 et 1.10.

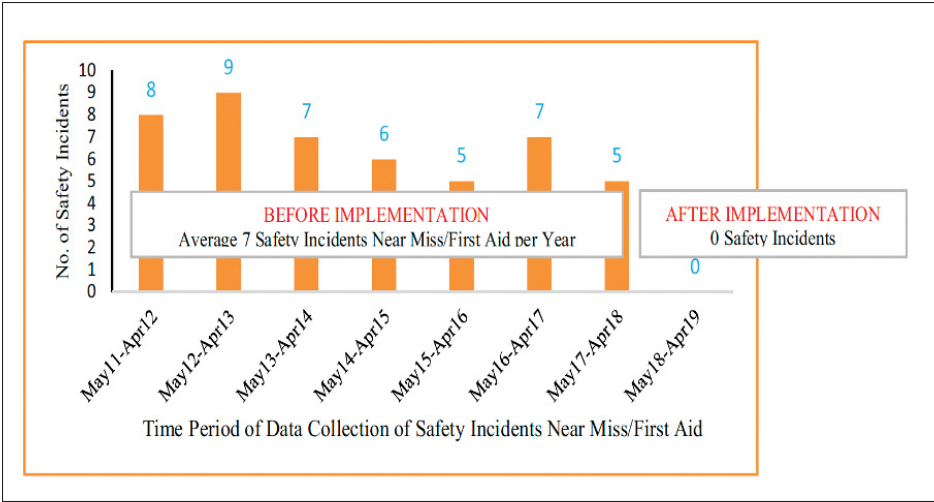


Figure 1.9 Incidents avant et après l’implémentation du cadenas connecté
tirée de (Kumar & Tauseef, 2021)

Table 8. Reduction in LOTO implementation time		
LOTO Implementation Time	Before IoT based LOTO	After IoT based LOTO
	Data Collected from May 2011-April 2018	Data Collected from May 2018-April 2019
Number of Times LOTO Applied	180 Times	23 Times
Total Time Taken in LOTO Implementation (Minutes)	2091 Minutes	134 Minutes
Average Time Taken in LOTO Implementation (Minutes)	11.6 Minutes	5.8 Minutes
Average Time Taken in LOTO Implementation (Seconds)	697 Seconds	349 Seconds

Figure 1.10 Réduction du temps d’implémentation du C/D
tirée de (Kumar & Tauseef, 2018)

Au-delà des dispositifs physiques, l’intelligence artificielle a également été mobilisée pour alléger les lourdeurs administratives du C/D. (Delpla, Chapron, Kenné & Hof, 2022) ont développé un système de génération automatique de fiches de cadenassage assistée par IA, s’appuyant sur des réseaux de neurones entraînés à partir de fiches existantes et des données d’inventaire des machines. Ce système permet de produire rapidement des fiches précises et complètes, indiquant

les points de verrouillage et les équipements concernés, tout en réduisant les coûts et le temps de conception traditionnellement requis.

Dans le prolongement de ce travail, le même auteur a proposé une méthode de fusion automatisée des fiches de cadenassage, prenant en compte à la fois les précédences d'intervention et la disposition spatiale des équipements dans l'usine. Cette approche permet d'organiser de manière optimale l'ordre de cadenassage, en réduisant les déplacements inutiles et en regroupant les opérations similaires. Cette logique a été poussée encore plus loin avec une stratégie innovante de cadenassage par zone géographique, qui s'appuie sur les données de localisation en temps réel pour adapter dynamiquement le plan d'intervention. En réduisant les allers-retours, en évitant le recadenassage de certains équipements, et en permettant une réorganisation instantanée du plan de travail en cas d'anomalie, cette approche optimise le temps de cadenassage tout en renforçant la sécurité.

Enfin, l'intégration d'applications mobiles permet de centraliser les informations critiques sur les procédures de C/D et de guider les techniciens via des QR codes placés sur les machines, des checklists interactives ou des alertes contextuelles. Ces outils, déjà déployés par des entreprises comme CONFORMiT, favorisent l'efficacité des interventions et facilitent l'adoption rapide des nouvelles technologies par les opérateurs, souvent déjà familiers avec les interfaces mobiles.

En somme, l'automatisation du C/D repose aujourd'hui sur un écosystème technologique en plein essor, combinant objets connectés, IA, mobilité et données de localisation. Ces outils permettent non seulement d'accélérer les interventions et de limiter les erreurs humaines, mais également de redéfinir les procédures de sécurité dans une logique proactive, adaptative et centrée sur l'humain.

1.4 Les systèmes de localisation en milieux industriels

1.4.1 La localisation en intérieur

La localisation en intérieure (ou « indoor positioning ») désigne l'ensemble des techniques permettant de déterminer la position d'un objet, d'un équipement ou d'un individu à l'intérieur d'un bâtiment, là où les technologies de positionnement par satellite comme le Global Positioning System (GPS) deviennent inefficaces en raison de l'absence de visibilité directe avec les satellites. Contrairement à la localisation en environnement extérieur, la localisation en intérieure se confronte à des défis spécifiques tels que les réflexions multipath, les obstructions physiques (murs, meubles, structures métalliques), les interférences électromagnétiques, ou encore la complexité de la propagation radio dans des environnements cloisonnés.

Plusieurs approches de localisation sont possibles selon la technologie utilisée et le niveau de précision recherché. Ces approches reposent généralement sur trois grandes familles de méthodes : la mesure de distance (par exemple via le temps de vol ou la perte de puissance du signal), la mesure d'angle, ou encore la reconnaissance de signatures (fingerprinting). La combinaison de plusieurs méthodes dans un système dit hybride est également fréquente afin de compenser les limitations propres à chaque technologie.

La localisation en intérieure est devenue un domaine de recherche en pleine expansion en raison de son importance croissante dans de nombreux secteurs industriels, logistiques, commerciaux ou de santé. L'objectif est généralement d'obtenir une localisation fiable, précise, temps réel et à faible coût, dans des environnements souvent dynamiques et contraints.

1.4.2 Comparaison des méthodes existantes

Bien que le GPS soit la technologie de localisation la plus répandue dans les environnements extérieurs, il est largement inefficace en environnement intérieur. Les signaux GPS, de faible puissance, sont fortement atténués par les matériaux de construction tels que les toits et les murs

des bâtiments, rendant la localisation impossible sans ligne de vue directe vers les satellites (Gu, Lo & Niemegeers, 2009).

Pour pallier cette limitation, de nombreuses technologies alternatives ont été développées spécifiquement pour la localisation en intérieure. Ces technologies reposent principalement sur l'utilisation de radiaux fréquences (RF), d'ultrasons ou encore de signaux optiques (infrarouges ou lumière visible). Si les signaux ultrasonores et optiques offrent théoriquement une précision élevée, ils sont fortement sensibles aux obstacles, ne pouvant traverser ni les murs ni certaines structures industrielles opaques (Hayward *et al.*, 2022; Majeed *et al.*, 2024; Zafari *et al.*, 2019) . Ces limitations réduisent considérablement leur pertinence dans les environnements industriels denses et dynamiques, où les équipements et machines peuvent obstruer fréquemment les lignes de vue.

Dans ce contexte, les technologies RF se distinguent par leur capacité à traverser certains obstacles, leur faible coût, et leur compatibilité avec des infrastructures déjà existantes (par exemple les réseaux Wi-Fi ou Bluetooth). Les plus couramment utilisées sont le Wi-Fi, le Bluetooth Low Energy (BLE), l'identification par radiofréquence (RFID), et plus récemment l'UWB. Une comparaison synthétique de ces technologies est présentée dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 Tableau de comparaison des différentes technologies réalisées à partir des revues (Hayward *et al.*, 2022; Majeed *et al.*, 2024; Zafari *et al.*, 2019) et valeur numérique* tirée de (Qorvo)

Technologie	UWB	BLE	WiFi	RFID	GPS
Précision*	Centimètre (++)	1–5 m (-)	5–15 m (-)	Centimètre (++)	5–20 m (-)
Fiabilité	Faible sensibilité (++)	Haute sensibilité (-)	Haute sensibilité (-)	Faible sensibilité (++)	Très sensible (-)
Portée*	60 m (+)	15 m (-)	100 m (++)	1 m (-)	++
Batterie	+	+	–	++ (passif)	–
Coût	++	++	-	-	-

UWB émerge comme l'une des solutions les plus prometteuses en raison de sa précision centimétrique, rendue possible grâce à la mesure très précise du Time of Flight (ToF) du signal

radio. Contrairement aux technologies Received Signal Strength Indicator (RSSI) comme le BLE ou le Wi-Fi, l'UWB est beaucoup moins sensible aux variations d'environnement et aux réflexions multipath (Qu, 2023). Sa faible sensibilité aux interférences électromagnétiques en fait une solution robuste, adaptée aux environnements industriels complexes. Bluetooth Low Energy (BLE) et Wi-Fi sont souvent privilégiés en raison de leur faible coût et de leur compatibilité avec les infrastructures déjà déployées. Cependant, ces solutions présentent une précision limitée (généralement de l'ordre du mètre) et une forte variabilité liée à l'environnement (Leitch *et al.*, 2023). En particulier, leur fonctionnement basé sur l'intensité du signal reçu (RSSI) les rend sensibles aux obstacles, aux interférences, et aux mouvements dans l'environnement. RFID, bien qu'offrant une précision centimétrique dans certains cas, est limité par sa portée très courte (inférieure à 1 m pour la plupart des systèmes passifs) et son incapacité à localiser plusieurs objets en simultané dans un espace étendu. Il est davantage utilisé pour la détection de présence que pour la localisation dynamique. Enfin, le GPS, bien qu'efficace à l'extérieur, reste inutilisable à l'intérieur sans relais de signal ou systèmes hybrides coûteux (Gu *et al.*, 2009). Certaines tentatives de localisation assistée par GPS en intérieur (AGPS) ont été explorées, mais elles ne répondent pas aux exigences de précision et de réactivité imposées par les applications industrielles. En résumé, parmi l'ensemble des technologies étudiées, l'UWB apparaît comme la solution la plus adaptée pour les besoins de localisation de précision dans les environnements industriels. Elle concilie précision, fiabilité et portée raisonnable, bien que son coût reste plus élevé que les solutions classiques comme le BLE ou le Wi-Fi. Ces éléments expliquent l'intérêt croissant de la littérature scientifique pour cette technologie.

1.4.3 Fonctionnement de l'UWB pour la localisation de précision

L'UWB repose sur une transmission radio à très large bande passante, définie par la Federal Communications Commission (FCC) comme tout signal dont la bande passante est supérieure à 500 MHz ou dont le rapport bande passante/fréquence centrale dépasse 20 % (Federal Communications Commission, 2002). Contrairement aux technologies conventionnelles telles que le Wi-Fi ou le BLE, l'UWB émet des impulsions de très courte durée (de l'ordre du

nanoseconde) sur une large gamme de fréquences, typiquement entre 3,1 et 10,6 GHz. Ce mode d'émission permet une meilleure résolution temporelle, essentielle pour distinguer des signaux directs des signaux réfléchis, et donc pour améliorer la précision de la mesure de distance (Majeed *et al.*, 2024). Ces caractéristiques techniques sont présentées dans les figures 1.11, 1.12 et 1.13.

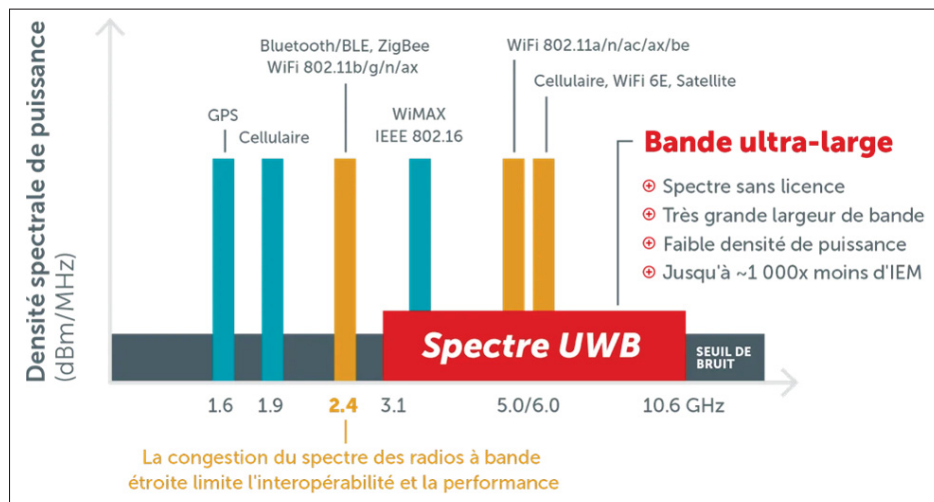


Figure 1.11 Bande passante des radio-fréquences
tirée de (Sparkmicrosystems)



Figure 1.12 Fonctionnement des radiofréquences UWB
tirée de (Sparkmicrosystems)

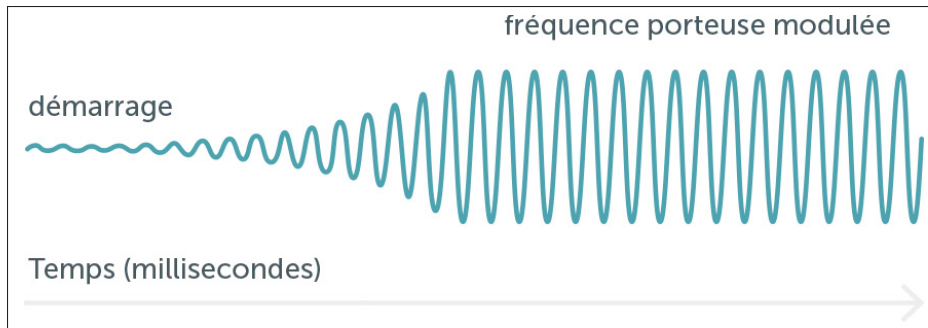


Figure 1.13 Fonctionnement des autres radiofréquences
tirée de (Sparkmicrosystems)

L'émission impulsionnelle de l'UWB permet de mesurer avec une grande précision le ToF d'un signal entre un émetteur et un récepteur. En raison de la très faible durée de ces impulsions, la technologie peut atteindre des précisions de localisation de l'ordre de quelques centimètres, ce qui est largement supérieur aux capacités des technologies conventionnelles à bande étroite. Par ailleurs, la large bande passante améliore la robustesse face au bruit et aux interférences, un avantage crucial dans des environnements industriels denses en équipements électroniques.

Différentes méthodes d'estimation de position peuvent être mises en oeuvre avec l'UWB :

- Time of Flight (ToF) : Cette méthode mesure le temps que met un signal à parcourir la distance entre un tag (ou un objet mobile) et une ancre (récepteur fixe). En supposant une vitesse de propagation constante (celle de la lumière dans l'air), le temps de vol peut être converti directement en distance. Cette technique nécessite une synchronisation stricte entre le tag et les ancres, ce qui constitue un défi technique important, notamment en environnement industriel.
- Time Difference of Arrival (TDoA) : Pour réduire les contraintes de synchronisation imposées par la méthode ToF, la technique TDoA mesure la différence de temps d'arrivée d'un même signal à plusieurs ancres. Seule la synchronisation entre les ancres est nécessaire, tandis que le tag peut émettre librement sans être synchronisé. Les différences de temps mesurées définissent des hyperboles de localisation dont l'intersection permet d'estimer la position

du tag. Cette approche est souvent privilégiée pour la localisation de masse ou dans les environnements industriels, car elle simplifie la gestion temporelle côté utilisateur.

- **Angle of Arrival (AoA) :** L'UWB peut également être combiné à des systèmes à antennes multiples pour estimer l'angle d'arrivée des impulsions. Cette approche permet une localisation par triangulation angulaire, utile notamment pour des systèmes hybrides ou en complément des méthodes basées sur le temps.
- **Multilatération :** Que ce soit via ToF ou TDoA, la multilatération consiste à croiser plusieurs distances estimées entre le tag et des ancrs de position connue pour déterminer la position du tag. L'exactitude de cette méthode dépend fortement de la configuration géométrique des ancrs (Dilution of Precision), ce qui implique des contraintes fortes sur leur positionnement.

1.4.4 Utilisation des technologies de localisation dans les environnements industriels

L'intégration de systèmes de localisation dans les milieux industriels répond à des besoins croissants en matière de traçabilité, de sécurité, d'optimisation des processus, et de supervision en temps réel des opérations. Les environnements industriels présentent cependant des contraintes spécifiques, notamment la présence d'obstacles métalliques, d'interférences électromagnétiques, de structures complexes sur plusieurs niveaux, et des dynamiques d'espace en constante évolution (Hayward *et al.*, 2022).

Dans les secteurs manufacturiers, logistiques et extractifs, la localisation précise des opérateurs, équipements et véhicules autonomes devient un levier d'amélioration de la productivité et de la sécurité. Par exemple, dans les usines automatisées, la supervision des flux de production repose de plus en plus sur la localisation en temps réel des composants et des ressources humaines, permettant une meilleure gestion des tâches, une réactivité accrue face aux incidents, et une réduction des temps d'arrêt (Mekki, Bajic, Chaxel & Meyer, 2019).

Dans ce contexte, plusieurs technologies sont mises en œuvre, souvent de manière complémentaire, en fonction des besoins spécifiques à chaque site :

- Le Wi-Fi est souvent utilisé en raison de son infrastructure déjà en place. Toutefois, sa précision médiocre (souvent >5 mètres) et sa sensibilité aux interférences limitent son usage à des applications de localisation grossière, telles que la détection de zones ou la supervision de zones logistiques.
- Le Bluetooth Low Energy (BLE) est plus économique et plus simple à déployer, notamment pour la traçabilité des actifs mobiles. Son faible coût par balise permet une couverture large avec un investissement modéré. Toutefois, sa précision reste limitée pour les applications critiques de sécurité, comme la localisation d'opérateurs en zones dangereuses.
- L'Ultra Wide Band (UWB) est de plus en plus utilisée dans les environnements industriels exigeant une précision centimétrique. Elle permet le suivi en temps réel des opérateurs, des chariots, ou des robots mobiles dans des espaces complexes. Plusieurs études démontrent l'efficacité de l'UWB dans des milieux comportant des obstacles et du bruit radio, caractéristiques fréquentes dans les usines (Qu, 2023). Elle est notamment utilisée dans des applications de prévention des collisions, d'automatisation des chaînes de montage, ou de géorepérage dynamique (activation d'alertes en fonction de la position de l'opérateur).
- Le RFID, bien que limité en termes de portée, est largement utilisé pour la traçabilité logistique et l'identification d'objets à proximité immédiate (par exemple : présence d'un outil, validation d'un passage à une étape de production, etc.). Il n'est cependant pas adapté à une localisation continue ou à distance.

Des approches multi-technologies sont utilisées afin de pallier les limites de chaque approche et d'atteindre un compromis entre précision, coût et couverture. L'approche multi-technologique est notamment explorée pour garantir une continuité de localisation entre les zones ouvertes et confinées, ou entre plusieurs étages d'un même bâtiment (Mostafa, Harras & Youssef, 2022). Enfin, des défis majeurs subsistent pour un déploiement optimal de ces technologies à grande échelle :

- L'impact des conditions absence de ligne de vue directe (NLOS), fréquent dans les usines,
- Les effets de multitrajets dans les environnements métalliques,

- Les coûts d'installation et de maintenance,
- L'interopérabilité entre systèmes et la protection des données de localisation.

C'est notamment dans ce contexte que les solutions basées sur l'UWB suscitent un intérêt particulier pour la localisation de précision en environnement industriel complexe, et que leur optimisation, tant en termes de déploiement matériel que d'algorithmes de traitement des signaux, fait l'objet de nombreux travaux de recherche actuels.

1.4.5 Limites de l'UWB en environnement industriel et approches de correction des conditions NLOS

La technologie UWB se distingue par sa grande précision, souvent de l'ordre du centimètre, et une robustesse supérieure à d'autres technologies de radiofréquences face aux interférences. Ces propriétés font de l'UWB une technologie de choix pour la localisation en intérieur, notamment en milieu industriel. Cependant, sa performance se dégrade significativement dans certaines conditions, en particulier en présence d'obstacles ou dans des environnements riches en réflexions multiples (multipath).

L'un des principaux défis rencontrés par les systèmes UWB est la condition NLOS, où le signal direct entre l'émetteur et le récepteur est bloqué par un obstacle (ex. : mur, étagère métallique, machine industrielle). Dans ces cas, le système UWB utilise des signaux réfléchis, ce qui entraîne une surestimation des distances mesurées, parfois de plusieurs dizaines de centimètres (Qu, 2023). Ce phénomène est aggravé dans les environnements industriels où la densité d'obstacles métalliques est élevée, générant des multitrajets complexes. Ces signaux indirects peuvent fortement altérer les performances du positionnement, malgré les caractéristiques impulsionnelles de l'UWB conçues pour en atténuer partiellement l'effet (Zafari *et al.*, 2019).

Pour faire face à ces limitations, de nombreux travaux récents s'orientent vers la détection automatique des conditions NLOS et leur correction via des méthodes d'intelligence artificielle. Plusieurs approches basées sur le machine learning supervisé utilisent des caractéristiques extraites du signal UWB (telles que la puissance reçue, le nombre de pics dans la réponse

impulsionnelle du canal, ou le biais de distance) pour classer les signaux en ligne de vue (LOS) ou NLOS (Jiang *et al.*, 2020; Miram, Bahillo, Quintero & Dez, 2023; Musa *et al.*, 2019; Tu, Zhang, Quan & Ding, 2024)). Une fois la condition NLOS détectée, des modèles de régression, de forêts aléatoires ou des réseaux de neurones permettent de corriger les biais de distance mesurée, en tenant compte de la nature des réflexions (Barral, Escudero, García-Naya & Maneiro-Catoira, 2019; Wang, Tang & Chen, 2023; Yu, Wen, Li, Zhang & Zhang, 2018)

Ces modèles nécessitent néanmoins des bases de données d'entraînement spécifiques à l'environnement, ce qui limite leur généricité et leur déploiement rapide sur site. De plus, l'interprétabilité des modèles de deep learning reste limitée dans des contextes industriels critiques.

Une autre approche prometteuse pour améliorer la robustesse de l'UWB en contexte NLOS repose sur la fusion de données multi-capteurs. L'une des combinaisons les plus étudiées est celle de l'UWB avec la pedestrian dead reckoning (PDR), qui repose sur l'analyse des mouvements d'un opérateur à partir des capteurs inertiels (accéléromètre, gyroscope) embarques sur un smartphone ou un badge. Cette technique permet de compenser temporairement la perte ou la dégradation du signal UWB, en extrapolant la trajectoire de l'utilisateur (Kim & Pyun, 2021; Li, Deng, Zhang, Dong & Yu, 2024).

La fusion entre UWB et PDR est généralement effectuée à l'aide de filtres de Kalman étendus, de filtres particuliers, ou de techniques récentes d'apprentissage profond (telles que les réseaux récurrents ou transformers). Cette combinaison permet non seulement d'améliorer la précision dans les zones NLOS, mais aussi d'assurer la continuité du suivi dans des zones mal couvertes (parkings souterrains, escaliers, entrepôts compartimentes).

Malgré ces avancées, l'UWB en environnement industriel reste confrontée à plusieurs défis. Le coût d'installation (lie au nombre d'ancrages nécessaires pour garantir une couverture complète), la calibration initiale, ainsi que l'entretien des dispositifs mobiles (batteries, interférences avec d'autres réseaux RF) constituent des verrous techniques et économiques. Par ailleurs, la standardisation des protocoles et la compatibilité avec les autres technologies industrielles

(Wi-Fi, BLE, RFID) doivent encore progresser pour faciliter l'intégration de l'UWB dans des architectures IIoT (Industrial Internet of Things) complètes.

Ces limites justifient l'intérêt croissant porté à l'optimisation intelligente du placement des ancres UWB, afin de maximiser la couverture et la précision tout en réduisant les zones sensibles aux effets NLOS. Ce problème, combinant contraintes physiques et modélisation probabiliste, constitue aujourd'hui un champ de recherche actif.

1.5 Conclusion

Cette revue de littérature a mis en lumière l'importance stratégique du procédé de C/D dans la sécurisation des opérations de maintenance en milieu industriel. Bien que ce procédé soit largement encadré par les normes et qu'il constitue une réponse efficace aux risques liés à l'énergie dangereuse, il présente encore plusieurs limites, notamment en termes de temps d'exécution, de lourdeurs administratives et de risques d'erreurs humaines.

L'industrie 5.0, centrée sur l'humain, offre un cadre propice à l'amélioration de ces procédés par l'intégration de technologies avancées. Les cadenas connectés, l'intelligence artificielle pour la génération et la fusion de fiches de C/D, ainsi que la localisation intérieure, notamment via l'UWB, apparaissent comme des leviers prometteurs pour améliorer la rapidité, la traçabilité et la sécurité du C/D.

En particulier, la localisation en intérieur s'impose comme un outil transversal pour optimiser la supervision et l'adaptation en temps réel des opérations de consignation. Néanmoins, l'implémentation de ces systèmes dans des environnements industriels complexes, souvent perturbés par des obstacles, des structures métalliques ou des configurations multi-étagées, soulève de nouveaux défis techniques.

Face à ces constats, ce mémoire explorera dans quelle mesure la localisation intérieure, et plus précisément l'UWB, peut être exploitée de manière efficace pour renforcer la sécurité, améliorer l'efficacité et réduire les erreurs liées au C/D. Les prochaines sections s'attacheront à évaluer la

faisabilité de cette approche à travers une modélisation rigoureuse et une expérimentation en environnement industriel réel ou simulé.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Introduction

La revue de littérature a mis en évidence que, malgré leur caractère essentiel, les procédures de C/D restent encore largement perfectibles. Bien qu'encadrées par des normes telles que la CSA Z460-13, elles reposent principalement sur des moyens traditionnels et nécessitent une forte implication humaine. Dans les environnements manufacturiers modernes, cette dépendance entraîne des limites importantes : erreurs dans l'identification des dispositifs à sécuriser, retards liés à la complexité des installations, difficulté de supervision en temps réel et absence de traçabilité exhaustive.

