

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté : Sciences et Technologies
Département : Electronique et Télécommunications
Laboratoire de domiciliation : Laboratoire de Contrôle Avancé (LABCAV)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE

Domaine : Science et Technologies Filière : Electronique
Spécialité : Contrôle Avancé

Présentée par

CHAABNA Ameer

Intitulée

**Système de Communication par la Lumière Visible (VLC) :
Architecture simplifiée et efficacité énergétique d'un système de
positionnement