Parallèlement, les technologies de localisation en intérieur, et en particulier l'UWB, connaissent un essor notable et démontrent un fort potentiel pour la supervision des opérations industrielles. Cependant, leur intégration dans un procédé aussi critique que le C/D soulève plusieurs interrogations : leur robustesse dans un environnement industriel contraignant, leur précision effective en présence d'obstacles ou de structures métalliques, et leur réelle valeur ajoutée fonctionnelle au regard des besoins opérationnels.

Ce mémoire s'inscrit dans cette réflexion en partenariat avec deux acteurs industriels majeurs au Québec.

2.2 Présentation des partenaires industriels

Ce projet de recherche a été réalisé en collaboration avec deux partenaires industriels dont les expertises complémentaires, permettent d'ancrer ce projet dans des enjeux à la fois technologiques et applicatifs, offrent une double perspective : celle d'un utilisateur industriel confronté aux contraintes du terrain et celle d'un fournisseur de solutions spécialisées dans la gestion du cadenassage.

La société CONFORMiT constitue le premier partenaire du projet. Entreprise québécoise établie à Saguenay, la société CONFORMiT est spécialisée dans la gestion et la digitalisation des procédures de santé et sécurité en milieu industriel. L'entreprise propose des solutions logicielles permettant de centraliser, automatiser et standardiser les pratiques liées au cadenassage, à la gestion des espaces clos ou encore à l'analyse des risques. Elle accompagne ainsi ses clients dans la mise en place de programmes de sécurité conformes aux normes canadiennes et nord-américaines (CSA, ANSI, OSHA). Dans le cadre de ce mémoire, la société CONFORMiT a fourni une expertise clé sur les pratiques actuelles du C/D, les difficultés rencontrées par les entreprises lors de l'implantation et de la mise à jour des procédures, ainsi que les enjeux liés à leur digitalisation.

La société Cascades, un acteur majeur de la production de carton et de papiers, fondé au Québec et présent en Amérique du Nord. L'entreprise exploite de nombreuses usines de production, dont plusieurs situées à Kingsey Falls, regroupant différentes unités spécialisées dans l'emballage et les papiers tissus. Ces installations industrielles, composées de lignes de production complexes, exigent un programme de maintenance rigoureux pour prévenir les arrêts non planifiés et assurer la continuité des opérations. Or, les opérations de maintenance entraînent chaque année des pertes économiques significatives, liées aux arrêts de production et à la mobilisation de main-d'œuvre. Dans ce contexte, l'optimisation du cadenassage apparaît comme un levier stratégique pour réduire les temps d'arrêt, accroître la sécurité des travailleurs et améliorer l'efficacité opérationnelle.

Les expertises complémentaires de la société CONFORMiT en tant qu'expert du C/D et de la société Cascades en tant qu'utilisateur industriel, ont permis de définir une problématique de recherche à la fois réaliste et pertinente. Elle assure également que les solutions envisagées, notamment l'intégration de la localisation UWB, puissent être testées et évaluées en tenant compte des contraintes réelles du terrain industriel.

2.3 Problématique

L'analyse de la littérature ainsi que les échanges menés avec les partenaires industriels ont mis en évidence les nombreuses limites du procédé de C/D tel qu'il est actuellement pratiqué dans les usines manufacturières. Bien qu'il s'agisse d'une procédure réglementée et essentielle à la sécurité, son exécution demeure complexe et imparfaite dans les environnements industriels modernes.

Dans la société Cascades, par exemple, les usines de production regroupent des centaines de dispositifs énergétiques répartis dans des environnements multi-étagés, composés de structures métalliques denses, de convoyeurs, de tuyauteries et de machines de grande dimension. Dans un tel contexte, identifier rapidement les dispositifs à verrouiller constitue un défi majeur. Les travailleurs doivent parfois parcourir de longues distances, chercher des équipements difficiles à repérer dans un environnement encombré ou accéder à des dispositifs situés en hauteur. Cette complexité engendre non seulement des pertes de temps considérables, mais aussi des risques accrus d'erreurs humaines, tels que l'omission d'un point de consignation ou la confusion entre deux dispositifs similaires.

En ce qui concerne la société CONFORMiT, les difficultés se manifestent davantage dans la préparation et la gestion des procédures. Aujourd'hui, la rédaction des fiches de C/D reste largement manuelle et dépend fortement de l'expertise des superviseurs. La mise à jour régulière de ces documents est souvent chronophage et sujette à des erreurs, notamment lorsque les équipements évoluent ou que de nouveaux dispositifs sont ajoutés. De plus, l'exécution simultanée de plusieurs procédures par différentes équipes n'est généralement pas coordonnée, ce qui entraîne des déplacements inefficaces, un allongement des temps d'arrêt et un manque de visibilité globale sur l'avancement des opérations.

À ces difficultés organisationnelles s'ajoutent des limites en matière de traçabilité. Dans la majorité des cas, les preuves de l'exécution du C/D sont limitées à des formulaires papier ou à des signatures électroniques, ce qui rend difficile la vérification en temps réel de l'application

correcte des procédures. En cas d'audit ou d'incident, il est complexe de retracer avec précision les actions effectuées par chaque opérateur et leur localisation au moment de l'exécution.

Dans ce contexte, les technologies de localisation en intérieur apparaissent comme une opportunité pour transformer le procédé de C/D. L'UWB, en particulier, se distingue par sa capacité à fournir une localisation avec une erreur de l'ordre d'une dizaine de centimètre, y compris dans des environnements où les signaux sont perturbés par les obstacles et les structures métalliques. L'intégration de l'UWB dans le processus de C/D pourrait répondre à plusieurs besoins : guider l'opérateur vers les bons dispositifs, valider automatiquement que chaque point de consignation a été atteint, capturer des preuves positionnelles de l'exécution, et améliorer la coordination lorsque plusieurs équipes interviennent simultanément.

Cependant, de nombreuses questions demeurent quant à la faisabilité et à la valeur ajoutée de cette approche. D'une part, la robustesse de l'UWB dans des environnements complexes comme ceux de la société Cascades doit être vérifiée, notamment en présence de NLOS et d'obstacles physiques. D'autre part, l'impact réel de cette technologie sur l'efficacité et la sécurité du C/D doit être mesuré : la précision obtenue est-elle suffisante pour répondre aux exigences réglementaires ?

Dans ce mémoire nous avons cherché à répondre à la question de recherche :

Dans quelle mesure la localisation intérieure par UWB peut-elle améliorer l'efficacité, la traçabilité et la sécurité du procédé de C/D en environnement industriel complexe ?

2.4 Objectifs de recherche

À la lumière des constats formulés dans la problématique, ce mémoire a pour objectif principal de démontrer que l'intégration raisonnée de la localisation en intérieur par UWB peut constituer un levier efficace pour renforcer la sécurité, la traçabilité et l'efficacité du procédé de C/D en environnement industriel complexe. Les améliorations envisagées par l'ajout de la localisation

intérieur sont présentées dans la Figure 2.1, qui compare l'état actuel du C/D et l'état futur du C/D.

Pour répondre à cet objectif général, plusieurs sous-objectifs spécifiques ont été définis :

Sous-objectif 1 – Viabilité technique de l'UWB en milieu industriel.

Évaluer la faisabilité et la robustesse de la technologie UWB dans un environnement manufacturier réel et complexe, caractérisé par la présence de structures métalliques, d'obstacles et de zones multi-étagées. Il s'agira d'analyser les performances de localisation obtenues, de mesurer les impacts liés aux phénomènes de propagation (atténuation, multipath, NLOS), et de déterminer les conditions minimales pour garantir un déploiement opérationnel.

Sous-objectif 2 – Optimisation du positionnement des ancres.

Proposer et tester des algorithmes d'optimisation pour le placement des ancres UWB, en intégrant explicitement les contraintes liées aux obstacles, aux propriétés des matériaux et aux zones critiques de l'usine. L'objectif est de réduire l'erreur moyenne de localisation tout en minimisant le nombre d'ancres nécessaires, afin de concilier précision et efficacité de déploiement.

Sous-objectif 3 – Évaluation de la précision et de la robustesse en lien avec le C/D.

Déterminer dans quelle mesure la précision obtenue avec l'UWB est suffisante pour répondre aux besoins spécifiques du procédé de C/D. Il s'agira d'évaluer la capacité du système à localiser les opérateurs et à associer de manière fiable leur position aux dispositifs énergétiques consignés, dans le respect des normes de sécurité et des exigences réglementaires.

Sous-objectif 4 – Développement d'une application fonctionnelle pour le C/D.

Mettre en œuvre une application mobile intégrant la localisation UWB pour assister les opérateurs tout au long de la procédure de C/D. Cette application doit permettre :

- le guidage vers les dispositifs à verrouiller

- la capture de preuves visuelles et géolocalisées de l'exécution
- la mise à jour dynamique de la documentation et de la base de données
- la supervision en temps réel des opérations par les responsables

En articulant ces sous-objectifs, le mémoire propose ainsi une démarche complète, allant de la validation technologique de l'UWB à son intégration concrète dans une solution logicielle appliquée au contexte du cadénassage.

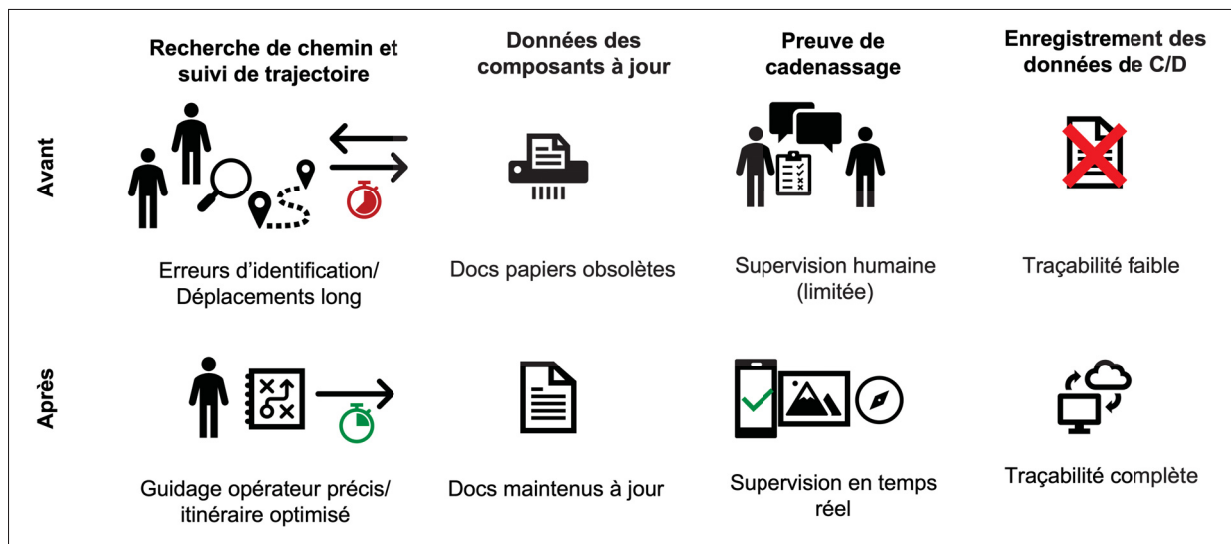


Figure 2.1 Améliorations de la procédure de C/D proposées

2.5 Méthodologie

Afin de répondre aux objectifs définis précédemment, la méthodologie adoptée dans ce mémoire s'articule autour de trois axes principaux, allant de la validation expérimentale de la technologie UWB jusqu'à son intégration dans une application mobile d'assistance au C/D.

2.5.1 Étude expérimentale de la technologie UWB

La première étape consiste à évaluer la viabilité technique de la localisation UWB dans un environnement industriel réel et complexe. Des expérimentations ont été réalisées dans un

bâtiment multi-étagé, représentatif des contraintes rencontrées en milieu manufacturier. Cette phase a pour but :

- d'identifier les principaux facteurs influençant la précision de la localisation (obstacles, structures métalliques, étages)
- de mesurer l'erreur de positionnement moyenne dans différents scénarios (avec et sans obstacles)
- de caractériser les limites de la technologie en conditions dégradées (multipath, NLOS)

Les résultats de cette étape permettent d'établir un premier niveau de faisabilité et de fournir des données expérimentales pour les phases d'optimisation.

2.5.2 Optimisation du positionnement des ancrs

La deuxième étape de la méthodologie concerne l'optimisation du déploiement des ancrs UWB. Cette phase vise à déterminer la configuration optimale des ancrs en tenant compte des contraintes environnementales et des exigences opérationnelles du procédé de C/D.

L'approche adoptée repose sur le développement d'algorithmes capables de :

- modéliser l'atténuation et la déviation du signal en fonction des matériaux rencontrés (parois métalliques, cloisons, équipements industriels, etc.), à partir de leur indice de réfraction et de leur coefficient d'absorption ;
- intégrer ces propriétés dans le calcul de visibilité et de distance entre ancrs et balises afin de pénaliser les liaisons NLOS lors de l'évaluation des solutions candidates ;
- prendre en compte des contraintes liées aux zones critiques de l'usine, notamment les aires de consignment prioritaires où la précision de localisation doit être maximale ;
- rechercher la configuration d'ancrs offrant le meilleur compromis entre précision globale (via des indicateurs tels que le GDOP ou l'erreur moyenne de positionnement) et minimisation du nombre d'ancrs déployées.

Pour cela, des méthodes d'optimisation stochastiques, telles que le recuit simulé, ont été mobilisées. Ces approches permettent d'explorer efficacement l'espace de recherche et de comparer différents scénarios d'implantation. L'influence des matériaux sur la propagation du signal est intégrée directement dans la fonction d'évaluation, garantissant que les solutions retenues soient adaptées aux conditions réelles de l'environnement industriel. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à un déploiement de référence (ou naïf) afin de quantifier les gains en précision et en efficacité.

2.5.3 Développement d'une application mobile d'assistance au C/D

La troisième étape consiste à concevoir une application mobile intégrant la localisation UWB afin d'apporter un support opérationnel direct aux travailleurs. L'application a été pensée pour répondre aux besoins identifiés par les partenaires industriels et propose plusieurs fonctionnalités :

- guidage de l'opérateur vers les dispositifs énergétiques à verrouiller
- capture de preuves visuelles et positionnelles pour valider chaque étape
- mise à jour automatique de la documentation de C/D
- supervision en temps réel des opérations par les responsables de maintenance et de sécurité

Le développement logiciel a mobilisé une architecture modulaire permettant d'intégrer facilement les modules de localisation, de gestion des données et d'interface utilisateur.

En combinant ces trois étapes, expérimentation, optimisation et développement logiciel, la méthodologie proposée assure une approche complète, allant de la démonstration de faisabilité technologique jusqu'à l'intégration opérationnelle dans un contexte industriel réel. Les expérimentations ont été menées dans deux environnements complémentaires. D'une part, un espace à l'ÉTS reproduisant des conditions proches de celles rencontrées dans un milieu industriel, permettant de tester et de valider la robustesse des mesures UWB dans un cadre contrôlé. D'autre part, un espace industriel au sein de l'usine Cascades, offrant un terrain d'expérimentation représentatif des contraintes réelles liées aux obstacles, à la configuration des

lieux et aux pratiques opérationnelles. Un schéma synthétisant les contributions scientifiques, les articles de revue et les chapitres associés est présenté dans la figure 2.2.

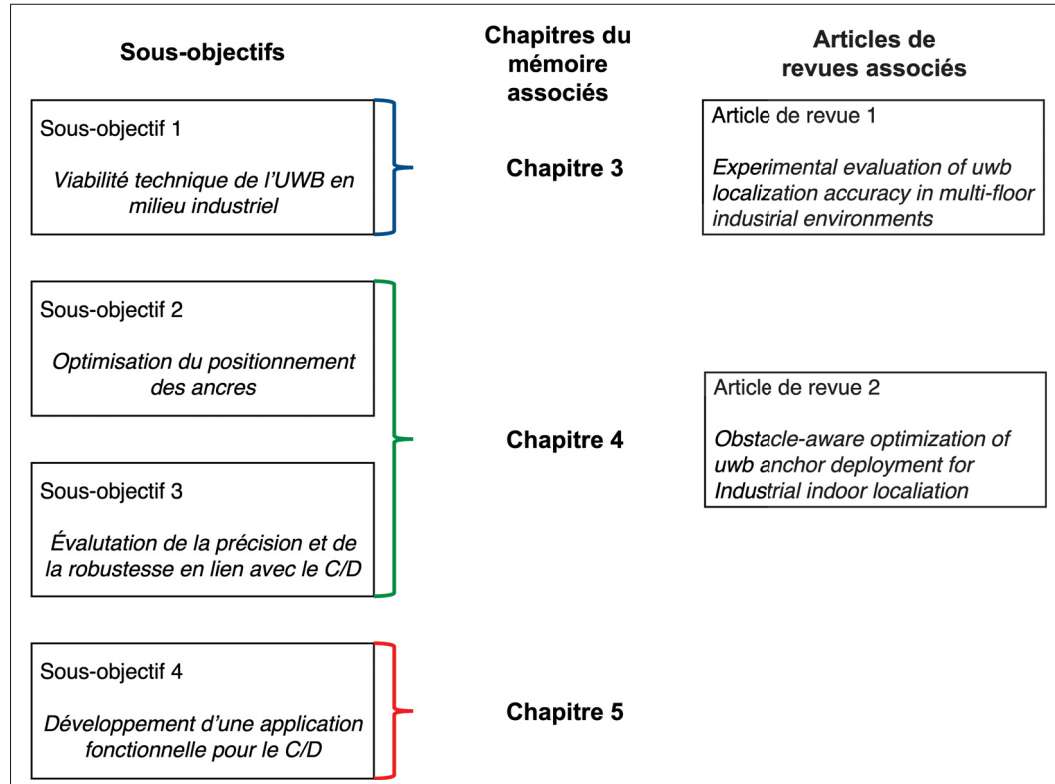


Figure 2.2 Contributions scientifiques, articles de revue et chapitres associés

2.6 Conclusion

En résumé, ce chapitre a permis de définir le cadre dans lequel s'inscrit ce mémoire. Les limites des procédures de C/D actuelles, mises en évidence par la littérature et confirmées par les retours des partenaires industriels Cascades et CONFORMiT, soulignent la nécessité de solutions innovantes pour améliorer leur efficacité, leur traçabilité et leur robustesse. La problématique de recherche a ainsi été formulée autour de l'intégration de la localisation UWB dans le procédé de C/D, en cherchant à évaluer sa faisabilité technique, sa précision réelle en environnement industriel complexe et sa valeur ajoutée fonctionnelle.

Les objectifs poursuivis s'articulent autour de la validation expérimentale de la technologie, de l'optimisation du positionnement des ancrs et du développement d'une application mobile dédiée. La méthodologie proposée repose sur une approche progressive, combinant expérimentation, modélisation, développement logiciel et validation sur le terrain.

Ce cadre fournit ainsi les fondations nécessaires aux chapitres suivants, qui détailleront successivement l'évaluation expérimentale de l'UWB, l'optimisation de son déploiement, et son intégration dans une application concrète d'assistance au C/D.

CHAPITRE 3

EVALUATING UWB LOCALIZATION PERFORMANCE IN MULTI-LEVEL INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

Carlier Florian^a , K  vin Chapron^b , Jean-Pierre Kenn  ^a , Lucas Hof^a

^a Department of Mechanical Engineering,   cole de technologie sup  rieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montr  al, QC H3C 1K3, Canada

^b CONFORMiT, bureau 200, 125 Rue Dub  , Saguenay, QC G7H 2V3, Canada

Article soumis pour publication, septembre 2025

3.1 Abstract

In industrial environments, precise operator localization is a critical challenge to enhance safety, particularly in confined spaces or hazardous zones requiring rapid interventions. Although the Global Positioning System is widely used for localization purposes, it is ineffective in indoor environments due to signal attenuation and multipath propagation. An interesting alternative solution includes the use of radio frequency devices, with ultra-wideband (UWB) technology emerging as one of the most promising methods for precise indoor localization. However, industrial environments raise additional challenges, such as the presence of obstacles that lead to non-line-of-sight (NLOS) conditions and complex spatial configurations. This research study investigates the application of UWB-based localization in multi-floor environments, concentrating on the impact of anchor placement on localization accuracy. Experimental results demonstrate that UWB can achieve precise localization, even in complex configurations involving multiple floors or independent zones. Furthermore, this study highlights the importance of exploring anchor placement optimization while accounting for NLOS effects, highlighting avenues for improving localization accuracy in complex and obstructed industrial environments.

Keywords-component ; Ultra-Wideband ; Indoor Localization ; Multi-floor environment ; Industrial environments ; Performance analysis ; Smart manufacturing

3.2 INTRODUCTION

Indoor localization has become a key research area, particularly in complex industrial environments where the Global Positioning System is unsuitable due to its inability to function effectively in enclosed or covered spaces. This growing interest aligns with the principles of Industry 5.0, which aims to integrate process automation, enhanced safety, and operator well-being (Coelho, Bessa, Landeck & Silva, 2023). From an operational perspective, many modern factories are adopting advanced technologies such as autonomous robots and drones (Duong *et al.*, 2020). These systems rely on precise spatial localization to ensure safe and efficient operation. For instance, drones deployed for surveillance or inspection tasks must navigate accurately among obstacles while following precise trajectories to avoid collisions (Famili, Stavrou, Wang & Park, 2024). Consequently, robust indoor localization is essential not only for ensuring the efficiency and reliability of these systems, but also for safeguarding factory workers. Beyond automation, indoor localization also plays a critical role in improving safety within industrial environments (Hayward *et al.*, 2022). Technologies such as radio frequency (RF) anchors, particularly ultra-wideband (UWB) devices (Boyle & Tolentino, 2022), have demonstrated their ability to meet the growing demands for indoor localization. Indeed, precise localization offers several benefits in industrial settings. It can, for example, guide operators to specific locations while ensuring their safety (REF). Furthermore, dynamic safety zones can be established around equipment to protect operators. These zones also enable the automation of machinery shutdowns in case of zone violations, significantly reducing the risk of serious accidents (Wang, Zeng, Ding, Yu & Rose, 2019). Some systems already combine UWB with intelligent management of hazardous zones, enhancing both safety and operational efficiency (Sellak, Haberchad, Ibenyahia & Salih-Alj, 2023). Meeting industrial safety standards requires localization systems to maintain high accuracy in complex and dynamic indoor environments. For such applications, UWB is recognized as a high-performance localization technology. However, non-line-of-sight (NLOS) conditions, which are common in cluttered industrial environments, remain a major source of error despite UWB signals' ability to penetrate certain materials (Hapsari *et al.*, 2025). Various approaches have been proposed to mitigate these limitations,

including optimizing anchor placement, and developing advanced signal processing techniques (Wang *et al.*, 2023). However, despite the advances of existing approaches, our review of the literature indicates that they have not yet been systematically tested in multi-story industrial environments, and rigorous experimental validation of their robustness under such conditions remains largely absent.

To ensure accurate localization in RF-based systems, particularly those using UWB, numerous studies have focused on optimizing anchor placement to improve localization accuracy in practical environments (Andrews & Ngo, 2024; Wu, Yao & Lu, 2023; Zhang, Jiao, He & Wang, 2024). These efforts aim to achieve three main objectives : minimizing localization errors, improving coverage, and reducing installation costs by decreasing the number of required anchors. Such studies often leverage evolutionary algorithms to determine optimal anchor configurations, ensuring a balance between accuracy and deployment cost (Famili *et al.*, 2024). While some studies have extended their analyses to three-dimensional (3D) environments (Sharma & Badarla, 2019, 2021), they generally remain limited to homogeneous, single-floor spaces without considering the specific challenges posed by multi-story industrial layouts. This represents a critical gap, as vertical segmentation introduces severe obstructions and signal distortion due to materials such as reinforced concrete. Other technologies such as Wi-Fi, Bluetooth, and inertial measurement units (IMUs) have been investigated for indoor localization in complex environments (Mostafa *et al.*, 2022). However, IMUs suffer from cumulative drift, and both Wi-Fi and Bluetooth lack the necessary spatial resolution in obstructed or metallic environments. In contrast, UWB offers centimeter-level accuracy and is more resilient to interference, making it particularly suitable for harsh indoor conditions (Sesyuk, Ioannou & Raspopoulos, 2022). Despite these advantages, the application of UWB to vertically partitioned environments remains insufficiently studied.

A few studies have considered the use of barometers or floor classifiers to aid vertical localization (Yang, Liu, Gong, Chen & Hyppä, 2024), but they are often based on fingerprinting methods that require extensive data collection and suffer from limited adaptability in dynamic environments (Nor Hisham, Ng, Tan & Chieng, 2022). In industrial contexts where equipment layout can change

frequently, such methods are difficult to maintain. Although recent research has investigated the influence of materials on UWB accuracy (Pan, Qi, Liu & Liu, 2021, 2022), none to date have addressed the practical consequences of transitioning across floors, especially through zones such as staircases, where multipath effects and irregular geometries pose unique challenges. The absence of studies explicitly tackling these transitions leaves a gap in the understanding of UWB behavior in vertically segmented environments. Among existing localization methods, multilateration presents distinct advantages over fingerprinting, including higher scalability, reduced dependency on pre-built signal maps, and better adaptability to dynamic settings. However, its application in complex multi-story scenarios with pronounced NLOS conditions has not been empirically validated. In particular, the behavior of UWB multilateration across floors and in transition zones remains undercharacterized, despite its relevance for safety-critical applications in industrial settings.

To address these research gaps, this study presents an experimental evaluation of UWB multilateration in a two-floor industrial-like setting, according to the following objectives :

- **Understanding the impact of floors on UWB measurements :** Floors can significantly affect UWB distance measurements, introducing errors that compromise localization accuracy. Studying this impact helps to better characterize signal propagation in multi-floor environments and anticipate potential biases in positioning systems.
- **Assessing feasibility of multilateration across floors :** This study examines whether UWB localization can be achieved by placing anchors only on a lower floor and investigates if this placement negatively affects accuracy on higher floors.
- **Advancing 3D localization strategies for complex environments :** Addressing the challenges of multi-story localization is crucial for improving operator tracking and automation in industrial settings. The findings offer empirical insights that can inform anchor deployment strategies and help mitigate localization errors in vertically segmented environments.

3.3 MATERIALS AND METHODS

The methodology employed in this study is organized into five distinct stages, each contributing to a comprehensive evaluation of the UWB-based localization system. First, we describe the hardware used in our experiments (2.1), which provides the foundation for the localization setup. Next, we explain the Two-Way Ranging (TWR) technique (2.2) for distance estimation. This is followed by an analysis of the errors induced by materials and obstacles in the environment (2.3). The fourth stage (2.4) introduces the multilateration process, which is employed to calculate the position of the tracked device based on the distance estimates. Finally, the experimental environment is detailed (2.5), offering context to the setup and the conditions under which the system's performance is tested.

3.3.1 Qorvo DWM1001-DEV

For this study, the DWM1001-DEV UWB device, developed by Qorvo, was used to conduct the experiments. This module relies on UWB technology, known for its high accuracy in distance and indoor positioning measurements. For the purposes of this research, the module was configured to perform distance measurements at a frequency of 5 Hz, allowing for precise tracking of moving targets in complex environments. This measurement rate offers a practical compromise between temporal resolution, measurement stability, and energy efficiency.

3.3.2 TWR Estimations

The distance measurements made by the DWM1001-DEV module rely on the TWR method, widely used in UWB systems to estimate the distance between two devices. This technique relies on the exchange of time messages between a transmitter and a receiver. TWR is an indirect method to estimate the Time of Flight (ToF)[sec], which is the time it takes for a signal to travel the distance $d[m]$ between two devices at the speed of light $c[m.sec^{-1}]$. The measured distance is defined in (3.1) :

$$d = c.ToF \quad (3.1)$$

However, directly measuring the ToF requires very precise synchronization between the clocks of the devices, which is difficult to guarantee. TWR circumvents this problem by measuring the total round-trip time ($T_{RTT}[sec]$) and then compensating for the fixed delay introduced by the receiver ($\Delta_T[sec]$). The TOF is extracted from TWR using (3.2) :

$$ToF = \frac{T_{RTT} - \Delta_T}{2} \quad (3.2)$$

The distance d is then calculated with (3.1) and (3.2). This method avoids the need for strict synchronization between the clocks, as the calculation relies solely on locally measured times by the transmitter and receiver.

The distance measurement d_m between two UWB devices is influenced by the propagation of radio waves in the Fresnel zone, a region around the direct line of sight where waves scatter. This scattering, related to the physical properties of the signal, such as frequency, and thus wavelength $\lambda[m]$, induces an error $\epsilon[m]$ in the measurement. Hence, the measured distance is given by (3.3) :

$$d_m = d_r + \epsilon \quad (3.3)$$

Where $d_r[m]$ is the true distance. The higher the frequency, the more sensitive the precision is to these effects.

3.3.3 Errors induced by Materials

In NLOS conditions, the signal passes through a wall and is deflected. The deflection depends on the material's reflection index and may vary according to the dielectric constant of the obstacle.

The round-trip time of emission and reception of the signal is thus modified, and the deviation of the measurement is presented in (3.4) and (3.5) as follows :

$$T_{RTT} = 2.(\frac{d + w.(R - 1)}{c}) \quad (3.4)$$

$$d' = d + w.(R - 1) + c. \frac{-\Delta_T}{2} \quad (3.5)$$

Where $d'[m]$ is the measured distance and d is the actual distance between transmitter and receiver, $w[m]$ is the width of the obstacle and R is the refractive index of the material. The deflection of the UWB signal transmitted between two devices and its impact on distance measurement is illustrated in Figure 3.1. The actual signal path is compared to the deflected path, highlighting the resulting measurement error in the calculated distance.

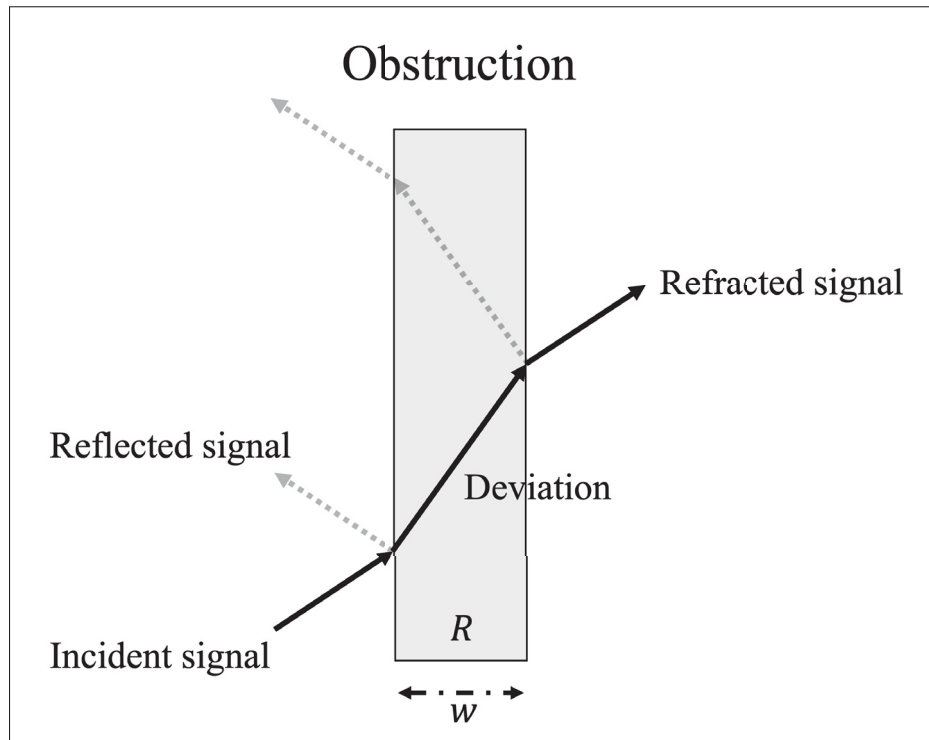


Figure 3.1 Illustration of the impact of UWB signal deflection by a material on the measured distance

3.3.4 Multilateration

Multilateration is a positioning technique that uses distance measurements between a target object and several reference points, known as anchors. This method relies on the principle of triangulation, where the position of the object is determined by the intersection of several spheres centered on the anchors. In 3D, at least four non-coplanar anchors are required to determine a unique position. Each anchor A_i of coordinates (x_i, y_i, z_i) emits a signal that allows measuring the euclidian distance d_i between the anchor and the target object. The equation of the sphere around each anchor A_i is given by (3.6) :

$$d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \quad (3.6)$$

Where (x_i, y_i, z_i) are the coordinates of anchor A_i , and d_i is the distance measured between anchor A_i and the target object.

For four anchors A_1, A_2, A_3 et A_4 , the equations of the sphere are described in (3.7) :

$$\begin{cases} d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \\ d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \\ d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \\ d_4^2 = (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

To determine the position of the target object, the system of equations formed by these four equations is solved. The intersection of the resulting spheres provides the estimated position of the target object, as shown in Figure 3.2.

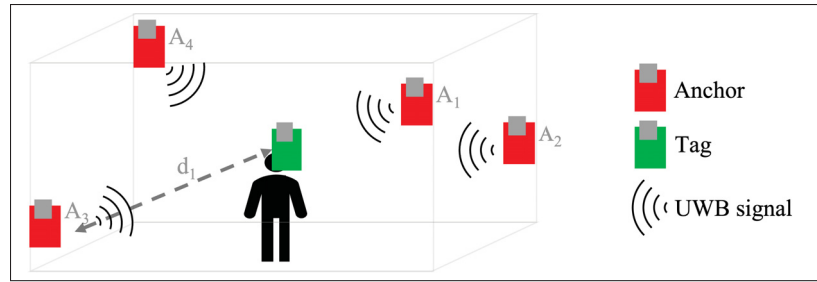


Figure 3.2 Schematic of multilateration with anchors (red) and a tag (green)

3.3.5 Environment

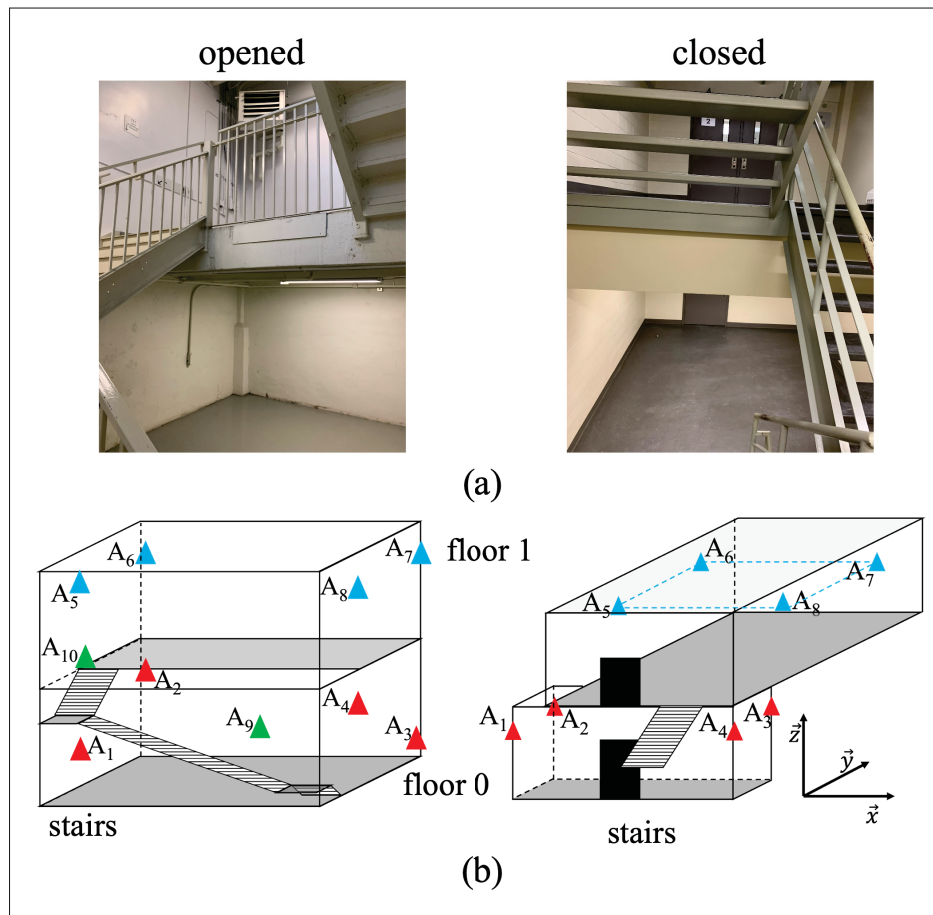


Figure 3.3 Presentation of the study environments. (a) Photographs of both experimental environments : opened, without doors separating the two floors (left) and closed, with doors separating the two floors (right). (b) Schematic representation of UWB anchors arrangement within the environments

Tableau 3.1 Anchor coordinates (X, Y, Z) in meters for both environments

Anchor	X (m)	Y (m)	Z (m)	Anchor	X (m)	Y (m)	Z (m)
A1	0.00	-2.43	2.11	A1	0.00	-2.43	2.33
A2	1.20	0.00	2.08	A2	2.20	-2.43	2.22
A3	4.50	-2.16	2.15	A3	2.30	1.16	2.35
A4	0.00	-2.52	2.10	A4	0.00	1.25	2.43
A5	0.82	0.00	5.00	A5	30.20	0.00	6.00
A6	0.82	0.00	5.00	A6	30.20	4.50	6.00
A7	4.12	0.00	5.10	A7	45.30	4.50	6.00
A8	4.50	-2.53	5.10	A8	45.30	0.00	6.00
A9	3.72	-6.11	2.90				
A10	0.39	-6.10	4.20				

The experiments were conducted in two distinct environments, referred to as "open" when there are no doors separating the spaces, and "closed" when doors divide the areas. Figure 3.3 provides an overview of these environments and the positioning of the UWB anchors. Figure 3.3.a presents photographs of the two experimental environments : the open environment on the left and the closed environment on the right. Figure 3.3.b offers a schematic representation of the spatial arrangement of the UWB anchors within the environments, illustrating their placement across different floors and areas. Finally, Table 3.1 provides a table listing the precise coordinates (x , y , z) of each anchor, offering a detailed mapping of their spatial distribution.

The anchors were installed at heights slightly above the head level of the operator (approximately 2.10 to 2.15 m on the lower floor and around 5.10 m on the upper floor), a placement strategy that mitigates body shadowing effects. In each area, anchors were placed in the corners or opposite sides of the rooms to maximize their mutual separation and ensure geometrical diversity for multilateration. These decisions followed practical, intuitive criteria commonly used in industrial settings, rather than automated optimization algorithms.

3.4 Experimentation

This section presents the experimental results of our study on UWB multilateration in multi-floor environments. The experiments are divided into three main parts : the impact of the floor on UWB

distance measurement, trajectory tracking in a multi-story environment, and the optimization of tracking through the addition of anchors. These experiments aim to evaluate the accuracy, coverage, and robustness of UWB-based localization systems in complex indoor settings. To provide a comprehensive overview of our findings, Figure 3.5 summarizes the key results of our experiment. Figure 3.4 illustrates the effect of a concrete floor on UWB distance measurement by comparing line of sight (LOS) and NLOS conditions using boxplots. Figure 3.5.a shows the actual trajectory of the operator, which serves as the reference for trajectory tracking experiments. Figure 3.5.b presents the results of a multilateration test using four anchors (A_1 to A_4) positioned on floor 0, while Figure 3.5.c demonstrates trajectory tracking in a multi-floor environment using eight anchors. Figure 5.d displays a representative trajectory followed by the operator with eight anchors, and Figure 5.e highlights the improvements in trajectory accuracy when using nine and ten anchors. Finally, Table 3.2 provides a summary table of localization accuracy across different zones in the environment, offering a comprehensive overview of the system's performance.

All configurations were tested through five repeated measurement sessions to ensure robustness. For each configuration, the localization results presented in this paper correspond to representative trials, consistent with the trends observed across repetitions. This approach allows for reliable interpretation while maintaining clarity in data presentation.

3.4.1 Impact of the Floor on UWB Distance Measurement

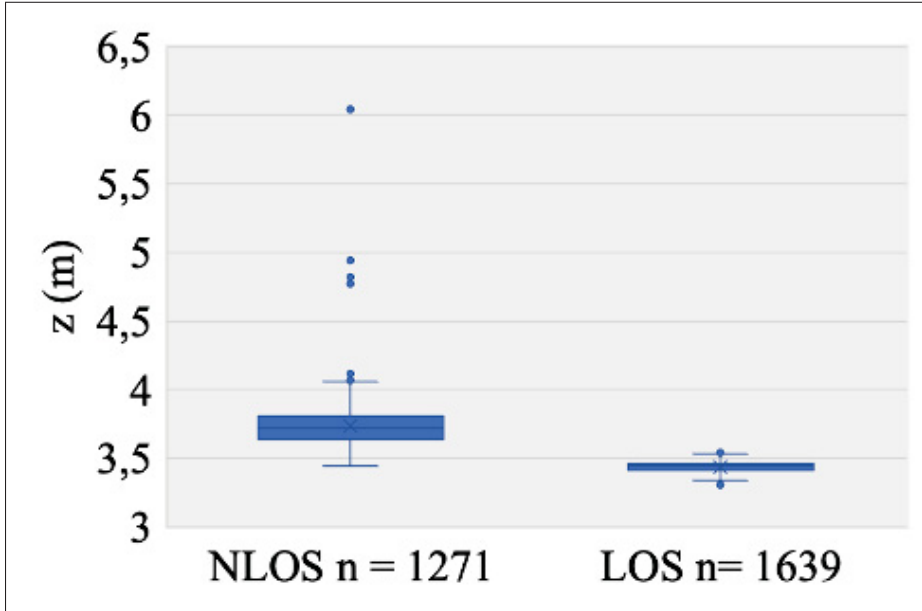


Figure 3.4 Dispersion of UWB distance measurement in the same environment with and without the floor as an obstacle

To evaluate the impact of a floor on the distance measurement between two UWB devices, measurements were taken in the same environment (Figure 3.3.a opened), both with and without the presence of a floor directly obstructing the LOS between the devices. Figure 3.4 illustrates the observed deviations. The results demonstrate that thick concrete floors significantly degrade UWB localization accuracy due to their high dielectric constant, which alters signal propagation. Compared to a LOS condition, the presence of a concrete floor increased the mean localization error from 4 cm to 26 cm and the standard deviation from 3.3 cm to 14.3 cm, representing a fourfold increase in variability. This confirms that non-uniform materials introduce substantial NLOS errors, reducing multilateration reliability.

3.4.2 Trajectory tracking in a multi-story environment

In a multi-story environment (open or closed), we evaluated the feasibility of localization through multilateration. To assess the ability to track an operator, the UWB tag was placed

on the operator's head, in accordance with the recommendations of (Otim, Bahillo, Díez, Lopez-Iturri & Falcone, 2019), which minimize NLOS conditions relative to the anchors. The paths followed in the two environments are shown in Figure 3.5.a.

Initially, the study focused on localizing the operator across two areas, corresponding to levels 0 and 1, as shown in Figure 3.3.b. The operator's position was determined using only four anchors located on level 0, as illustrated in the environment of Figure 3.b. Using only four anchors located on the ground floor proved insufficient for multi-floor localization as depicted in Figure 3.5.b. Due to NLOS conditions introduced by the concrete floor, the distance estimations were too inaccurate to allow for successful multilateration on the upper floor. The errors in distance measurements prevented the formation of well-defined intersection points required for precise positioning, leading to unreliable or missing location data on the upper floor.

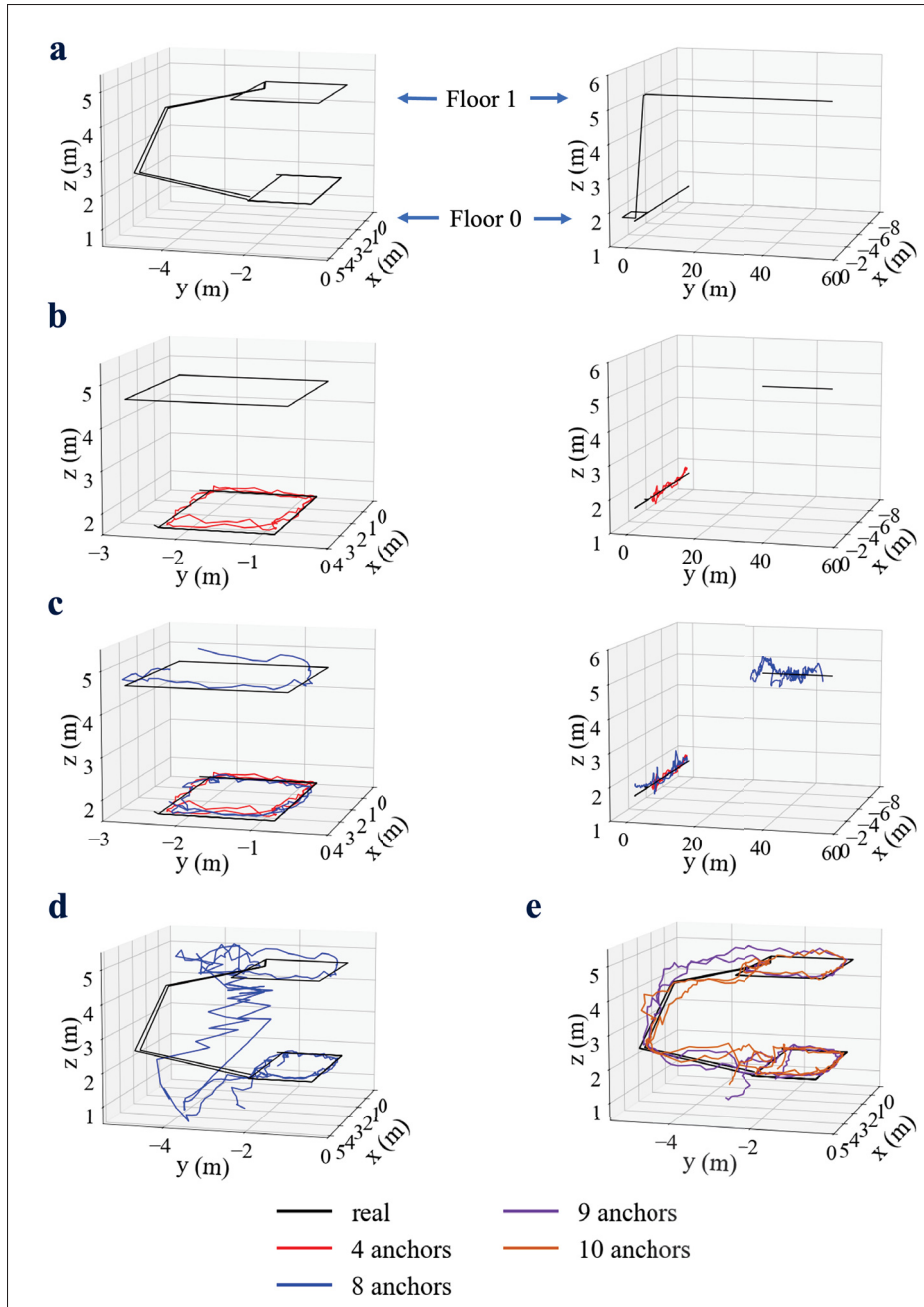


Figure 3.5 Experimental results on the accuracy and coverage of UWB multilateration in a multi-floor environment. (a) Actual trajectory of the operator recorded as the reference in opened (left) and closed (right) environments. Multilateration test using 4 anchors (A1 to A4) positionned on floor 0 (b), using 8 anchors (A1 to A8) (c) in opened (b, c left) and closed (b, c right) environments. Trajectory followed by the operator with 8 anchors (d) and with 9 and 10 anchors (e) in opened environment

Tableau 3.2 Coverage and accuracy for various anchor configurations across three areas

Anchors	4	5	6	7	8	9	10
Coverage floor 0 (%)	100	100	100	100	100	100	100
Accuracy floor 0 (cm)	10.4	11.6	11.0	9.8	10.6	9.4	10.8
Coverage stairs (%)	23	40	34	40	48	100	100
Accuracy stairs (cm)	277.3	219.2	226.2	209.4	178.8	22.3	21.2
Coverage floor 1 (%)	0	20	68	70	100	100	100
Accuracy floor 1 (cm)	/	57.8	51.6	19.2	11.7	11.9	12.0

This result can be explained by errors in NLOS distance measurements through the concrete floor. These measurements, affected by significant errors, do not produce intersecting spheres converging to a unique point. Consequently, operator localization cannot be achieved across multiple levels with only four anchors. These observations highlight the need to consider adapted anchor configurations to ensure multi-story spatial coverage, particularly in complex industrial environments. Subsequently, we tested operator localization by adding four anchors to the upper level.

The measured trajectories with eight anchors are illustrated in Figure 4.c. In the open environment, positions were detected on both levels and corresponded to the actual path taken, with an average positioning error of 11.4 cm (Figure 3.5.c). Measurement repeatability was confirmed in a second (closed) environment characterized by UWB signal drop zones. The results indicate that position tracking is feasible in different contexts, even when independent systems must take over to ensure coverage of distinct environments (Figure 3.5.c). The results presented in Figure 3.5.d show that staircases present a particular challenge for UWB-based localization. The accuracy is significantly degraded due to the multiplication of NLOS conditions caused by the positioning of anchors relative to staircases. This results in an increased localization error, with a mean deviation of 1.78 m and only 48% coverage. The non-uniform spatial distribution of the anchors, combined with obstructions due to stair railings and steps, contributes to a weaker signal reception and higher measurement variability.

3.4.3 Optimization of Tracking Through Additional Anchors

To enhance accuracy in complex areas, particularly staircases, a new set of experiments was conducted by adding additional anchors. Figure 3.4.e illustrates that adding one anchor, A_9 , significantly improved coverage and accuracy, reducing the root mean square error to 22 cm. A similar result was achieved by adding another anchor, A_{10} , which allowed for 100% coverage of trajectories within the staircases. The experimental results confirm that reducing the number of anchors negatively impacts localization coverage and accuracy. When using only seven anchors instead of eight, the coverage on the upper floor dropped to 70%, and the mean localization error increased from 12 cm to 19 cm (Table 3.2). This degradation highlights the importance of maintaining a sufficient number of well-positioned anchors to ensure reliable multi-floor tracking.

3.5 DISCUSSION

The experiments conducted in this study provide valuable insights into the performance of UWB-based multilateration in multi-story industrial-like environments. One of the most striking findings is the strong impact of concrete floors, which constitute major sources of NLOS signal degradation. Their thickness and high dielectric constant alter both signal velocity and propagation paths, systematically leading to overestimated distances and increased localization errors. These results highlight how vertical obstructions, often overlooked in conventional single-story analyses, play a critical role in industrial buildings.

Another area where localization performance was notably degraded is the staircase region. Here, error levels and coverage reductions were substantially higher than in other parts of the testbed. Two main factors explain this degradation. First, the metallic structure of the stairs produced strong multipath effects, where signals reflected from several surfaces before reaching the receiver. These multipath components, often indistinguishable from the direct path, generated erroneous distance estimations. Second, the geometry of the stairs and their railings created frequent NLOS conditions due to the relative positioning of anchors along the vertical gradient. Together,

these factors amplified measurement uncertainty and significantly reduced the reliability of multilateration.

To mitigate these limitations, additional anchors were introduced in problematic zones. Their effect was immediate and positive : coverage and accuracy both improved significantly. This improvement can be attributed to two complementary mechanisms. On the one hand, the increase in the number of LOS measurements reduced the reliance on NLOS signals. On the other, the diversification of anchor–tag geometries distributed measurement errors more evenly, lessening the influence of any single inaccurate link. Notably, the installation of anchors on the upper floor played a decisive role, as it balanced trilateration geometries across vertical levels and ensured more robust positioning.

Anchor placement in this study did not follow an optimization algorithm but rather practical guidelines inspired by industrial constraints. Devices were systematically installed above head height to limit body shadowing and positioned near corners to maximize spatial separation. This approach, while not mathematically optimized, reflects real deployment conditions where installation choices are often driven by accessibility, safety regulations, and existing infrastructure. The fact that even such a pragmatic strategy could yield significant improvements demonstrates the critical importance of anchor positioning in multi-story contexts.

3.6 CONCLUSION

From the perspective of existing research, this study makes several contributions. Prior work has frequently investigated UWB localization under cluttered conditions, analyzing the effects of walls, machinery, or human presence. However, the majority of these studies have remained confined to single-floor settings, where vertical obstructions are minimal. Only a handful have examined inter-floor propagation, and even fewer have focused specifically on vertical transitions such as staircases. This work therefore fills a clear gap by documenting how thick concrete floors and stairwells degrade performance and by demonstrating how targeted deployment strategies can mitigate these effects. Furthermore, it provides empirical evidence where literature has often

relied on simulations or simplified testbeds, reinforcing the validity of the findings for real-world industrial scenarios.

The results also highlight a limitation of the standard four-anchor configuration commonly adopted in UWB deployments. In single-level settings, this configuration can suffice to deliver acceptable accuracy. In contrast, our findings show that in multi-story environments, four anchors fail to provide robust localization, particularly in NLOS-dominant areas. Additional anchors are necessary to guarantee sufficient LOS coverage and to achieve reliable geometric dilution of precision. This observation challenges the assumption, sometimes implicit in literature, that minimal anchor setups are transferable across environments. It underscores instead the need for deployment strategies that are explicitly adapted to the spatial complexity of industrial buildings.

Despite these advances, several limitations must be acknowledged. First, the environments investigated, though representative of industrial structures, were controlled and of moderate scale. The generalization of these results to larger, more heterogeneous sites requires further investigation. In particular, factories with multiple interconnected floors, denser machinery layouts, or more dynamic workflows may introduce additional variables not captured here. Second, anchor placement in this study was guided by practical considerations rather than algorithmic optimization. While this reflects real-world deployment conditions, it does not necessarily yield globally optimal configurations. Algorithmic approaches, including optimization heuristics or machine learning, could provide systematic methods to identify anchor layouts that minimize error under complex geometric constraints. Finally, this study did not account for dynamic environmental factors such as moving machinery, human activity, or changes in humidity and temperature. These elements are common in industrial contexts and can significantly affect UWB signal propagation, yet their impact on multi-story localization remains insufficiently understood.

By documenting the influence of vertical obstructions, identifying staircases as critical error-prone zones, and demonstrating the effectiveness of targeted anchor deployment, this work contributes both methodological and practical knowledge to the field. At the same time, it opens

the way for further research on automated anchor optimization and on the interaction of UWB signals with dynamic, large-scale environments.

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge CONFORMiT, Cascades, and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and Mitacs through the Alliance (ALLRP 577072) and Accelerate (IT32986) programs, respectively, for their financial support.

CHAPITRE 4

OBSTACLE-AWARE OPTIMIZATION OF UWB ANCHOR DEPLOYMENT FOR INDUSTRIAL INDOOR LOCALIZATION

Carlier Florian^a , Kévin Chapron^b , Jean-Pierre Kenné^a , Lucas Hof^a

^a Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^b CONFORMiT, bureau 200, 125 Rue Dubé, Saguenay, QC G7H 2V3, Canada

Article soumis pour publication, septembre 2025

4.1 Abstract

In industrial environments, accurate indoor localization of operators plays a critical role not only in operational monitoring and performance optimization, but also in enhancing worker safety, streamlining workflows, and ensuring regulatory compliance. While indoor localization technologies have seen rapid advances in recent years, many deployment strategies fail to consider the complex propagation conditions encountered in real-world industrial settings. Ultra-wideband (UWB) technology has emerged as a leading candidate for high-precision indoor positioning due to its robustness and accuracy. However, its performance can be significantly degraded by physical obstacles that cause Non-Line-of-Sight (NLOS) propagation, conditions that are common practice in factories and warehouses. This research study aims to contribute to address these challenges by presenting three main contributions. Firstly, it quantifies the impact of NLOS conditions caused by common industrial obstacles such as metal cabinets and shelving units on UWB signal accuracy. Secondly, it proposes a novel anchor placement optimization methodology that explicitly integrates obstacle information into the deployment strategy. Thirdly, it demonstrates through experimental evaluation that considering obstacles not only improves localization accuracy, but also enables a reduction in the number of anchors needed in functionally critical areas, depending on the size and density of obstacles. Overall, the findings highlight the importance of obstacle-aware deployment strategies to ensure both efficient and reliable UWB-based indoor localization in complex environments.

Keywords-component ;Ultra-Wideband ; Indoor Localization ; Anchor placement optimization ; Industrial environments ; Non line of sight ; Industry 5.0

4.2 Introduction

Indoor localization has become a rapidly growing area of research, particularly in industrial environments where traditional positioning systems face significant limitations (Hayward *et al.*, 2022). This interest aligns with the vision of Industry 5.0, which seeks to combine automation and digitalization with human-centric processes, aiming to improve productivity, flexibility, and worker safety simultaneously. In this context, indoor localization technologies offer promising solutions for tracking operators and equipment in real time, enabling both process optimization and enhanced risk prevention. For example, dynamic safety zones around machinery or smart vests that alert operators near active equipment (Sellak *et al.*, 2023) illustrate the safety potential of these systems. In critical operations such as mining or lockout/tagout (LOTO) procedures (Delpla *et al.*, 2023), accurate localization helps not only map hazardous areas but also ensure compliance and reduce human error (Sadeghi, Soltanmohammadlou & Nasirzadeh, 2022).

To meet industrial requirements for accuracy, robustness, and reliability, a variety of localization technologies have been investigated. Optical and acoustic solutions such as Light Detection and Ranging or ultrasound offer high precision under Line-of-Sight (LOS) conditions, but their performance deteriorates sharply in the presence of obstacles, airborne particles, or lighting variations, conditions typical of industrial settings (Obeidat, Shuaieb, Obeidat & Abd-Alhameed, 2021). Radio-frequency (RF) technologies, such as Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), Radio-Frequency Identification, and Ultra-wideband (UWB), are more robust in these environments and have thus gained traction in both research and deployment (Kunthoth, Karkar, Al-Maadeed & Al-Ali, 2020). Among these, UWB stands out for its ability to achieve sub-meter accuracy and its relative resilience to multipath effects, leveraging Time of Flight (ToF) and Two-Way Ranging (TWR) instead of signal strength measurements. This positions it as a strong candidate for industrial localization, where precision and robustness are essential (Wang *et al.*, 2023). However, UWB remains particularly sensitive to Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions,

which are pervasive in industrial spaces due to walls, machinery, and metallic structures. These obstacles cause diffraction, attenuation, and signal distortion, leading to significant ranging errors. Recent studies have sought to mitigate these effects using NLOS detection, signal modeling, and machine learning-based classification approaches (Dong, Liu & Zhang, 2023; Mirama *et al.*, 2023; Tu *et al.*, 2024).

Among the strategies explored to mitigate NLOS-related degradation in UWB performance, particular attention has been given to optimizing the placement of anchors. Since anchors play a central role in multilateration-based systems, their configuration can significantly influence localization accuracy, especially in environments cluttered with obstacles.

A key factor in ensuring optimal accuracy in indoor localization is the strategic placement of anchors, which are essential components of multilateration-based systems used to estimate the position of objects and operators. In industrial settings, optimizing anchor deployment is particularly challenging due to the presence of dense infrastructure and numerous obstacles that can interfere with UWB signal propagation, often leading to significant localization errors. To tackle these challenges, various studies have proposed optimization strategies based on different performance metrics such as localization error (LE), Geometric Dilution of Precision (GDOP), and coverage rate, often using heuristic or evolutionary algorithms to guide the placement of anchors.

Table 4.1 provides a comparative overview of these studies reported in literature. The “Technology RF” column indicates the wireless technology adopted (BLE, ultrasound, UWB, etc.), which directly influences localization accuracy and robustness. The “Environment” section specifies whether the optimization considered 3D placement, GDOP effects, or environmental constraints such as walls and obstacles, which are critical in industrial facilities. The “Optimization” section highlights the performance criteria used as fitness functions (e.g., coverage, localization error, Fisher Information Matrix, Cramer-Rao Lower Bound), revealing the diversity of approaches to quantify positioning quality. The column on “Minimum number of anchors calculated” shows whether the study explicitly addressed deployment efficiency by seeking to reduce

the infrastructure cost while maintaining accuracy. Finally, the “Experimental validation” column identifies works that went beyond simulations and tested their strategies in real-world environments.

By structuring the comparison along these dimensions, Table 1 emphasizes both the achieved progress and the persisting gaps in anchor placement research, particularly regarding the simultaneous consideration of multiple environmental constraints and the calculation of the minimal anchor set.

Tableau 4.1 Comparative overview of anchor deployment optimization strategies for indoor localization

Article	Tech. RF	3D	GDOP	Walls	Obstacles	Fitness Function	Min. # Anchors
Rajagopal et al., 2016	BLE	✓	✓			GDOP, UL	✓
Falque et al., 2018	BLE			✓		Cov, LE	✓
Zhang et al., 2021	BLE			✓		Cost, Accuracy, Cov	
Wu et al., 2023	/				✓ (unique material)	LE	
Andrews & Ngo, 2024	Bluetooth			✓		Cov	✓
Famili et al., 2024	UltraSound	✓	✓			4-connectivity, GDOP, Cov	✓
Pan et al., 2021	UWB			✓		LE	✓
Pan et al., 2022	UWB			✓		LE, CRLB	
Zhang et al., 2024	UWB	✓	✓	✓	✓	GDOP, Cov	✓
Sharma & Badarla, 2019	UWB	✓				FIM-based	
Sharma & Badarla, 2021	/	✓			✓ (only position)	FIM-based	
This study	UWB	✓	✓	✓	✓	4-connectivity, GDOP, LE	✓

Although these studies provide valuable insights and demonstrate promising results in simulated or simplified environments, several critical limitations persist. Indeed, most existing approaches neglect the complexity of real industrial settings, particularly the impact of diverse materials such as metal, plastic, or concrete on UWB signal behavior. The vast majority of prior work focuses

on idealized or uniform environments and relies on oversimplified models that do not account for the physical interactions between UWB signals and surrounding obstacles. Furthermore, the influence of material-specific properties, such as reflection, absorption, or diffraction, on ranging errors remains insufficiently explored, limiting the transferability of these models to heterogeneous factory environments.

Additionally, current optimization frameworks rarely integrate detailed knowledge of the spatial distribution and nature of obstacles. In particular, the refractive indices and electromagnetic properties of materials are almost never incorporated into anchor placement strategies, despite their measurable impact on signal attenuation and path distortion. As a result, anchor configurations optimized in theory may underperform when deployed in the field, especially in areas with high densities of reflective or absorptive materials.

Another key limitation lies in the uniform treatment of space in most optimization efforts. Existing approaches typically aim for homogeneous coverage of the entire area, without distinguishing between zones that require high localization accuracy, such as hazardous areas or locations with critical operations, and those where lower precision would be acceptable. This lack of prioritization leads to suboptimal deployment, often requiring more anchors than necessary to meet precision constraints across the board.

While the approaches summarized in Table 4.1 provide valuable contributions in terms of optimization strategies, their experimental validation is often limited. Many studies rely exclusively on simulations or simplified testing environments, which only partially reflect the complexity of real industrial settings. In particular, the influence of specific materials (e.g., metal, concrete, plastic), dynamic obstacles, and spatial constraints is rarely replicated accurately in experimental setups. This lack of real-world validation raises concerns about the robustness and applicability of proposed solutions under operational conditions. Although some studies include measurement campaigns, these are generally conducted in environments that fail to capture the heterogeneity and unpredictability of actual industrial contexts. As such, rigorous

and context-aware experimental validation remains a critical challenge for ensuring the practical effectiveness of anchor placement strategies.

To address these limitations, this study proposes a comprehensive framework that explicitly incorporates industrial constraints into anchor placement optimization. It begins with an in-depth analysis of the effects of various industrial materials on UWB measurement accuracy, including common obstacles such as steel, plastic, and concrete. The study then models the resulting localization errors, focusing in particular on how reflection and absorption influence signal propagation. Building on this, the physical characteristics of materials, specifically their refractive indices, are integrated into the optimization process to adapt anchor placement to the specific constraints of the environment. In addition, a new approach is introduced to identify and prioritize critical zones within the workspace, allowing for targeted optimization that maintains high accuracy in essential areas while reducing the total number of anchors needed. Finally, the proposed methodology is evaluated through a comparative study against existing strategies, demonstrating improvements in accuracy, robustness, and deployment efficiency in realistic industrial scenarios. To ensure its practical relevance, the proposed framework is also validated experimentally in a dedicated testbed at ÉTS that reproduces conditions closely resembling those encountered in industrial environments.

The remainder of this paper is structured as follows. Section 4.2 details the proposed methodological framework, including the principles of UWB localization, the modeling of material-induced signal distortion, and the hybrid optimization algorithm. Section 4.3 presents both simulation and experimental results, focusing on the impact of obstacles, anchor placement strategies, and the benefits of prioritizing critical zones. Finally, Section 4.4 concludes the study by summarizing the key findings and outlining potential directions for future research.

4.3 Methodology

The methodology is structured around five main axes, which are detailed in the following sections : an overview of the UWB technology and its operating principles (4.2.1), an analysis

of the impact of materials on signal propagation (4.2.2), an assessment of how the spatial distribution of anchors influences localization accuracy (4.2.3), a description of the experimental setup (4.2.4), and an introduction to the optimization algorithm employed (4.2.5). Together, these components establish the framework within which the subsequent results are interpreted. An overview of the methodology is presented in Fig. 4.1.

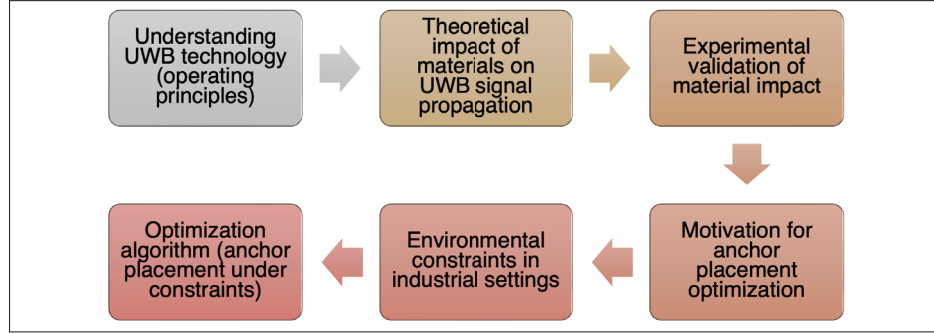


Figure 4.1 Methodological framework for optimizing UWB anchor deployment in indoor localization

4.3.1 UWB Technology and Multilateration

For the experiments, the DWM1001-DEV module, developed by Qorvo [source], is used in TWR mode. This device relies on UWB technology and multilateration techniques to estimate the position of an operator in an industrial environment. Multilateration involves the exchange of signals between a mobile tag and several anchors, whose positions are known. Unlike approaches that require strict synchronization of clocks between the anchors, the TWR method avoids this constraint by using a round-trip signal between the tag and a given anchor. Assuming the signal propagates at the speed of light c , the measured euclidian distance d_i between the tag and an anchor A_i depends on the round-trip time T_{RT} and the processing delay introduced by the device Δ_R as presented by equation (4.1) :

$$d_i = c \cdot \left(\frac{T_{RT} - \Delta_R}{2} \right) \quad (4.1)$$

This method, although robust, is subject to measurement uncertainties, particularly due to effects related to the Fresnel zone, which influence the signal propagation in cluttered environments. Once the distances d_i are measured with at least four anchors with coordinates (x_i, y_i, z_i) , in 3D, the position (x, y, z) of the tag is obtained by solving the nonlinear system of equations described by equation (4.2) :

$$\begin{cases} d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \\ d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \\ d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \\ d_4^2 = (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 \end{cases} \quad (4.2)$$

This system resolution is directly carried out by the UWB device used for the experiments. The intersection of the different spheres is presented in Fig. 4.2.

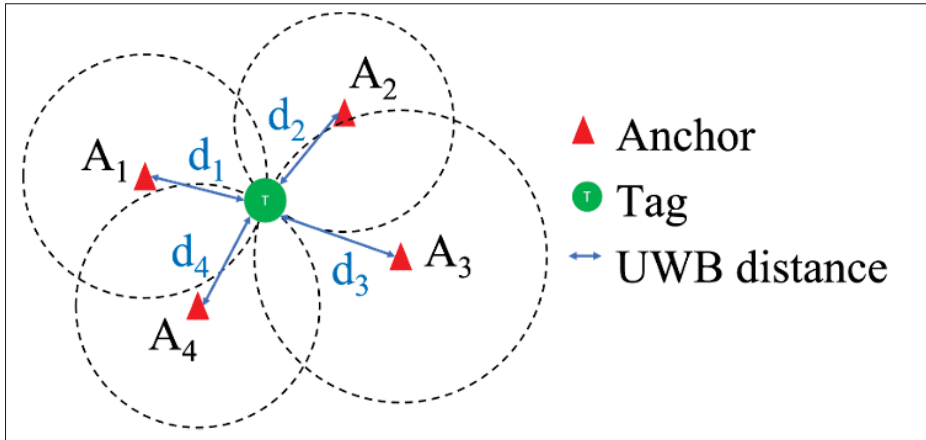


Figure 4.2 Principle of multilateration in UWB localization : measured distances (blue arrows $d_1 - d_4$) between tag (green) and anchors (red $A_1 - A_4$)

4.3.2 Impact of materials on UWB distance measurement

Although the TWR measurement is more robust than ToF-based approaches, it remains sensitive to the presence of obstacles between the transmitter and receiver. When a signal passes through a material, it is subject to several physical phenomena : absorption, where part of the signal's energy is dissipated into the material ; reflection, where the signal may be partially reflected at the material interface ; refraction and dispersion, where the signal's direction and speed change depending on the properties of the material being traversed. These effects alter both the received power and the distance measurement, thus impacting the accuracy of localization. In LOS conditions, with no obstacles, the received signal power P_R at a distance d_i follows the free-space propagation law described by equation (4.3) :

$$P_r = P_T + G - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f_c d_i}{c} \right) \quad (4.3)$$

Where P_T is the transmitted power, G is the antenna gain, and f_c is the UWB signal frequency. This equation is modified in Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions, with obstacles present, and becomes equation (4.4) :

$$P_r = P_T + G - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f_c (d_{i1} + d_{i2})}{c} \right) - L_{MATERIAL} [dB] \quad (4.4)$$

Where d_{i1} is the distance between the transmitter and the obstacle, d_{i2} is the distance between the receiver and the obstacle, and $L_{MATERIAL}$ represents the power loss in the material corresponding to the absorbed signal.

Beyond the received power, the distance itself is also affected. The measured distance in the presence of obstacles, d'_i , is influenced by signal refraction, leading to an overestimation of the distance. This is described by equation (4.5) :

$$d'_i = d_i + w \cdot (R - 1) \quad (4.5)$$

Where w is the width of the obstacle, and R is the refractive index of the obstacle for radio waves with a wavelength of 3.5 GHz. The dispersion of UWB signals through a material is shown in Figure 4.3.

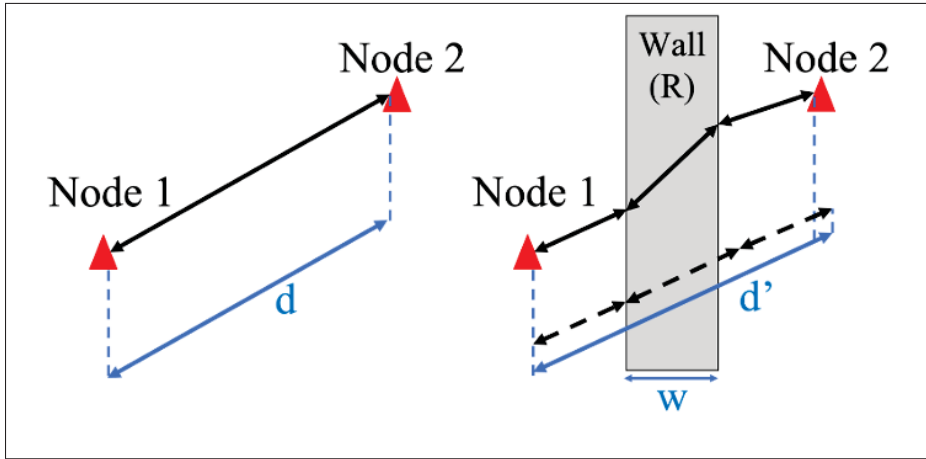


Figure 4.3 Effect of material-induced refraction on UWB ranging : refractive index (R), measured distance (d'), true distance (d), and wall thickness (w)

Thus, the three main factors affecting measurement accuracy in the presence of obstacles are material reflection, signal absorption, and, finally, refraction caused by changes in the propagation medium.

4.3.3 Impact of anchor dispersion on location accuracy

The accuracy of localization through multilateration is strongly influenced by the geometric dispersion of the anchors. This factor has been widely studied in the context of satellite positioning for the Global Positioning System (GPS). It is also applicable to indoor localization for optimizing anchor placement, both in 2D and 3D. In 2D, the commonly used metric is the Horizontal Dilution of Precision (HDOP), while in 3D, it is the Global Dilution of Precision

(GDOP). The distinction between these two indicators lies in the consideration of the vertical component. This study is limited to 2D localization accuracy, as the primary objective is to determine an operator's position within a factory floor. The study [self-citation] demonstrated that floor-level recognition remains accurate regardless of whether GDOP or HDOP criteria are considered. In the case of 2D localization, the position vector $T = [xy]^T$ is estimated from the distance measurements of the four closest anchors. These measurements include a temporal bias, which we assume to be zero in this study, simplifying the model. The associated criterion can be described by equation (4.6) :

$$\Delta d_{imes} = H\Delta T \quad (4.6)$$

Where H is the Jacobian matrix of partial derivatives described in equation (4.7) :

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{d_{1mes}} & \frac{y-y_1}{d_{1mes}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_n}{d_{nmes}} & \frac{y-y_n}{d_{nmes}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

In this study, perfect synchronization using the UWB device described above is assumed. Let C be the covariance matrix representing the position error. The HDOP is then defined by equation (4.8) :

$$HDOP = \sqrt{tr(C)} \quad (4.8)$$

HDOP is directly influenced by the two-dimensional arrangement of anchors A_i with coordinates (x_i, y_i, z_i) . The objective is to minimize the HDOP in order to reduce localization error. An optimal configuration therefore requires a homogeneous distribution of anchors across the two dimensions of space, x and y .

Table 4.2 presents the localization accuracy levels associated with different values of the dilution of precision (DOP) metric. These values are contextualized within our industrial indoor localization scenario. Although Table 4.2 is primarily derived from GPS-related studies, the classification remains applicable to any localization system.

Tableau 4.2 SInterpretation of HDOP values for localization accuracy assessment

HDOP value	Accuracy	Interpretation
1	Excellent	Optimal anchor geometry
1-2	Good	Acceptable accuracy
2-4	Medium	Risk of error
>4	Poor	Low accuracy

4.3.4 Anchor placement availability

In an industrial environment, studies have shown that, to minimize NLOS conditions induced by the human body, the tag should be worn on the wrist or head (Otim *et al.*, 2019). This study thus considers that the precise localization of the operator can be restricted to certain areas within the 3D space, as illustrated in Fig. 4.4. The lower limit corresponds to the resting wrist height for a person measuring 1.40 meters, while the upper limit corresponds to the head height for a person of 2.20 meters. movement and to comply with regulations regarding the minimum corridor dimensions. Furthermore, the anchors must be placed above the employees' heads to ensure that no obstacles induced by the human body of various employees interfere with the localization process.

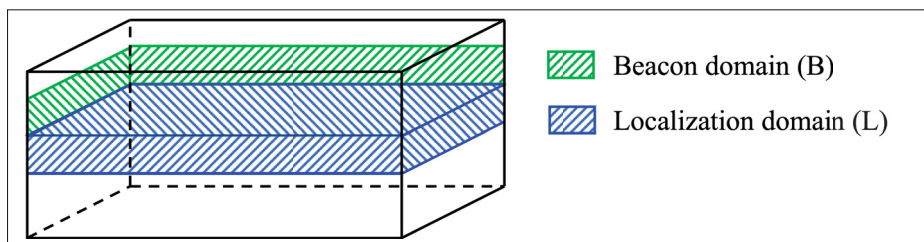


Figure 4.4 Definition of the localization domain considered in anchor deployment optimization

4.3.5 Hybrid optimization approach development

In the context of optimal anchor placement for indoor localization in constrained environments, conventional optimization techniques often reach their limits due to the combinatorial complexity of the problem, the multiplicity of constraints, including coverage, geometric accuracy, minimal anchor count, and spatial feasibility, and the computational cost associated with solution evaluation. To address these challenges, we propose a hybrid optimization approach that combines Simulated Annealing (SA) and Tabu Search (TS). Simulated Annealing is inspired by the physical annealing process, where a material is gradually cooled to reach a state of minimum energy. In optimization, this principle allows the algorithm to escape local minima.

In an industrial setting, anchors can only be installed on walls to avoid obstructing employee by accepting temporarily suboptimal solutions with a probability governed by a temperature parameter. As the iterations progress, the temperature decreases according to a cooling coefficient (α), gradually reducing the acceptance of inferior configurations and guiding the search toward increasingly stable and promising solutions. This method is particularly well-suited to our problem, which involves a large, discontinuous search space with many local optima.

To further enhance the search efficiency and prevent stagnation, a short-term memory mechanism is introduced via a tabu list. This structure temporarily forbids revisiting previously explored configurations, thereby avoiding redundant cycles and promoting broader exploration of the solution space.

The algorithm relies on a multi-objective fitness function specifically designed to assess the quality of anchor configurations based on three fundamental aspects of indoor localization. First, a severe penalty is applied whenever any point in the environment is not covered by at least four anchors, the minimum requirement for reliable 3D positioning. Second, geometric precision is evaluated using the maximum HDOP value observed among the sufficiently covered points; higher values indicate poor geometric dilution of precision and are penalized accordingly. Third, the total number of anchors deployed is moderately penalized to discourage over-dimensioned configurations and encourage a balance between localization performance and deployment cost.

The fitness function thus promotes an optimal trade-off between complete coverage, geometric accuracy, and deployment efficiency.

Algorithme 4.1 Mix SA-TS

```

1 Algorithme : Mix SA-TS
   Input : Localization domain ( $L$ ), Anchor domain ( $A$ ), Anchor range ( $r$ ), fitness function
           ( $f$ ), Initial temp ( $T_0$ ), Limit temp ( $T_L$ ), Cooling rate ( $\alpha$ ), iteration per temp ( $i_T$ ),
           tabu list length ( $n$ )
   Output : Optimized placement ( $P$ ) of anchors minimizing anchors number and GDOP
             average

2 while  $T > 1$  do
3   for  $i = 1$  to  $i = i_T$  do
4     while Solutiion in Tabulist do
5       if  $T > T_L$  then
6         | Add, Delete or Move an anchor randomly
7       end if
8       else
9         | Add, Delete or Move an anchor with a probability of 0,8 for move and
          | 0,1 for add and delete
10      end if
11    end while
12     $h \leftarrow f(\text{initialsolution})$   $\Delta \leftarrow h - g$  Generate a random number  $r \in [0, 1]$  Add
        solution to tabu list if  $\Delta > 0$  or  $r < \exp(\frac{\Delta}{T})$  then
13      |  $g \leftarrow h$  Initial solution  $\leftarrow \text{newsolution}$  end if
14      else
15        | Cancel movement and go back to Initial solution
16      end if
17    end for
18     $T \leftarrow T \cdot \alpha$ 
19  end while
20   $P \leftarrow \text{last solution}$ 

```

In this framework, the SA temperature parameters play a crucial role. The initial temperature T_0 reflects the algorithm's willingness to accept imperfect configurations, such as those with redundant anchors, incomplete coverage, or unfavorable HDOP, allowing for broad exploration of the solution space at the beginning of the optimization process. The cooling coefficient controls

the rate at which this tolerance diminishes, progressively refining the search by favoring only meaningful improvements. These parameters ensure a dynamic balance between exploration in the early stages and exploitation of high-quality solutions in later iterations, in direct alignment with the problem's core objectives.

Moreover, the adaptive behavior of the algorithm with respect to temperature enhances its robustness. At high temperatures, movements are selected randomly to ensure broad and unbiased exploration, whereas at low temperatures, the algorithm favors targeted modifications, primarily anchor displacements, that are more likely to fine-tune the configuration. This controlled transition from global to local search allows for efficient convergence.

By combining these two complementary strategies, Simulated Annealing for probabilistic exploration and Tabu Search for strategic memory-based guidance, the proposed algorithm efficiently converges toward high-quality solutions, even in complex environments where topological constraints and HDOP sensitivity render traditional methods ineffective.

4.3.6 Statistical Analysis

To assess the significance of performance differences between tested configurations, localization error data were analyzed using two complementary statistical tests. An independent samples t-test was applied to compare the mean localization errors, under the assumptions of normality and homogeneity of variance. To further validate the findings without assuming any specific distribution, the non-parametric Mann–Whitney U test was also performed, focusing on potential differences in median values. A significance level of $p < 0.05$ was used as the threshold for statistical relevance. All statistical analyses were carried out using the SciPy library in Python.

4.4 Experimental Results

This section presents the results of both simulation and experimental analyses designed to evaluate the proposed framework under various conditions. The aim is to quantify the influence of physical and spatial constraints on UWB-based localization performance and to assess the

benefits of the developed optimization strategy. The results are organized into four subsections. First, we analyze how different industrial materials affect the accuracy of distance measurements. Second, we examine how the presence of obstacles influences optimal anchor placement. Third, we investigate the impact and practical value of defining zones of importance in the optimization process. Finally, the proposed approach is validated in a real industrial environment to demonstrate its applicability and effectiveness in realistic deployment scenarios.

4.4.1 Impact of Materials on UWB Distance Measurements

In industrial environments, UWB signals often encounter obstacles such as machinery, containers, and enclosures made of diverse materials. To assess their impact on measurement accuracy, an experimental study was conducted using three representative materials : high-density polyethylene (HDPE), galvanized steel and carbon steel.

Each material was tested using a corresponding object commonly found in factories (e.g., a trash bin, shelf, or electrical cabinet). A UWB transmitter and receiver were placed at a fixed distance, and the object was positioned between them. 100 distance measurements were collected for each configuration using Two-Way Ranging (TWR) mode. The reference distance was obtained using a Bosch GLM40 laser rangefinder. Table 4.3 provides a detailed description of the obstacles, including their dimensions. Fig. 4.5 illustrates the measurement errors for each type of obstacle, enabling the classification of their impact on UWB measurement accuracy.

Tableau 4.3 Materials and dimensions of obstacles used in experimental UWB tests

Obstacle	Garbage can	Electric box	Shelf	Cabinet
Material	HDPE	Carbon steel	Carbon steel	Galvanized steel
Width (cm)	82	71	199	103

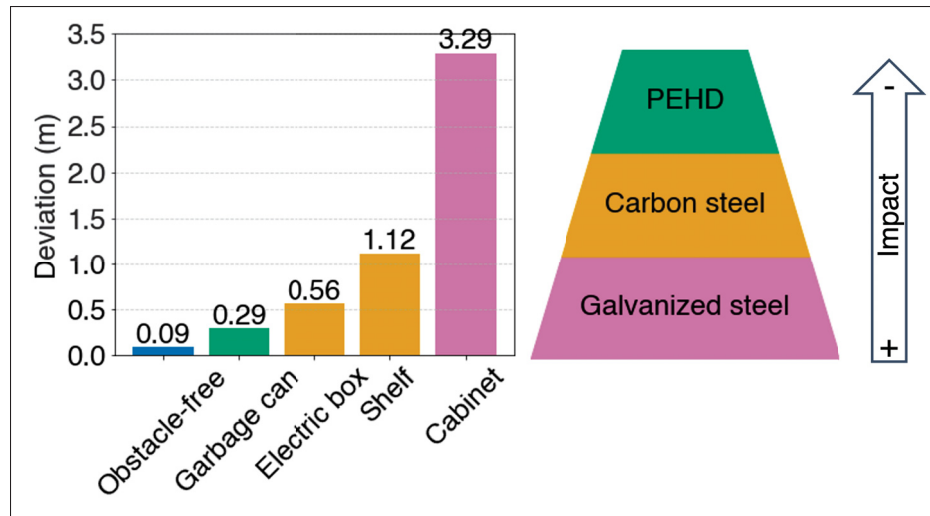


Figure 4.5 Impact of obstacles on UWB ranging : (a) experimental distance measurements between two UWB nodes separated by obstacles, (b) classification of materials by attenuation effect

Fig. 4.5.a shows the average error for each material. Galvanized steel caused the most significant error, while HDPE produced minimal error. The classification in Fig. 4.5.b ranks the materials according to their effect on UWB accuracy.

These results highlight how common industrial obstacles affect UWB performance and motivate the integration of obstacle modeling into anchor placement strategies. This is further explored in subsequent sections.

4.4.2 Effects of Obstacles on Optimized Anchor Placement

In industrial settings, anchor placement must often contend with physical obstructions such as walls, partitions, or equipment. To assess how these obstacles influence the anchor deployment strategy, we conducted simulations across seven distinct environments, labeled A through G, illustrated in Fig. 4.6 and Fig. 4.7, each with varying dimensions and obstacle layouts, presented in Table 4.4. These environments were designed to isolate the effects of surface area and obstacle

configuration on localization coverage and anchor count. Environment A corresponds to a real testbed, while B through G are synthetic variations.

Tableau 4.4 Dimensions of experimental environment (A) and simulated environments (B-G)

Environment	A	B	C	D	E	F	G
Superficies (m^2)	130	750	1400	2480	2842	4000	6000

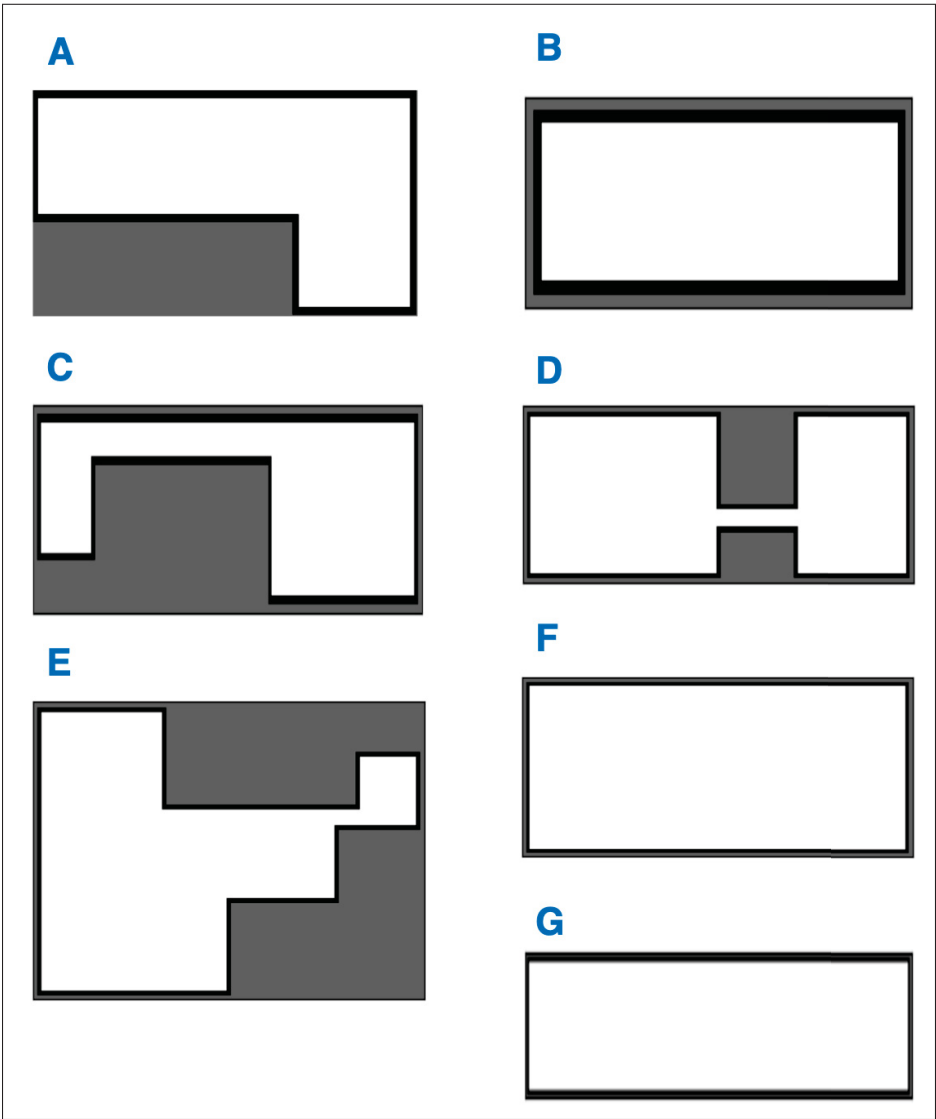


Figure 4.6 Experimental environment (A) and simulated environments (B-G) without concrete walls

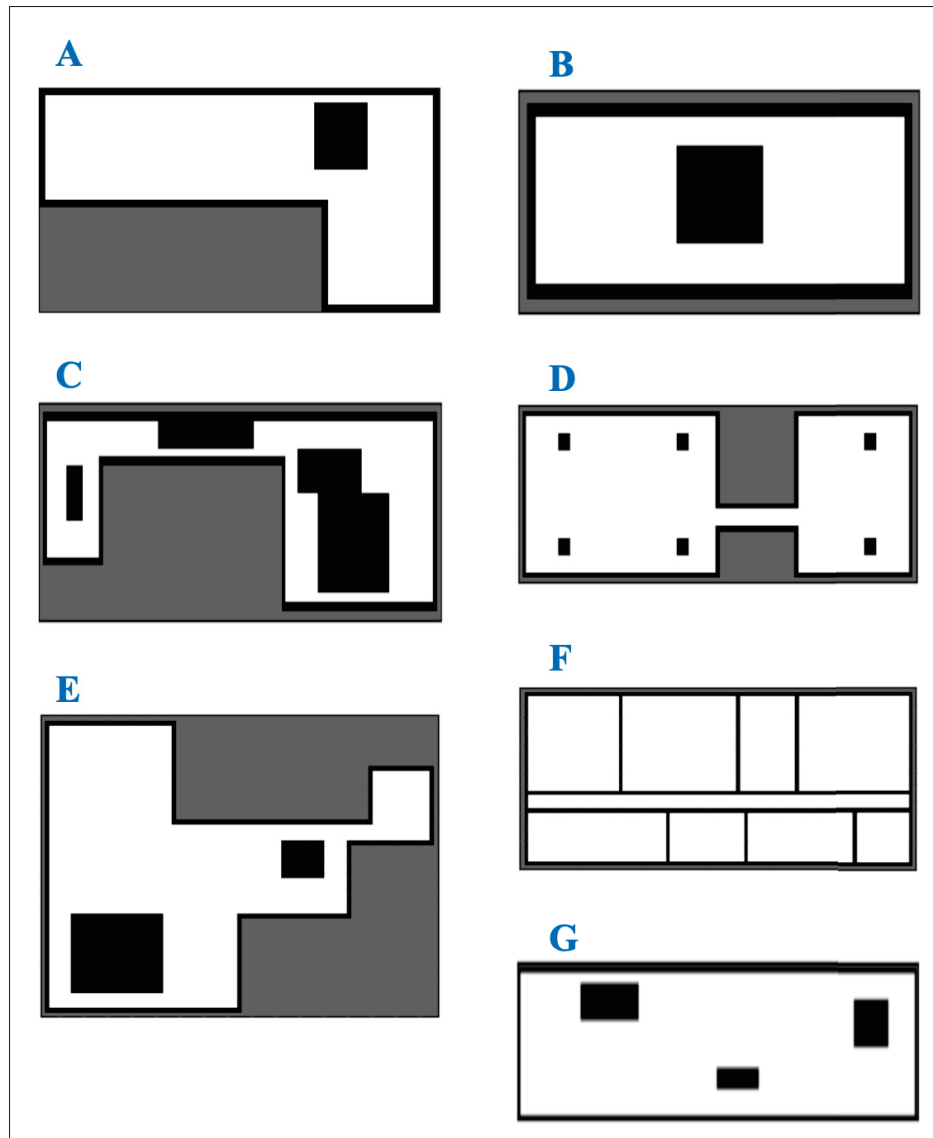


Figure 4.7 Experimental environment (A) and simulated environments (B-G) with concrete walls

Anchor placement optimization was performed for all environments using the hybrid SA-TS algorithm described in Section Methodology. Each environment was tested under two conditions : one without considering internal walls and one incorporating concrete walls as signal-blocking obstacles. The number of anchors required for full coverage and acceptable geometric precision (based on HDOP) was then recorded and displayed in Fig. 4.8.

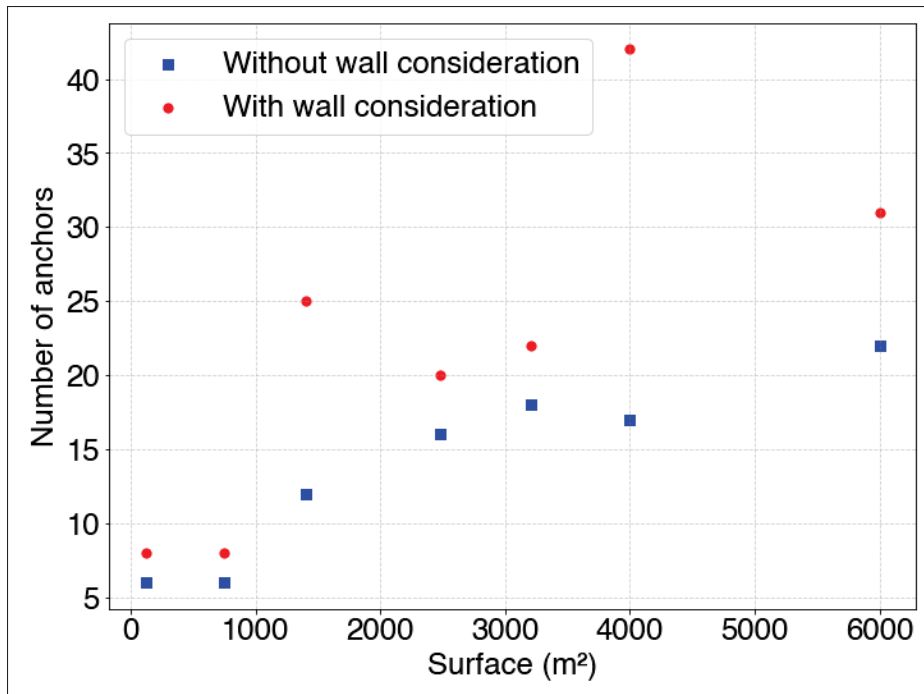


Figure 4.8 Number of anchors required after optimization in different environments with and without concrete walls

The results show that in the absence of obstacles, the number of anchors increases roughly with the environment's total surface area. For instance, Environment A ($103m^2$) required only 6 anchors, whereas Environment G ($1960m^2$) required 22. However, when walls were taken into account, the anchor count increased in most environments. This effect was particularly pronounced in Environment F, composed of multiple small rooms, where the number of required anchors more than doubled.

In Environment C, where obstacles occupy a large portion of space despite a moderate total surface area, the anchor count also rose significantly when walls were considered. Conversely, in Environment D, which has few internal obstructions, the difference between the two cases remained minimal.

These variations can be attributed to the fact that walls and dense partitions block direct signal paths between anchors and the points to localize. In such configurations, fewer line-of-sight

(LOS) links are available, requiring additional anchors to ensure proper trilateration and maintain acceptable HDOP values.

To further investigate the role of non-structural obstacles like equipment or storage units, additional tests were conducted in Environments B through F, as depicted in Fig. 4.9. Obstacles made of previously tested materials (e.g., HDPE, carbon steel) were randomly distributed in each environment to cover 1%, 2%, 3% and 5% of the floor area. For each configuration, five independent random layouts were generated, and the average number of anchors was computed and showed in Fig. 4.10.

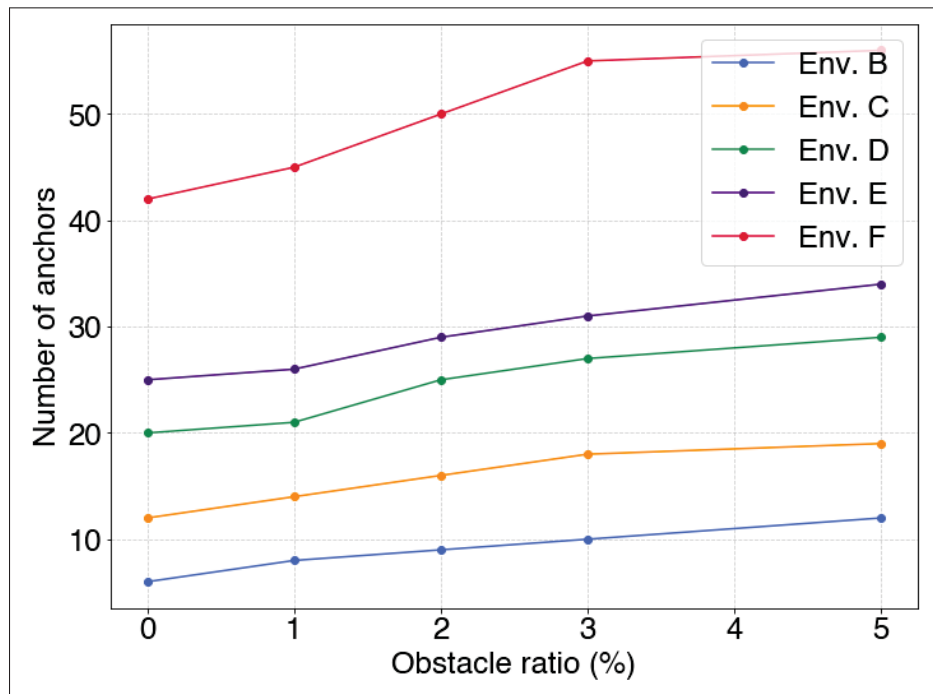


Figure 4.9 Tested environments with varying proportions of obstacles

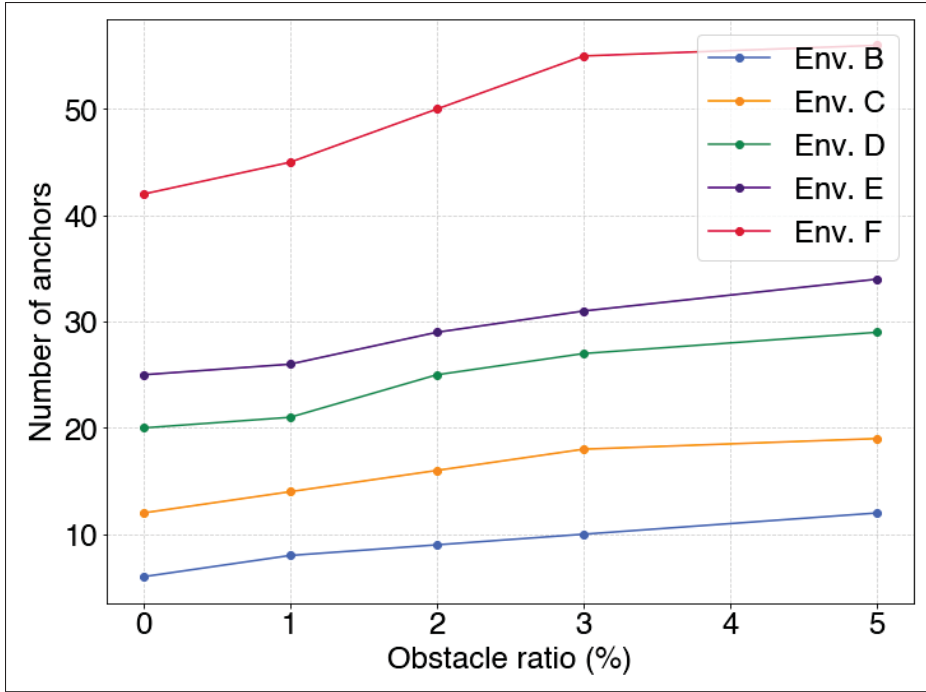


Figure 4.10 Influence of furniture obstacle coverage on the number of anchors required for UWB localization

The results confirm that the anchor count increases steadily with the obstacle coverage rate. For instance, in Environment E, moving from 0% to 5% obstacle coverage led to an increase of two anchors on average. While the exact magnitude of the impact varies by environment, the trend is consistent across all scenarios : as obstacles occupy more space, signal obstruction and multipath propagation increase, necessitating a denser anchor deployment to maintain coverage and localization geometry.

4.4.3 Effectiveness of Importance Zone Definition

In many industrial scenarios, precise localization is only required in specific work areas, such as around machines, control panels, or lockout points. To evaluate whether anchor deployment can be reduced while maintaining high accuracy in such zones of importance, simulations were conducted using a $6000m^2$ environment containing multiple prioritized areas.

The baseline configuration consisted of four square zones measuring 8×8 meters, spaced 20m apart. Three key parameters were varied independently to analyze their effect on the number of anchors required. The number of zones, varying from two to eight, the size of each zone, from 4×4 meters to 15×15 meters, the distance between zones, from 10 to 50 meters. These effects are illustrated in Fig. 4.11.

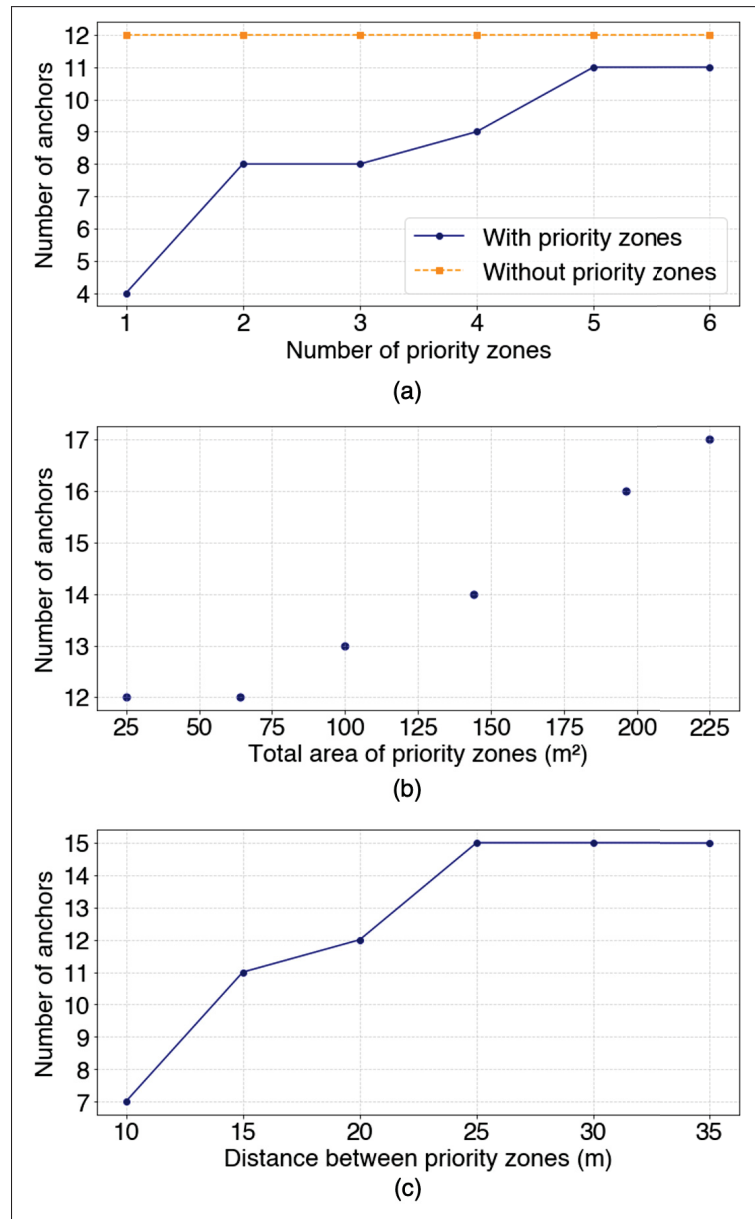


Figure 4.11 Influence of zones of importance on anchor requirements : (a) varying number of zones, (b) varying zone sizes, (c) varying inter-zone distances

Fig. 4.11.a shows that reducing the number of critical zones leads to a sharp decrease in the number of anchors needed, up to a threshold beyond which gains diminish. For instance, moving from 5 to 2 zones reduces anchor count by 27%. Changes in zone surface area had less impact, likely due to the fact that all individual zones remained under $750m^2$, as shown in Fig. 11b, a surface that can typically be covered with four anchors. However, inter-zone distance had a significant effect, as highlighted in Fig. 4.11.c : when distances exceeded $30m$, the UWB signal range used in the algorithm, anchor sharing between zones became impossible, causing a step increase in required anchors.

To assess whether the optimization was effective in improving geometric localization quality, HDOP heatmaps were generated for each scenario, and depicted in Fig. 4.12. In particular, the impact of importance-zone prioritization was evaluated by comparing HDOP maps for configurations with and without zone targeting.

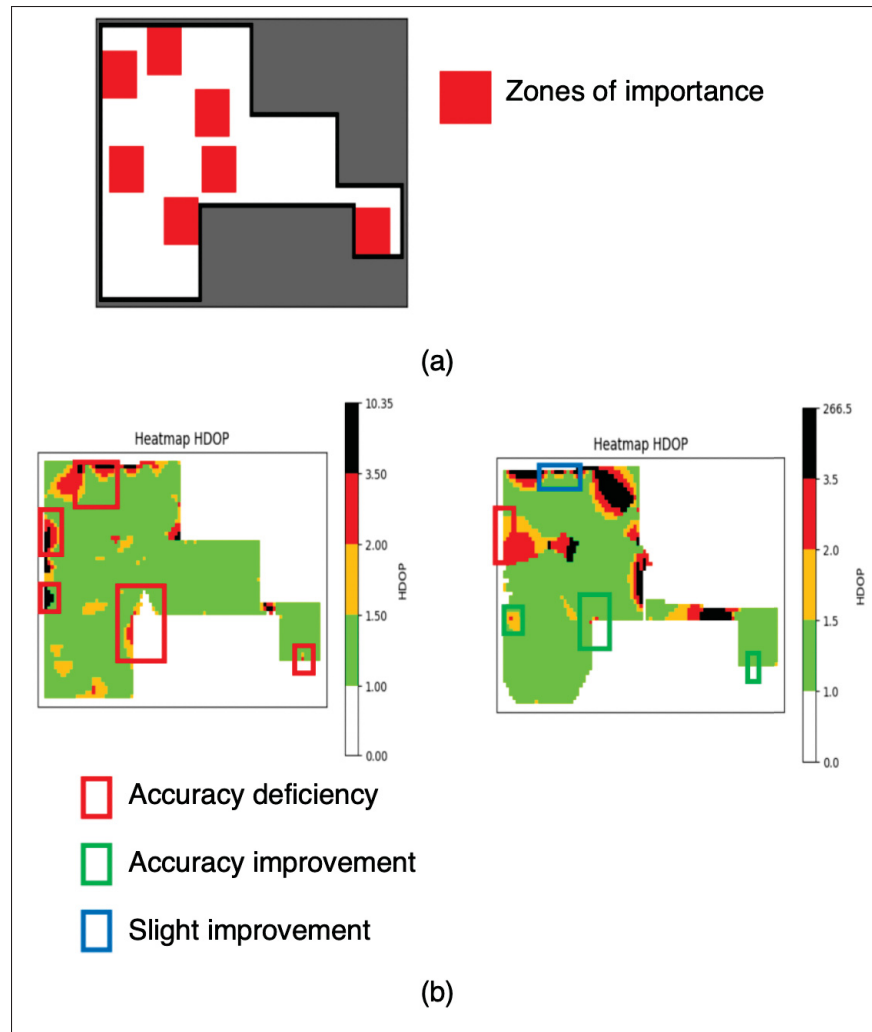


Figure 4.12 Improved accuracy in zones of importance. (a) Representation of zones of importance in the environment. (b) Modification in the precision in the various zones of importance (left) without consideration (right) with consideration

Fig. 4.12.a illustrates the spatial definition of the zones. In Fig. 4.12.b, the left panel shows the HDOP distribution without zone prioritization, while the right panel corresponds to the optimized configuration focused on the zones of importance. The data reveal that prioritizing zones significantly improves the dilution of precision within these areas : HDOP values drop below 2.0 in all targeted regions, reaching even 1.1 in the best-covered zones, which corresponds to excellent localization geometry.

Conversely, the HDOP worsens in peripheral, non-prioritized areas, as fewer anchors are dedicated to them. This redistribution of geometric quality illustrates the trade-off introduced by selective optimization : high accuracy is preserved in mission-critical zones, at the expense of coverage uniformity.

These results confirm that targeted deployment allows for improved accuracy in localized regions while reducing the overall number of anchors, supporting more cost-efficient and application-specific localization infrastructures.

4.4.4 Experimental validation in a real Environment

To validate the simulation results in realistic conditions, two experimental campaigns were conducted in a real industrial environment (Environment A). The objective was to assess the practical impact of integrating obstacle data and zone prioritization into anchor placement optimization. To ensure the robustness and reproducibility of the experimental results, six independent trials were conducted for each test configuration. In each trial, the operator followed a predefined path within the industrial environment presented in Fig. 4.14a with the black line while wearing the UWB tag above his head to minimize body shadowing effect as recommended by Otim *et al.* (2019).

4.4.5 Comparison between Obstacle-Aware and Obstacle-Agnostic Optimization

Two anchor configurations were generated using the hybrid optimization algorithm : one ignoring obstacles, called obstacle-agnostic, the other one incorporating known obstacle positions and material properties, named obstacle-aware. The resulting anchor layouts are presented in Fig. 4.13a (2D view) and Fig. 4.13b (3D view). The obstacle-aware strategy led to the placement of 10 anchors, compared to 9 in the obstacle-agnostic case. This difference reflects the algorithm's adaptation to signal degradation caused by industrial obstacles.

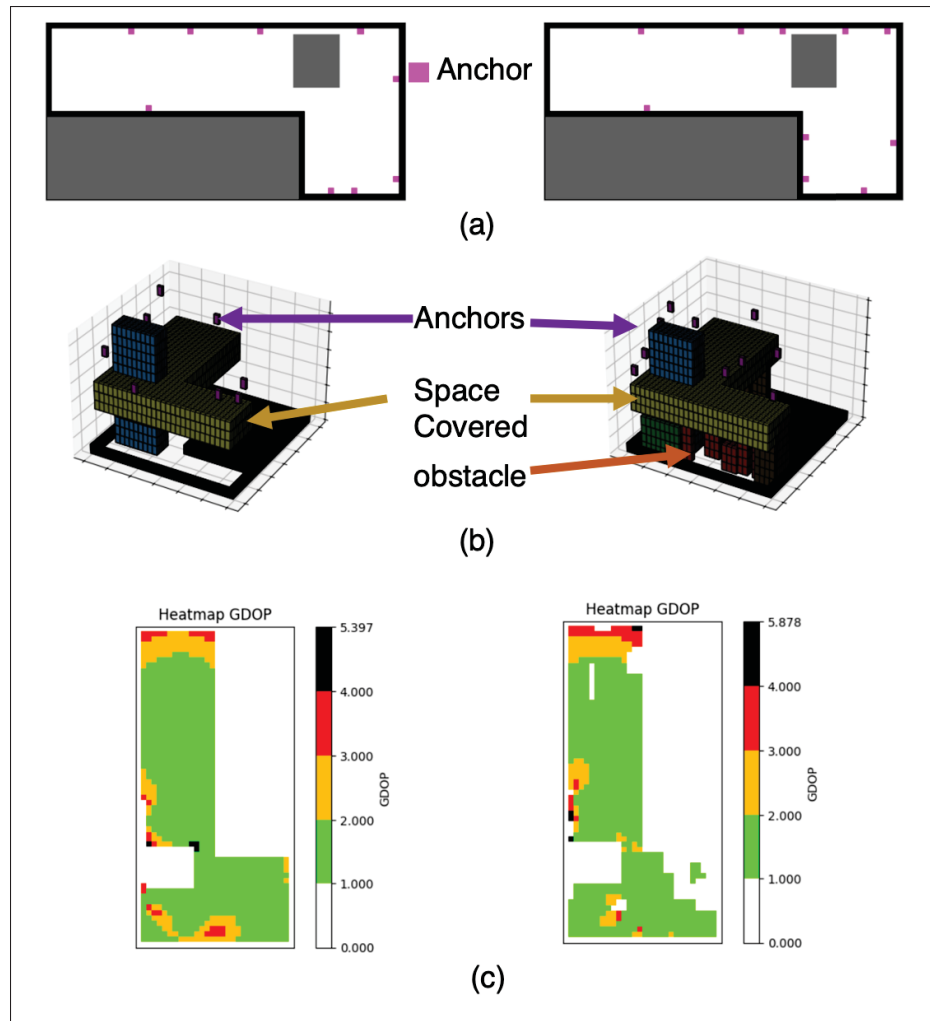


Figure 4.13 Experimental evaluation of UWB tracking accuracy with and without prioritization of zones of importance : (a) optimized anchor placement, (b–c) performance criteria with (right) and without (left) obstacle consideration

The registered path followed by the UWB tag are presented in Fig. 4.14a and the error of UWB registered path compared to original path are presented in Fig. 4.14b.

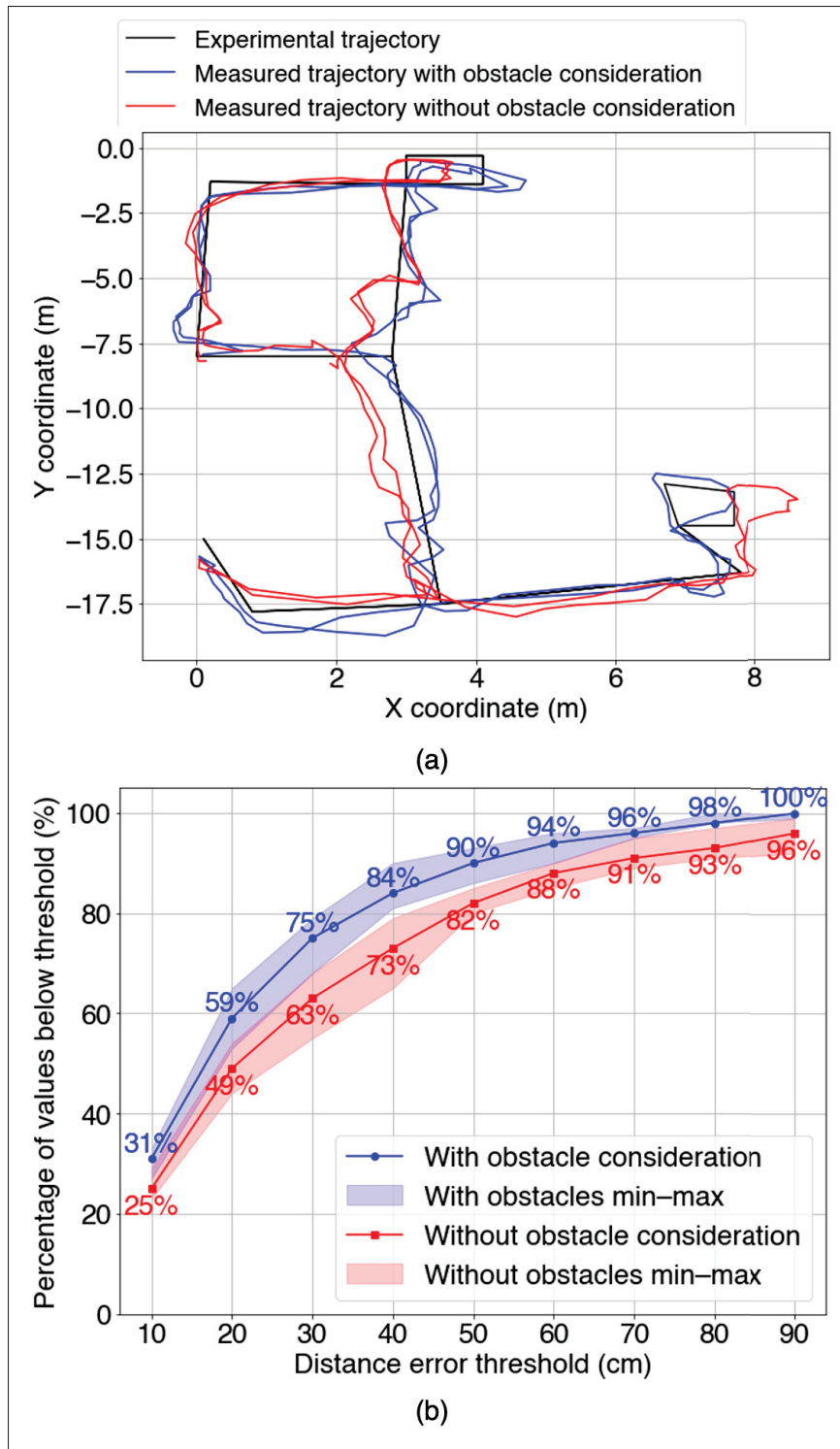


Figure 4.14 (a) Comparison of the trajectories followed by the operator using UWB multilateration with and without consideration of obstacles. (b) Distribution of result errors with and without consideration of obstacles in the optimization

The tracking paths reveal multiple deviations between the planned and measured trajectories, particularly in areas with high obstacle density. Without obstacle modeling, substantial errors were observed in the zone around coordinates $x = 8$, $y = \sim 13$, where the measured position diverged significantly from the actual path. A second deviation zone was identified near $x = 3$, where the localization performance degraded in the obstacle-agnostic configuration. In contrast, the obstacle-aware optimization led to more stable and accurate tracking along the entire path.

Moreover, Figure 14b illustrates the impact of the error tolerance threshold on the perceived reliability of the localization system. Notably, incorporating obstacle information consistently enhances performance : at a $50cm$ threshold, 90% of measurements fall within the tolerance when obstacles are accounted for, compared to only 82% when they are disregarded. This improvement persists at a $70cm$ threshold, with 96% of measurements within the limit when obstacles are considered, versus 91% otherwise. These findings underscore the added value of integrating obstacle information into the localization process.

A statistical analysis of the localization errors was conducted, with selected results presented in Fig. 4.15.

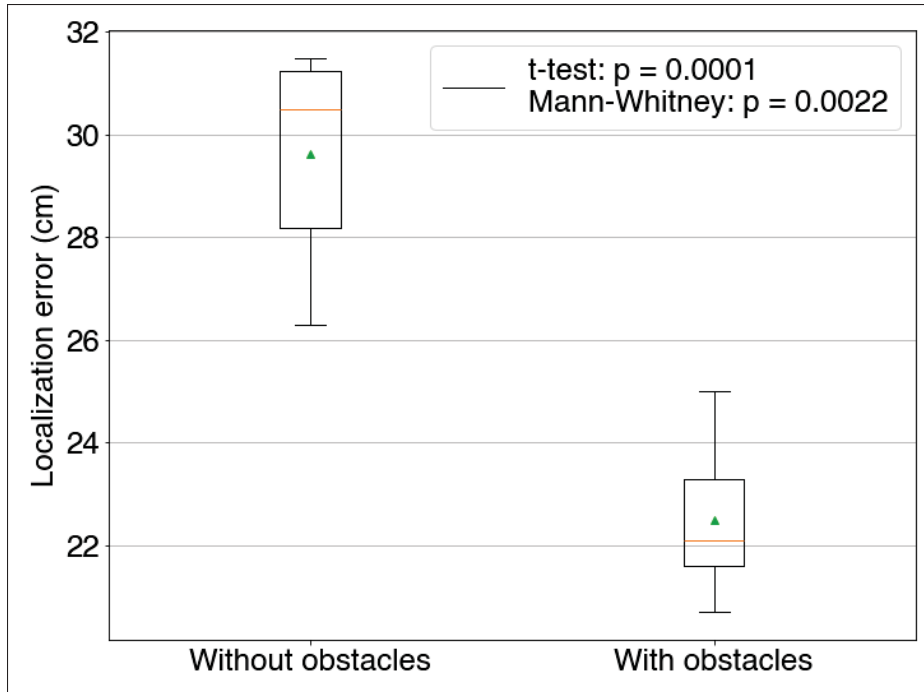


Figure 4.15 statistical comparison of optimization results with and without obstacle consideration

A significant difference in localization performance was observed between the two configurations. When obstacles were considered, the mean localization error decreased from 29.52.2cm to 22.51.6cm, representing an improvement of approximately 30%. This difference was statistically significant ($p < 0.001$).

4.4.6 Study of zones of importance

In a second experiment, the impact of zone prioritization on localization accuracy and the number of anchors was assessed. Three critical zones were defined based on obstacle density and anticipated operator activity. These zones, illustrated in Fig. 4.16a, were used to guide the optimization algorithm toward improved accuracy in strategically relevant areas. Two configurations were compared : one with uniform optimization across the entire area and another with targeted optimization focusing on the predefined zones of importance. The spatial location

of these critical zones is shown in Fig. 4.16a, and the resulting differences in optimization outcomes are presented in Fig. 4.16.

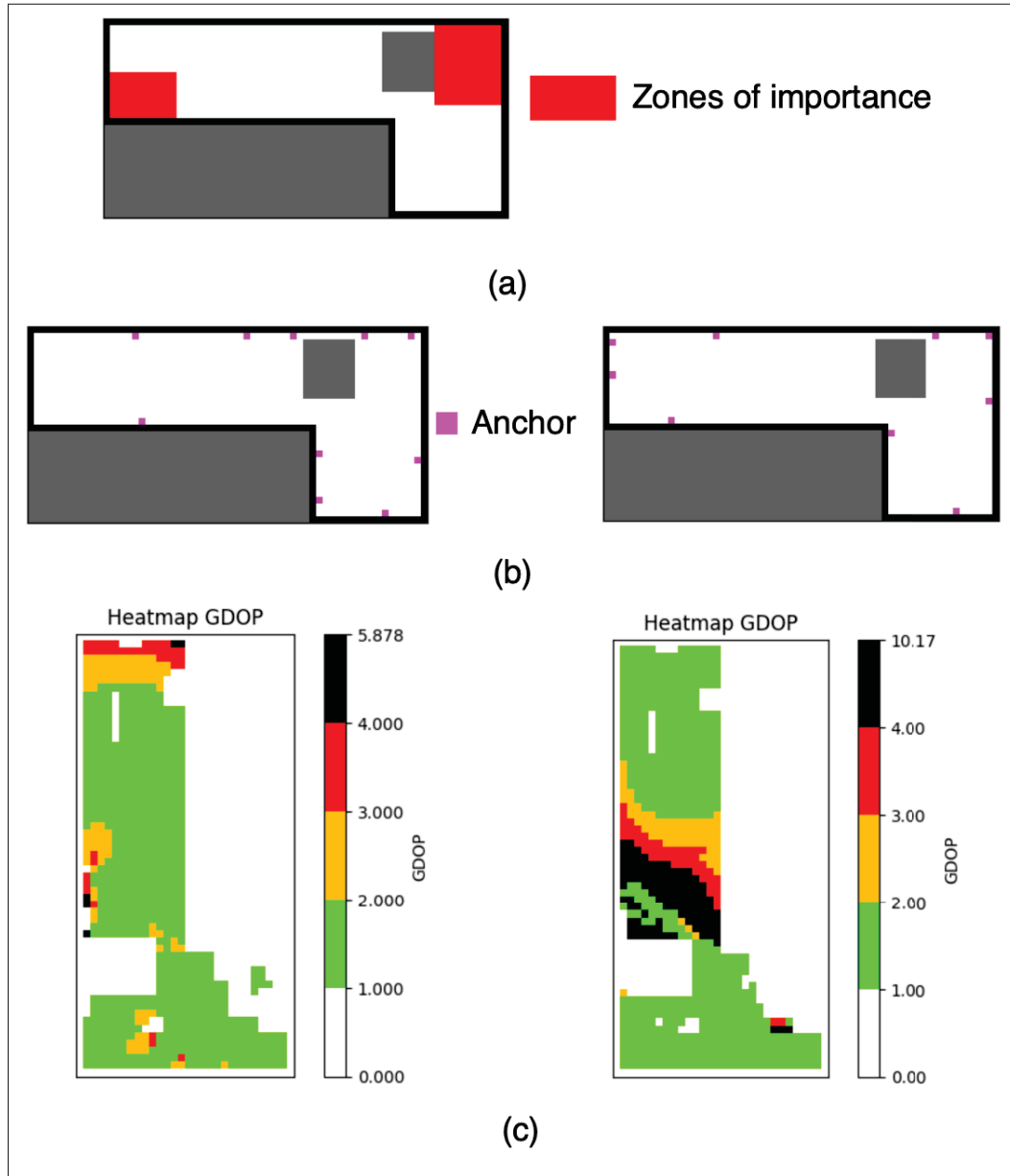


Figure 4.16 Experimental evaluation of UWB tracking accuracy with and without prioritization of zones of importance : (a) studied critical zones, (b) optimized anchor positioning, (c) optimization metrics with (right) and without (left) prioritization

The zone-focused optimization led to a reduction in the number of anchors from 10 to 9. The HDOP heatmaps, presented in Fig. 16c, confirm these observations : while HDOP values were generally uniform in the full-area case, they were significantly lower within the zones of interest when prioritization was applied (often below 1.5, with local minima around 1.1)

The resulting trajectories are presented in Fig. 17a. Clear differences were observed in the critical zones, characterized by the presence of multiple obstacles likely to disrupt UWB measurements. In particular, near $x = 0$ and $x = 3$, localization was more consistent and closely followed the reference trajectory when the zones of importance were considered. HDOP maps showed values below 2.0 in all prioritized zones, and the error histogram revealed an improvement in measurement precision.

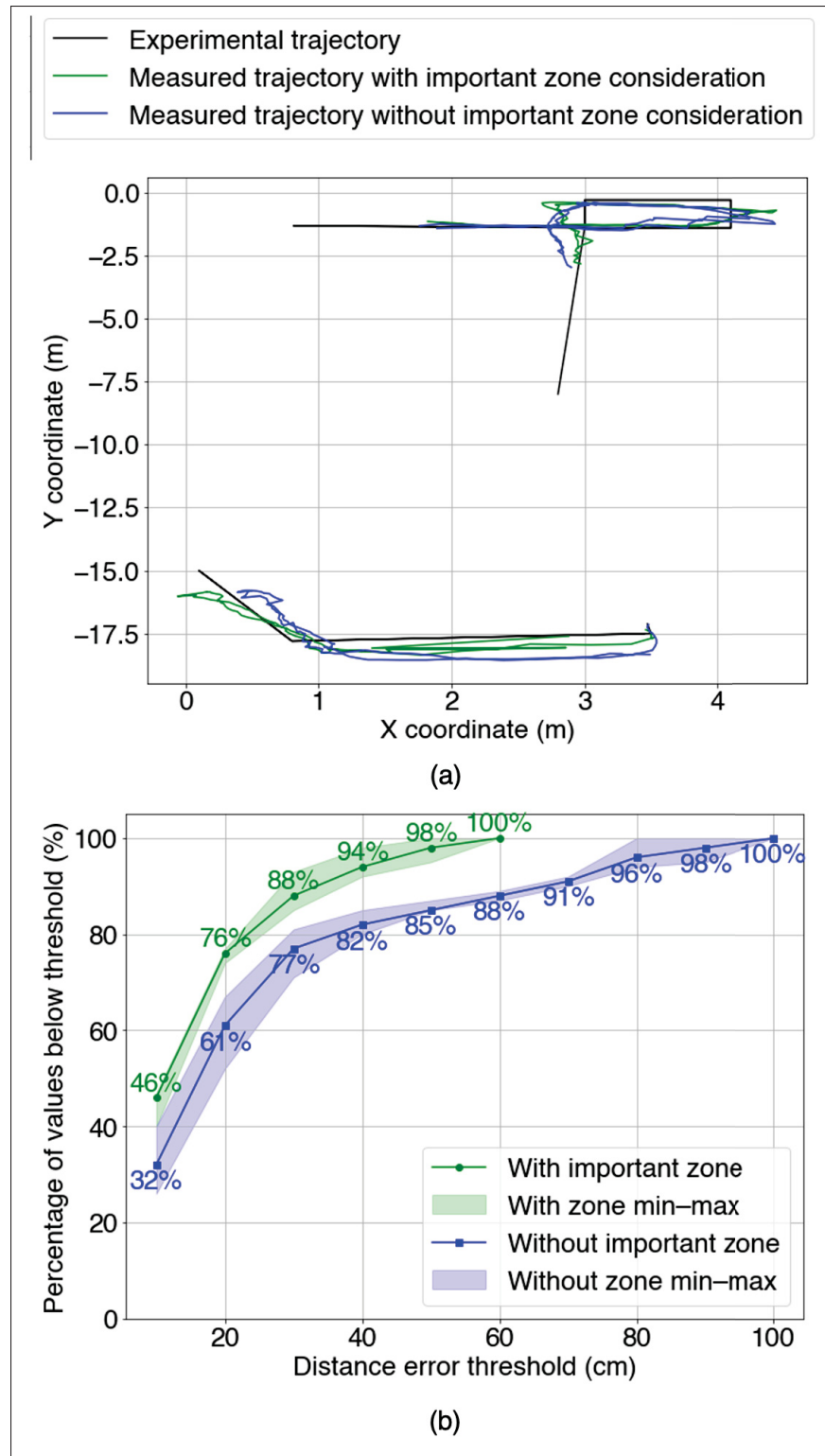


Figure 4.17 (a) Comparison of trajectories followed by the UWB multilateration operator with and without consideration of zones of importance. (b) Distribution of result errors with and without consideration of zones of importance in the optimization

The zone-focused optimization led to a reduction in the number of anchors from 10 to 9. The HDOP heatmaps, presented in Fig. 4.16c, confirm these observations : while HDOP values were generally uniform in the full-area case, they were significantly lower within the zones of interest when prioritization was applied (often below 1.5, with local minima around 1.1).

The resulting trajectories are presented in Fig. 4.17a. Clear differences were observed in the critical zones, characterized by the presence of multiple obstacles likely to disrupt UWB measurements. In particular, near $x = 0$ and $x = 3$, localization was more consistent and closely followed the reference trajectory when the zones of importance were considered. HDOP maps showed values below 2.0 in all prioritized zones, and the error histogram revealed an improvement in measurement precision.

The statistical analysis supporting these findings is presented in Fig. 4.18.



Figure 4.18 Statistical comparison of both optimization with and without critical zones consideration

Similarly, the incorporation of zone prioritization led to a marked improvement in localization accuracy. The average error dropped from $24.51.7cm$ to $14.70.8cm$, with statistical analysis confirming the significance of this reduction ($p < 0.001$).

Overall, the experimental results confirm the effectiveness of a targeted approach to optimizing UWB anchor placement. By focusing on critical areas defined by their geometric complexity and obstacle density, it is possible to significantly enhance localization accuracy while minimizing the number of anchors required. This strategy not only reduces installation costs but also allows for system adaptability to the specific constraints of each application. Such adaptability supports the development of scalable and intelligent localization networks capable of meeting the evolving demands of industrial environments.

4.5 Discussion

4.5.1 Influence of Obstacle Materials on Localization Accuracy

The experimental evaluation of UWB distance measurements through various industrial materials confirmed that metallic obstacles significantly degrade localization accuracy, in line with previous findings on UWB signal propagation in NLOS conditions (Miram *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023). In particular, galvanized steel introduced errors exceeding one meter, primarily due to its high conductivity and smooth surface, which intensify signal reflection and multipath propagation. This effect is consistent with the known electromagnetic properties of metallic materials, which tend to reflect a larger portion of the signal energy, increasing multipath effects and reducing measurement precision. Notably, the smoother surface of galvanized steel may further amplify this phenomenon compared to carbon steel.

In contrast, plastic materials such as HDPE had a minimal effect on distance estimation. These materials allow better transmission through the obstacle, resulting in reduced signal distortion. These observations underline the importance of integrating material-specific electromagnetic properties into anchor placement strategies, especially in cluttered factory environments where

metallic obstacles are common. Modeling signal attenuation and refraction based on obstacle type enables more realistic predictions of UWB performance and thus supports more effective anchor deployment.

4.5.2 Trade-Off Between Coverage and Deployment Cost

The optimization results across multiple synthetic environments revealed that the number of anchors required is influenced not only by the area to cover, but more critically by the density and layout of obstacles. Internal walls and equipment introduce signal occlusion, which reduces coverage and increases HDOP, ultimately requiring more anchors to maintain acceptable accuracy levels.

This finding highlights a fundamental trade-off between deployment cost, directly linked to the number of anchors, and localization performance. In complex industrial environments, achieving a high level of positioning accuracy often necessitates increased infrastructure density, which can significantly raise deployment and maintenance costs. For instance, doubling the number of anchors in obstructed environments like Environment F (Fig. 9) is necessary to maintain similar levels of coverage and HDOP as in obstacle-free conditions.

These trade-offs are particularly critical in cost-sensitive industrial applications, where budgets may constrain the number of deployable anchors. As highlighted by Zafari *et al.* (2019), localization system design must often balance technical performance with practical and economic considerations, especially in large-scale indoor settings. Therefore, anchor placement must consider obstacle-induced signal degradation while optimizing both accuracy and cost-effectiveness.

4.5.3 Benefits of Context-Aware Optimization in Industry

The experimental validation of anchor placement strategies in a real factory environment confirmed the practical benefits of integrating contextual information, such as obstacle locations and critical work areas, into the localization system design.

One key insight is that modeling obstacles based on their physical and material properties allows the algorithm to anticipate signal degradation in obstructed areas. This leads to more robust anchor placements that maintain localization accuracy in challenging conditions, especially in zones where metallic equipment causes NLOS propagation. In the obstacle-aware configuration, the localization error was reduced by 10cm on average, and the proportion of points below a 50cm error threshold improved by over 10 percentage points. Such improvements are particularly significant in industrial operations involving human safety or time-sensitive tasks.

Equally important is the ability to define and optimize zones of importance, i.e., areas where accurate localization is critical to operational success, such as during maintenance, LOTO procedures, or equipment monitoring. By focusing anchor placement in these targeted zones, the system ensures high geometric precision ($HDOP < 1.5$) where needed, while allowing less accurate coverage elsewhere. In our experiments, this zone-based optimization reduced the total number of anchors without compromising performance in critical areas.

This selective deployment is highly relevant for industrial applications, where full-area coverage is often unnecessary or economically inefficient. Rather than uniformly maximizing accuracy, context-aware optimization supports a functional compromise : achieving high precision where required, and reducing infrastructure cost in less critical areas. This approach is aligned with lean engineering principles and offers a scalable model for gradual deployment in large or complex facilities.

From a practical standpoint, this also improves system maintainability and adaptability. As operational constraints evolve (e.g., changes in layout, equipment relocation), the optimization process can be rerun with updated constraints, enabling the system to remain effective without full reinstallation. In addition, the use of a hybrid optimization algorithm that combines coverage and geometric criteria makes the method flexible and compatible with a variety of localization performance goals.

More broadly, this work contributes to the emerging vision of smart industrial environments under the Industry 5.0 paradigm, where human-centric, adaptive technologies enhance safety

and efficiency without imposing excessive technical or financial burden. Context-aware anchor placement offers a concrete example of such a system, by adapting to the workspace rather than forcing the workspace to adapt to the system.

4.5.4 Limitations and Future Directions

While the proposed hybrid optimization algorithm demonstrates promising results, several limitations must be acknowledged. First, the method assumes static environments ; changes in obstacle positions or material composition may require re-optimization. Second, the modeling of signal attenuation and refraction remains simplified and may not fully capture the complex electromagnetic interactions occurring in dense factory environments.

Future work will explore the integration of dynamic obstacle modeling and real-time anchor adaptation, potentially supported by intelligent sensing or machine learning. Additionally, combining physical anchor optimization with software-based error correction techniques, such as particle filters or deep learning-based NLOS mitigation, could further enhance robustness and accuracy.

Extending the methodology to multi-level industrial spaces, including staircases or mezzanines, also represents a valuable research direction, particularly given the limitations observed in elevation handling during preliminary tests

4.6 Conclusion

This study has highlighted the decisive influence of materials and obstacles on the accuracy of UWB distance measurements and on the optimization of anchor placement within industrial environments. Specifically, explicitly incorporating obstacles into the optimization process reduced the average localization error from 33 cm to 23 cm, representing a 30% improvement. This gain in precision is particularly relevant for industrial automation applications, such as autonomous drone or mobile robot guidance, where reliable localization is essential for smooth operation and infrastructure safety.

The proposed optimization approach enables dynamic adaptation of anchor configurations to the spatial complexity of the environment and the nature of obstacles, while balancing coverage, geometric precision (HDOP), and installation cost. By identifying critical zones, the strategy allows prioritization of optimization efforts in areas where precise localization is truly necessary. This is especially important in LOTO procedures, which focus on fixed equipment often located within confined spaces such as electrical cabinets or control stations. In this context, aiming for global coverage would be costly and inefficient, whereas targeted optimization reduces the number of anchors while improving accuracy in key zones.

These findings open several promising research directions. Developing adaptive models that respond to environmental changes (e.g., equipment movement, temporary obstacles) would be a major step towards scalable deployments. Integrating machine learning techniques or intelligent sensors capable of real-time spatial configuration detection could enable automatic adjustment of the localization network. Finally, testing in even more complex settings, such as multi-level or highly dynamic environments, would strengthen the model's robustness and support hybrid strategies that combine optimized physical anchor placement with software error correction for demanding industrial localization applications.

In conclusion, this study underscores the importance of a context-aware, optimized approach to deploying UWB localization systems in industrial environments. By considering environmental factors, including the geometry of the space and the distribution of critical zones, this approach ensures reliable positioning while minimizing infrastructure

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge CONFORMiT, Cascades, and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and Mitacs through the Alliance and Accelerate programs, respectively, for their financial support. The authors also wish to thank Michel Prévile from Cascades, as well as the teams at Cascades and CONFORMiT, for their valuable support and insightful discussions throughout this work.

CHAPITRE 5

CONCEPTION ET INTÉGRATION D'UNE SOLUTION DE GUIDAGE PAR LOCALISATION EN INTÉRIEUR POUR LE CADENASSAGE/DÉCADENASSAGE

5.1 Introduction

Après avoir étudié les contraintes techniques liées à l'utilisation de l'UWB en environnement industriel et analysé l'impact des obstacles sur la précision de localisation, ce chapitre s'attache à la valorisation concrète de ces résultats à travers le développement d'une application dédiée au guidage des opérateurs dans le cadre du procédé de C/D.

Cette application vise à répondre à un double objectif. D'une part, exploiter les performances de localisation obtenues afin d'assister les opérateurs dans leurs déplacements et leurs actions, et d'autre part, renforcer la sécurité et la traçabilité du procédé grâce à l'intégration de fonctionnalités spécifiques. Elle combine ainsi plusieurs modules complémentaires, algorithmes de positionnement, guidage pas-à-pas, prise de preuves visuelles et enregistrement géolocalisé des interventions.

Ce chapitre présente donc la conception, l'architecture et les principales fonctionnalités de cette application, en soulignant son apport opérationnel et son potentiel de déploiement dans un contexte industriel réel.

5.2 Limites actuelles du procédé de Cadenassage/Décadenassage (C/D)

Le procédé de cadenassage/ décadenassage (C/D), bien qu'essentiel pour prévenir les accidents pouvant survenir lors des phases de maintenance, présente encore aujourd'hui plusieurs limites dans son application concrète en milieu industriel. Ce procédé, régi notamment par la norme CSA Z460-13, est reconnu pour sa robustesse théorique. Toutefois, sa mise en œuvre sur le terrain est confrontée à des défis opérationnels et humains qui compromettent parfois son efficacité.

L'un des premiers obstacles identifiés concerne les erreurs humaines, qui peuvent survenir à différentes étapes du procédé. Ces erreurs sont souvent liées à une compréhension partielle

ou incorrecte de la procédure par les opérateurs, ou à une application incomplète des étapes prescrites. Plusieurs études, (Illankoon *et al.*, 2019), mettent en lumière que ces défaillances peuvent avoir des conséquences graves sur la sécurité des travailleurs. Par ailleurs, le turnover important des employés constitue une autre limite majeure. Ce renouvellement fréquent du personnel entraîne une perte de connaissance tacite du site industriel, notamment en ce qui concerne la localisation précise des composants à cadenasser. Ce déficit de connaissance se traduit par une augmentation du temps nécessaire pour localiser les composants, mais aussi par un besoin accru en formations régulières, ce qui alourdit la charge organisationnelle et financière pour les entreprises.

Une autre faiblesse critique du procédé réside dans la création manuelle des fiches de cadenassage. Ce processus repose généralement sur une expertise humaine centralisée, souvent assurée par un nombre restreint de personnes qualifiées. Or, cette responsabilité importante ralentit considérablement la création et la validation des fiches, tout en introduisant un risque d'erreur ou d'oubli. De plus, la traçabilité des opérations de C/D reste souvent insuffisante : les informations concernant les équipements cadenassés, les opérateurs impliqués, ou l'état d'avancement du procédé ne sont pas systématiquement consignées ou historisées. Cette absence de traçabilité pose un double problème : d'une part, elle empêche une analyse a posteriori des incidents ou des inefficacités du système ; d'autre part, elle limite la capacité à renforcer la sécurité en temps réel, par exemple en confirmant la pose effective d'un cadenas sur le bon composant, ou en créant dynamiquement des zones de sécurité/danger dans l'usine. Or, de telles informations, si elles étaient disponibles en temps réel, pourraient être utilisées pour prévenir les erreurs et alerter les superviseurs avant qu'un risque ne se concrétise.

Enfin, une problématique transversale réside dans le manque d'actualisation des bases de données liées aux équipements et aux points de cadenassage. Dans de nombreuses usines, ces données ne sont pas centralisées ni tenues à jour de manière rigoureuse, en particulier lorsqu'un composant est déplacé, remplacé ou retiré. L'absence de mise à jour automatisée constitue un frein à l'implémentation de solutions intelligentes fondées sur ces données, et expose les travailleurs à des procédures obsolètes.

Plusieurs auteurs ont proposé des approches innovantes pour pallier ces lacunes. Par exemple, Victor Delpla a développé une méthode de génération automatique de fiches de cadenassage assistée par intelligence artificielle (Delpla *et al.*, 2022). Toutefois, bien que prometteuse, cette méthode ne permet pas encore une automatisation complète du procédé, en raison d'un manque de précision dans la génération des fiches – une limite critique lorsqu'il s'agit de garantir la sécurité des opérateurs. Ce même auteur a également proposé une optimisation de la fusion des fiches, en tenant compte des précédences d'intervention et de la disposition spatiale des équipements, dans le but de réduire les déplacements et de faciliter l'ordonnancement des opérations. Cependant, l'implémentation de cette approche demeure très limitée, notamment à cause du manque de fiabilité des bases de données existantes et de l'absence fréquente de positions géoréférencées des composants.

D'autres travaux, (Kumar & Tauseef, 2021), ont exploré l'usage de cadenas connectés pouvant être actionnés à distance pour automatiser certaines étapes du verrouillage. Bien que les résultats présentés dans leur étude démontrent un gain en rapidité et en traçabilité, ce type de solution rencontre une forte résistance de la part des opérateurs. En effet, la confiance dans le procédé C/D repose historiquement sur un geste physique, où chaque travailleur sécurise lui-même un équipement en apposant un cadenas identifiable et unique. La délégation de cette tâche à un système automatisé remet en question cette pratique établie et soulève des préoccupations sur la vérifiabilité de la fermeture effective du cadenas.

Ainsi, toute innovation technologique dans le domaine du cadenassage doit impérativement renforcer la sécurité, tout en préservant la confiance des opérateurs. La technologie ne doit pas se substituer brutalement aux pratiques en place, mais plutôt accompagner leur évolution en douceur, en apportant des outils de vérification, de traçabilité, et de facilitation du processus.

Dans cette optique, la localisation en intérieur — et en particulier l'utilisation de la technologie UWB (Ultra WideBand) — représente une opportunité stratégique. Elle permettrait de soutenir les opérateurs dans leurs déplacements, de vérifier leur présence au bon endroit au bon moment, et de documenter chaque étape du procédé. En apportant des données de position précises et

temps réel, cette technologie pourrait répondre à plusieurs des limitations identifiées et ouvrir la voie à un C/D plus sûr, plus fluide et plus transparent.

5.3 Utilisation de la localisation en intérieur pour améliorer le procédé de Cadenassage/Décadenassage

L'utilisation de la localisation en intérieur s'inscrit comme une réponse directe à plusieurs des contraintes identifiées dans la section précédente. En intégrant des technologies de positionnement en temps réel, il devient possible de cartographier l'usine avec une précision suffisante pour visualiser non seulement la disposition des équipements à cadenasser, mais également la position des opérateurs à chaque instant. Cette connaissance fine de la localisation ouvre la voie à des améliorations significatives, tant sur le plan de la sécurité, que sur ceux de la traçabilité, de la confiance et de la maintenance des bases de données.

5.3.1 Sécurité et supervision en temps réel

Le premier bénéfice de la localisation concerne la sécurité des opérateurs. En effet, le suivi de leur position dans l'espace industriel permet d'alerter en cas d'intrusion dans une zone considérée comme dangereuse, comme un périmètre non sécurisé ou une zone où un cadenassage n'a pas encore été effectué. De plus, au moment du cadenassage, la vérification de la présence physique de l'opérateur à proximité immédiate du composant à isoler ajoute une couche de sécurité opérationnelle. Elle permet de garantir que l'action est bien réalisée sur l'équipement concerné et non sur un autre situé à proximité.

5.3.2 Traçabilité renforcée et mise à jour automatisée des bases de données

Au-delà de la sécurité, la traçabilité du procédé de C/D constitue un axe majeur d'amélioration rendu possible par la géolocalisation. En enregistrant à la fois la position de l'opérateur et le moment de l'action, il devient possible de générer automatiquement un historique géolocalisé des opérations. Chaque étape — de l'approche d'un composant à sa consignation — peut ainsi être documentée sans effort supplémentaire pour l'opérateur.

De plus, cette localisation permet d'alimenter et de maintenir à jour la base de données des composants à cadenasser. Lorsqu'un opérateur signale avoir posé un cadenas sur un équipement, l'application enregistre simultanément sa position géographique, ce qui permet de lier une position réelle à un équipement physique. Cette démarche vise à pallier le manque de rigueur actuel dans le suivi des bases de données, souvent actualisées manuellement et de façon ponctuelle.

5.3.3 Protocole de communication et architecture technique

Le système de localisation repose sur la technologie Ultra WideBand (UWB), choisie pour sa précision centimétrique en environnement intérieur complexe. Chaque opérateur est équipé d'un badge ou d'un module UWB, dont la position est déterminée par multilatération à partir de signaux échangés avec plusieurs ancres UWB réparties dans l'environnement. Ces coordonnées sont ensuite transmises via une connexion Wi-Fi à la tablette de l'opérateur, à une fréquence d'environ une position par seconde, assurant un suivi fluide et réactif. Les protocoles de communications sont résumés dans les figures 5.1 et 5.2.

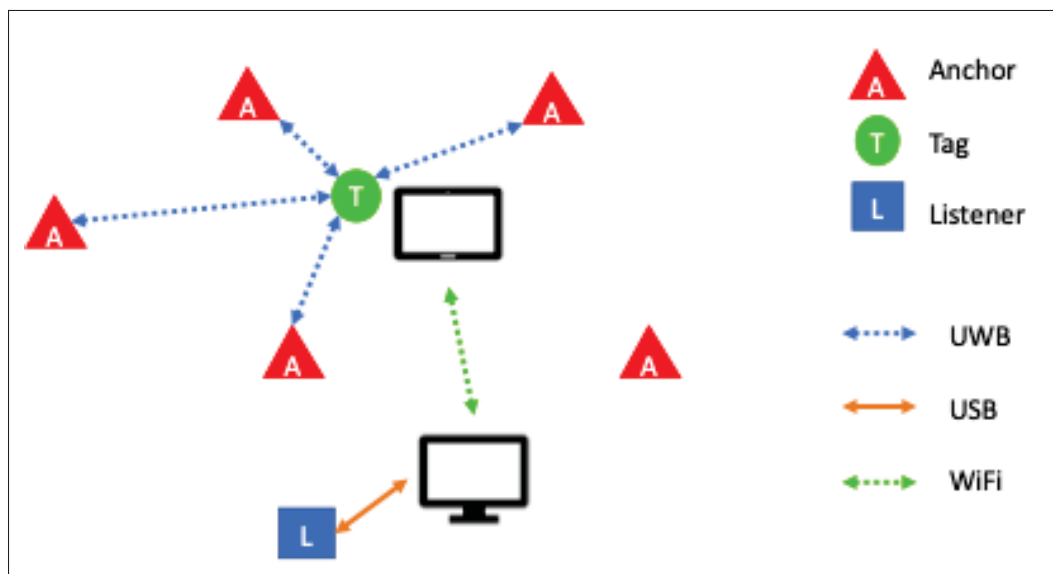


Figure 5.1 Schéma du protocole de communication entre les balises UWB l'opérateur et la tablette actuelle

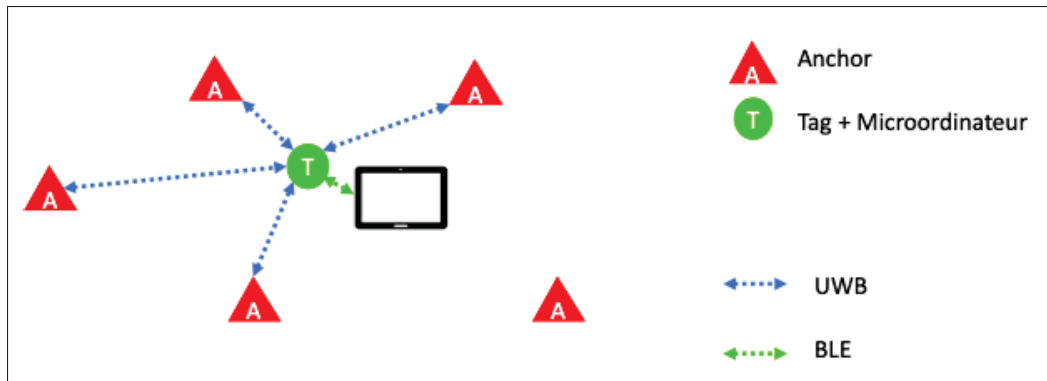


Figure 5.2 Schéma du protocole de communication entre les balises UWB l'opérateur et la tablette souhaitée

5.3.4 Fonctionnalités de l'application développée

L'application mobile développée dans le cadre de ce mémoire propose une amélioration substantielle des solutions existantes, telles que celle proposée par CONFORMiT, qui permettait déjà de valider certaines étapes du cadenassage via un téléphone mobile afin de limiter l'usage du papier. Notre application va plus loin en intégrant des fonctionnalités de localisation, de guidage visuel, de vérification par l'image, et de mise à jour dynamique de la base de données. Des visuels sont présentés dans les figures 5.3 et 5.4. Ses fonctionnalités principales sont les suivantes :

- Guidage de l'opérateur vers le composant à cadenasser, grâce à une interface visuelle inspirée de la technologie « LiveView », facilitant le repérage spatial rapide.

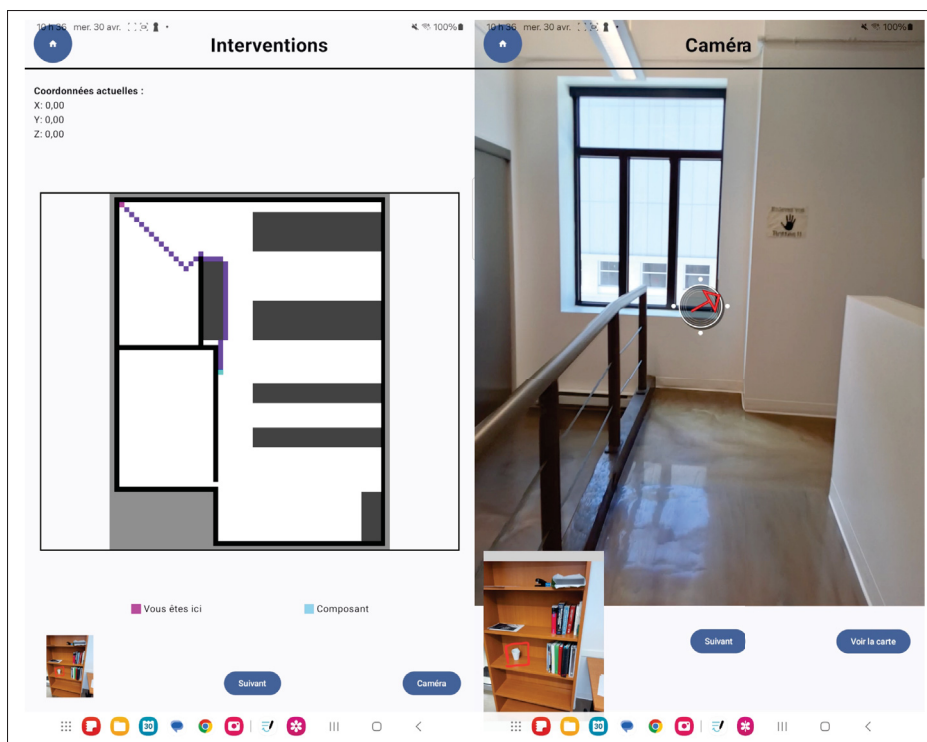


Figure 5.3 Image de la fonctionnalité guider les opérateurs sur l'application

- Prise de photo du composant avant cadenassage, pour s'assurer de l'identification correcte.
- Enregistrement automatique de la position lors de la pose du cadenas, permettant de valider spatialement l'opération.

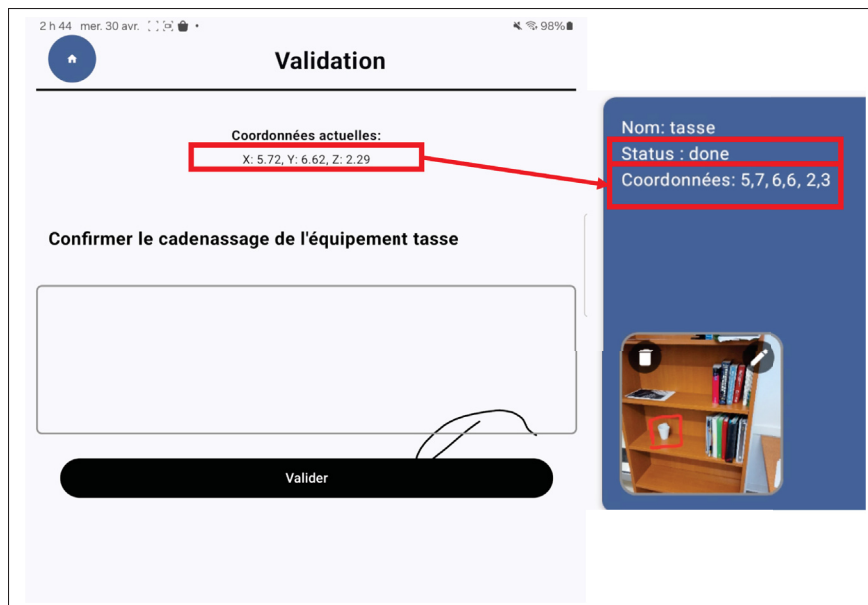


Figure 5.4 Enregistrement de la position du composant via l'application

- Prise de photo après cadenassage, assurant une preuve visuelle que le bon équipement a bien été sécurisé.
- Archivage des données de position et d'image, renforçant la traçabilité et permettant à d'autres membres de l'équipe (ex. : responsable maintenance) de vérifier que l'opération a été réalisée conformément aux procédures.

Ces fonctionnalités répondent directement aux problématiques identifiées :

- Elles réduisent la charge de travail des opérateurs en automatisant une partie de la documentation.
- Elles renforcent la confiance entre les équipes, en rendant visible et vérifiable chaque action.
- Elles facilitent l'apprentissage des nouveaux opérateurs, qui peuvent se repérer plus facilement dans l'usine.
- Elles structurent la base de données en continu, sans nécessiter une intervention manuelle supplémentaire.

5.3.5 Détails techniques et méthodologiques

Les algorithmes de recherche de chemin, utilisés pour guider les opérateurs depuis leur position actuelle vers les composants à cadenasser, ainsi que ceux d'enregistrement et de structuration des données (photos, positions, timestamps), sont détaillés en annexe.

5.4 Limites actuelles de l'application développée

À ce stade de développement, l'application mobile conçue dans le cadre de ce mémoire n'a pas encore fait l'objet d'une validation expérimentale en contexte industriel réel. Cette absence de déploiement opérationnel constitue une limite importante, à la fois pour l'évaluation de son efficacité concrète et pour l'analyse de son acceptabilité par les utilisateurs finaux.

L'essai terrain apparaîtra comme une étape indispensable pour mesurer :

- La pertinence de l'interface de guidage dans des conditions réelles de travail
- La précision effective du système UWB dans un environnement industriel complexe
- La réaction des opérateurs face à l'outil (adhésion, résistance, suggestions d'amélioration)
- Les apports concrets sur le temps d'exécution, la traçabilité et la sécurité du procédé.

Une autre limite technique identifiée concerne la nécessité d'une connexion stable entre les équipements UWB et la tablette utilisée par l'opérateur. Or, certaines zones industrielles, notamment les zones confinées, éloignées ou exposées à des interférences électromagnétiques, ne garantissent pas toujours la stabilité ni la disponibilité du signal Wi-Fi ou d'une couverture réseau suffisante pour assurer une synchronisation fluide. Cette contrainte pourrait limiter l'usage de l'application dans certaines situations ou nécessiter l'intégration d'un mode de fonctionnement hors ligne ou local, à étudier dans les développements futurs.

Enfin, comme pour toute technologie émergente, l'adoption à grande échelle dépendra également de facteurs humains, culturels et organisationnels, qu'il conviendra d'étudier à travers une approche terrain (entretiens, tests utilisateurs, observation participante, etc.).

5.5 Conditions essentielles au bon fonctionnement du système

Pour garantir une utilisation pérenne et efficace de l'application dans un contexte industriel réel, plusieurs conditions techniques et organisationnelles doivent être réunies.

5.5.1 Infrastructure de localisation

L'élément fondamental réside dans la mise en place d'un système de positionnement intérieur fiable, basé sur la technologie UWB. Cela implique :

- La cartographie précise du site industriel
- L'installation de balises UWB (ancres) aux emplacements stratégiques
- Une calibration initiale du système pour assurer une couverture homogène et une précision suffisante sur l'ensemble des zones concernées.

Sans cette infrastructure de localisation, les fonctionnalités de guidage, de traçabilité et de mise à jour géolocalisée ne peuvent être activées de manière pertinente.

5.5.2 Dispositifs de capture d'information

L'autre prérequis essentiel concerne la capacité de l'opérateur à documenter chaque opération via des prises de vue et des enregistrements de position. Cela suppose que chaque terminal mobile (tablette ou téléphone professionnel) soit équipé :

- D'un appareil photo permettant la capture rapide de l'état d'un composant avant et après cadenassage
- D'un module de communication intégré avec le système UWB pour localiser l'opérateur au moment de chaque action.

Ces informations combinées d'image, de position et du timestamp, assurent une traçabilité complète et fiable du procédé, en renforçant à la fois la conformité réglementaire, la responsabilisation des intervenants, et la prévention des erreurs humaines.

5.5.3 Maintien dynamique de la base de données

Enfin, pour que le système conserve sa pertinence dans le temps, il est indispensable de mettre en place une stratégie de mise à jour continue de la base de données. Chaque nouvelle opération de cadenassage constitue une opportunité de valider ou corriger les données existantes ; d'ajouter de nouveaux composants non encore référencés ; d'améliorer la qualité des photos et des métadonnées associées.

Ce fonctionnement adaptatif transforme l'application en un outil évolutif de capitalisation des connaissances, aligné avec les principes de l'industrie 5.0.

5.6 Conclusion

Le développement de l'application présentée dans ce chapitre illustre la concrétisation des résultats obtenus tout au long de ce mémoire. En intégrant les algorithmes de localisation UWB et les enseignements tirés des expérimentations sur l'impact des obstacles et des matériaux, cette solution met en œuvre une assistance opérationnelle directement orientée vers les besoins du procédé de C/D. Elle permet non seulement de guider l'opérateur dans ses déplacements et dans l'exécution des tâches, mais également d'assurer une traçabilité complète et documentée grâce à la géolocalisation et à la prise de preuves visuelles.

L'application constitue ainsi une étape clé, démontrant que la localisation en intérieur, lorsqu'elle est optimisée et adaptée au contexte industriel, peut dépasser le simple suivi de position pour devenir un véritable outil d'aide à la décision et de sécurisation des opérations. Elle illustre l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire, croisant les aspects technologiques, organisationnels et ergonomiques pour répondre aux exigences industrielles de sécurité et d'efficacité.

Cependant, cette première version comporte certaines limites qui ouvrent des perspectives d'amélioration. L'ergonomie de l'interface, la robustesse du système en conditions réelles, ou encore l'intégration de mécanismes d'alerte et de supervision centralisée représentent des axes de développement futurs. Une évaluation approfondie auprès des opérateurs en environnement industriel réel sera également indispensable afin de valider la pertinence fonctionnelle, l'acceptabilité et l'impact sur les pratiques de terrain.

En somme, cette application démontre la faisabilité et l'intérêt d'un déploiement de solutions basées sur l'UWB pour améliorer la sécurité et l'efficacité des procédés industriels sensibles, tout en ouvrant la voie à des évolutions technologiques et organisationnelles qui pourront être explorées dans le cadre de travaux futurs.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le processus de C/D, bien qu'essentiel pour la sécurité des opérateurs, présente encore plusieurs axes d'amélioration, notamment en ce qui concerne les erreurs humaines, les difficultés de localisation précise, la traçabilité limitée et l'accès restreint aux informations mises à jour. Afin de répondre à ces défis, les études menées dans ce mémoire ont permis d'explorer de manière approfondie l'apport de l'intégration de la technologie de localisation par UWB dans le procédé de C/D en environnement industriel. Ce travail propose une approche innovante, combinant analyse expérimentale, optimisation algorithmique et développement d'un logiciel embarqué.

Dans un premier temps, nous avons étudié la viabilité technique de cette technologie à travers une étude expérimentale réalisée dans un bâtiment industriel à plusieurs étages. Cette étude a mis en évidence la complexité des conditions réelles de déploiement de la technologie UWB. Nous avons démontré que la détection dans des environnements multi-étages, la présence d'obstacles matériels, la nature des matériaux de construction (notamment le béton armé et les équipements métalliques), la configuration géométrique des lieux, ainsi que les interférences électromagnétiques influencent fortement la qualité des mesures et des trajectoires enregistrées par l'UWB (chapitre 3). Ces résultats soulignent la nécessité d'une réflexion approfondie sur le positionnement des ancres pour garantir un niveau de précision suffisant et compatible avec les exigences des procédures de sécurité.

Nous avons donc développé un modèle de simulation prenant en compte la géométrie du site, les matériaux et les zones sensibles, afin de mieux définir les paramètres influençant l'optimisation du placement des ancres. Cette approche a permis d'identifier des configurations d'implantation plus efficaces, garantissant à la fois une couverture suffisante et une réduction des biais liés aux situations NLOS.

Dans ce modèle, des simulations numériques ont été réalisées pour tester la précision et la robustesse de cette technologie. Elles ont montré que la présence d'obstacles, notamment ceux

composés de matériaux réfléchissants ou absorbants, peut induire des biais systématiques dans les distances mesurées. En intégrant ces obstacles dans nos simulations, nous avons réduit l'erreur moyenne de localisation d'environ 30%. De plus, l'optimisation des zones critiques a permis de réduire l'erreur moyenne de localisation de 24,5 cm à 14,7 cm dans notre modèle, soit un gain de 45% (chapitre 4). Ces résultats confirment que, même dans des conditions dégradées, la technologie UWB peut atteindre une précision suffisante pour répondre aux exigences du C/D.

Enfin, la dernière partie de ce travail a porté sur le développement d'une application logicielle permettant de mettre en œuvre l'approche proposée directement sur le terrain. Cette application a été conçue pour assister les opérateurs dans les procédures de C/D, en intégrant en temps réel les données de localisation UWB permettant une détection précise des composants à cadenasser et une traçabilité des interventions. Les tests réalisés ont permis d'évaluer la répétabilité du positionnement de l'opérateur avec l'application (chapitre 5).

En conclusion, ce mémoire démontre que l'intégration de la technologie UWB dans le procédé de C/D, combinée à un logiciel d'assistance, constitue une approche innovante capable de répondre aux limitations actuelles du C/D. Les résultats expérimentaux et les simulations montrent que la prise en compte des obstacles et des zones critiques permet d'améliorer la précision de localisation, de renforcer la sécurité des opérateurs et de faciliter la traçabilité des interventions, offrant ainsi une solution prometteuse pour l'industrie 5.0.

Suite à ce travail, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour poursuivre l'intégration de la technologie UWB et de l'application logicielle au procédé de C/D.

En perspective, il serait essentiel de valider la robustesse, l'ergonomie et la pertinence fonctionnelle de l'application dans un contexte industriel réel. Une telle validation devrait inclure une phase d'expérimentation sur site et impliquer directement les opérateurs afin de recueillir leur retour d'expérience. Leurs avis permettraient d'identifier les améliorations

nécessaires en matière d'interface, de fonctionnalités et d'intégration aux pratiques quotidiennes, tout en s'assurant que l'outil réponde véritablement aux besoins du terrain.

Par ailleurs, certaines fonctionnalités supplémentaires pourraient renforcer la sécurité et la fiabilité du système. L'ajout de preuves visuelles de cadenassage, par exemple à travers des captures ou enregistrements confirmant la bonne exécution des étapes, constituerait une garantie supplémentaire dans le suivi des interventions. De plus, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour vérifier automatiquement que le bon composant a été cadenassé représenterait une avancée significative. Une telle approche permettrait de réduire les risques d'erreurs humaines et d'accroître la confiance des opérateurs et gestionnaires dans la fiabilité du procédé.

Ces recommandations peuvent se décliner selon trois axes principaux :

1. Validation en contexte industriel réel : tester l'application dans un environnement industriel afin d'évaluer sa robustesse, son ergonomie et sa pertinence fonctionnelle.
2. Prise en compte du retour des opérateurs : impliquer les utilisateurs finaux dans l'évaluation de l'outil pour identifier les améliorations nécessaires et garantir son adoption sur le terrain.
3. Ajout de fonctionnalités avancées : intégrer des preuves visuelles de cadenassage et développer des modules d'intelligence artificielle capables de vérifier automatiquement la conformité des opérations réalisées.

Enfin, ces pistes de recherche futures visent à renforcer la pertinence et l'adoption industrielle de la solution proposée. Elles ouvrent la voie à une application plus complète, capable de combiner précision technologique, ergonomie et sécurité, tout en s'intégrant de manière fluide aux environnements industriels complexes.

BIBLIOGRAPHIE

- Alam, M., Islam, M. R. & Shil, S. K. (2023). AI-Based predictive maintenance for US manufacturing : reducing downtime and increasing productivity. *International Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations*, 1(01), 541–567.
- Almutairi, R., Albeladi, Z. & Elrashidi, A. (2022). Assessment of Health and Safety Hazards Affecting Workers at Saline Water Conversion Corporation Lathe Workshop. *International Conference on Business and Technology*, pp. 824–837.
- Andrews, Z. C. & Ngo, D. T. (2024). New wireless beacon deployment for maximum coverage efficiency in indoor localization. *IEEE Sensors Letters*, 8(2), 1–4.
- Barral, V., Escudero, C. J., García-Naya, J. A. & Maneiro-Catoira, R. (2019). NLOS identification and mitigation using low-cost UWB devices. *Sensors*, 19(16), 3464.
- Boyle, A. & Tolentino, M. E. (2022). Localization within hostile indoor environments for emergency responders. *Sensors*, 22(14), 5134.
- Braglia, M., Di Donato, L., Frosolini, M., Gabbriellini, R., Marrazzini, L., Padellini, L. et al. (2021). Critical assessment of the technical standards and regulations about the energy isolation and unexpected start-up in machineries. *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference, Angers*, pp. 19–23.
- Bulzacchelli, M. T., Vernick, J. S., Sorock, G. S., Webster, D. W. & Lees, P. S. (2008). Circumstances of fatal lockout/tagout-related injuries in manufacturing. *American journal of industrial medicine*, 51(10), 728–734.
- Çınar, Z. M., Abdussalam Nuhu, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M. & Safaei, B. (2020). Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0. *Sustainability*, 12(19), 8211.
- Coelho, P., Bessa, C., Landeck, J. & Silva, C. (2023). Industry 5.0 : The arising of a concept. *Procedia Computer Science*, 217, 1137–1144.
- De Cock, C., Tanghe, E., Joseph, W. & Plets, D. (2023). Robust IMU-Based mitigation of human body shadowing in UWB indoor positioning. *Sensors*, 23(19), 8289.
- Delpla, V. (2024). *Stratégies d'intégration du processus de cadenassage/décadenassage en production manufacturière intelligente : vers la santé, sécurité et environnement (SSE) 4.0*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure).

- Delpla, V., Chapron, K., Kenné, J.-P. & Hof, L. (2022). Towards intelligent manufacturing system safety strategies : generating LockOut/TagOut sheets by Machine Learning—a case study. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1001–1006.
- Delpla, V., Kenné, J.-P. & Hof, L. A. (2023). Integration of operational lockout/tagout in a joint production and maintenance policy of a smart production system. *International Journal of Production Economics*, 263, 108925.
- Dewi, L. T. (2018). Investigation of Lockout/Tagout procedure failure in machine maintenance process. *Jurnal Teknik Industri : Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik Industri*, 20(2), 135–140.
- Dong, M., Liu, Y. & Zhang, Y. (2023). Multi-classification of ultra-wideband non-line-of-sight ranging signals using deep learning. *2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)*, pp. 937–941.
- du Digital, L. R. (2017). Enedis crée un cadenas connecté pour sécuriser les interventions sous haute tension. Repéré le 2017-10-27 à <https://www.larevuedudigital.com/enedis-cree-un-cadenas-connecte-pour-securiser-les-interventions-sous-haute-tension/>.
- Dubuc, M. (2021). Les coûts réels d'un accident de travail [Format]. Repéré à <https://www.ohs.lifeworks.com/les-couts-reels-d-un-accident-de-travail>.
- Duong, L. N., Al-Fadhli, M., Jagtap, S., Bader, F., Martindale, W., Swainson, M. & Paoli, A. (2020). A review of robotics and autonomous systems in the food industry : From the supply chains perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 355–364.
- Emami-Mehrgani, B., Nadeau, S. & Kenné, J.-P. (2011). Lockout/tagout and operational risks in the production control of manufacturing systems with passive redundancy. *International Journal of Production Economics*, 132(2), 165–173.
- Emami-Mehrgani, B., Kenné, J.-P. & Nadeau, S. (2013). Lockout/tagout and optimal production control policies in failure-prone non-homogenous transfer lines with passive redundancy. *International Journal of Production Research*, 51(4), 1006–1023.
- Falque, R., Patel, M. & Biehl, J. (2018). Optimizing placement and number of RF beacons to achieve better indoor localization. *2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pp. 2304–2311.
- Famili, A., Stavrou, A., Wang, H. & Park, J.-M. (2024). Optilod : Optimal beacon placement for high-accuracy indoor localization of drones. *Sensors*, 24(6), 1865.

- Giraud, L., Ait-Kadi, D., Ledoux, É., Paques, J.-J. & Tanchoux, S. (2008). La maintenance : état de la connaissance et étude exploratoire.
- Gu, Y., Lo, A. & Niemegeers, I. (2009). A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 11(1), 13–32.
- Hapsari, G. I., Munadi, R., Erfianto, B. & Irawati, I. D. (2024). Future research and trends in ultra-wideband indoor tag localization. *IEEE Access*.
- Hayward, S., van Lopik, K., Hinde, C. & West, A. A. (2022). A survey of indoor location technologies, techniques and applications in industry. *Internet of Things*, 20, 100608.
- Illankoon, P., Manathunge, Y., Tretten, P., Abeysekara, J. & Singh, S. (2019). Lockout and tagout in a manufacturing setting from a situation awareness perspective. *Safety*, 5(2), 25.
- Industrial, S. (2023). Essential Steps of Lockout Tagout. Repéré le 2023-12-02 à <https://spectrum-industrial.co.uk/news/blog/essential-steps-of-lockout-tagout>.
- Jiang, C., Shen, J., Chen, S., Chen, Y., Liu, D. & Bo, Y. (2020). UWB NLOS/LOS classification using deep learning method. *IEEE Communications Letters*, 24(10), 2226–2230.
- Kay, J. A. & Schuster, G. K. (2020). Enhanced Productivity With Lockout/Tagout Alternatives : Exploring Alternative Protective Measures. *IEEE Industry Applications Magazine*, 26(4), 32–38.
- Kim, D.-H. & Pyun, J.-Y. (2021). NLOS identification based UWB and PDR hybrid positioning system. *IEEE Access*, 9, 102917–102929.
- Kumar, S. & Tauseef, S. (2021). Development of an internet of things (iot) based lockout/tagout (loto) device for accident prevention in manufacturing industries. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 1017(1), 012017.
- Kumar, S. & Tauseef, S. (2018). Analysis of various lockout tagout (LOTO) devices used in industrial safety. *Int. J. Eng. Technol*, 7, 1329–1335.
- Kumar Bora, M. (2022). Predictive Maintenance using Machine Learning [Format]. Repéré à https://medium.com/@Medini_2020/predictive-maintenance-using-machine-learning-3d8b62d5df8e.
- Kunhoth, J., Karkar, A., Al-Maadeed, S. & Al-Ali, A. (2020). Indoor positioning and wayfinding systems : a survey. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 10(1), 1–41.

- Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18–23.
- Leitch, S. G., Ahmed, Q. Z., Abbas, W. B., Hafeez, M., Laziridis, P. I., Sureephong, P. & Alade, T. (2023). On indoor localization using wifi, ble, uwb, and imu technologies. *Sensors*, 23(20), 8598.
- Li, T., Deng, Z., Zhang, Y., Dong, W. & Yu, H. (2024). A tightly coupled UWB/PDR fusion positioning algorithm for indoor environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- Li, Y., Peng, S., Li, Y. & Jiang, W. (2020). A review of condition-based maintenance : Its prognostic and operational aspects. *Frontiers of Engineering Management*, 7(3), 323–334.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0 : A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1–10.
- Lu, Y., Zheng, H., Chand, S., Xia, W., Liu, Z., Xu, X., Wang, L., Qin, Z. & Bao, J. (2022). Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 612–627.
- Majeed, A., Mu'azzah, N. et al. (2024). Indoor Positioning Based Ranging : A Review and Literature Survey of UWB and Li-Fi Technologies. *ELEKTRIKA-Journal of Electrical Engineering*, 23(1), 18–30.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT express*, 5(1), 1–7.
- Miramá, V., Bahillo, A., Quintero, V. & Díez, L. E. (2023). NLOS detection generated by body shadowing in a 6.5 GHz UWB localization system using machine learning. *IEEE Sensors Journal*, 23(17), 20400–20411.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
- Mostafa, S., Harras, K. & Youssef, M. (2022). A survey of indoor localization systems in multi-floor environments. *Authorea Preprints*.
- Musa, A., Nugraha, G. D., Han, H., Choi, D., Seo, S. & Kim, J. (2019). A decision tree-based NLOS detection method for the UWB indoor location tracking accuracy improvement. *International Journal of Communication Systems*, 32(13), e3997.

- Nor Hisham, A. N., Ng, Y. H., Tan, C. K. & Chieng, D. (2022). Hybrid wi-fi and ble fingerprinting dataset for multi-floor indoor environments with different layouts. *Data*, 7(11), 156.
- Obeidat, H., Shuaieb, W., Obeidat, O. & Abd-Alhameed, R. (2021). A review of indoor localization techniques and wireless technologies. *Wireless Personal Communications*, 119, 289–327.
- Okoh, P. & Haugen, S. (2014). A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(4), 346–356.
- Otim, T., Bahillo, A., Díez, L. E., Lopez-Iturri, P. & Falcone, F. (2019). Impact of body wearable sensor positions on UWB ranging. *IEEE Sensors Journal*, 19(23), 11449–11457.
- Pan, H., Qi, X., Liu, M. & Liu, L. (2021). Map-aided and UWB-based anchor placement method in indoor localization. *Neural Computing and Applications*, 33, 11845–11859.
- Pan, H., Qi, X., Liu, M. & Liu, L. (2022). Indoor scenario-based UWB anchor placement optimization method for indoor localization. *Expert Systems with Applications*, 205, 117723.
- Qu, J. (2023). A review of UWB indoor positioning. *Journal of Physics : Conference Series*, 2669(1), 012003.
- Raiche, J.-P. (2022). Industrie 5.0 : L'humain comme pilier de la transformation numérique [Format]. Repéré à <https://blog.proactioninternational.com/fr/industrie50-revolution-industrielle-humaine>.
- Rajagopal, N., Chayapathy, S., Sinopoli, B. & Rowe, A. (2016). Beacon placement for range-based indoor localization. *2016 international conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN)*, pp. 1–8.
- Sadeghi, S., Soltanmohammadlou, N. & Nasirzadeh, F. (2022). Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines. *Journal of safety research*, 83, 8–25.
- Sellak, S., Haberchad, O., Ibenyahia, S. & Salih-Alj, Y. (2023). Safety management system for factory workers using UWB indoor positioning and wearable vibrotactile guidance : Morocco case study. *2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 1509–1514.
- Sesyuk, A., Ioannou, S. & Raspopoulos, M. (2022). A survey of 3D indoor localization systems and technologies. *Sensors*, 22(23), 9380.

- Sharma, R. & Badarla, V. (2019). Analysis of a novel beacon placement strategy 3D localization in indoor spaces. *2019 11th international conference on communication systems & networks (COMSNETS)*, pp. 320–327.
- Sharma, R. & Badarla, V. (2021). A multiobjective optimization tool chain for 3-D indoor beacon placement problem. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(17), 13439–13448.
- Tu, C., Zhang, J., Quan, Z. & Ding, Y. (2024). UWB indoor localization method based on neural network multi-classification for NLOS distance correction. *Sensors and Actuators A : Physical*, 379, 115904.
- Viaposte. (2023). Les 4 bonnes pratiques pour assurer la maintenance de machine industrielle. Repéré le 2023-07-28 à <https://www.viaposte.fr/nos-actualites/post/quatre-bonnes-pratiques-pour-assurer-la-maintenance-de-machine-industrielle>.
- Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H. & Wang, L. (2024). Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 85, 102626.
- Wang, F., Tang, H. & Chen, J. (2023). Survey on NLOS identification and error mitigation for UWB indoor positioning. *Electronics*, 12(7), 1678.
- Wang, W., Zeng, Z., Ding, W., Yu, H. & Rose, H. (2019). Concept and validation of a large-scale human-machine safety system based on real-time UWB indoor localization. *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 201–207.
- Bathtub curve. (2023). Dans *Wikipedia*. Repéré le 2025-03-01 à https://en.wikipedia.org/wiki/Bathtub_curve.
- Wu, Z., Yao, Z. & Lu, M. (2023). Optimal beacon deployment for positioning in cluttered indoor environments. *IEEE Sensors Journal*, 23(4), 4256–4266.
- Yang, F., Liu, D., Gong, X., Chen, R. & Hyypä, J. (2024). 3D indoor area recognition for personnel security using integrated UWB and barometer approach. *Scientific Reports*, 14(1), 20846.
- Yu, K., Wen, K., Li, Y., Zhang, S. & Zhang, K. (2018). A novel NLOS mitigation algorithm for UWB localization in harsh indoor environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(1), 686–699.
- Zafari, F., Gkelias, A. & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568–2599.

- Zhang, C., Yankov, D., Shapiro, S. & Wu, W. (2021). An end-to-end beacon placement optimization system for indoor positioning. *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–8.
- Zhang, L., Jiao, K., He, W. & Wang, X. (2024). Anchor Deployment Optimization for Range-Based Indoor Positioning Systems in Non-Line-of-Sight Environment. *IEEE Sensors Journal*.
- Zhou, K., Liu, T. & Zhou, L. (2015). Industry 4.0 : Towards future industrial opportunities and challenges. *2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)*, pp. 2147–2152.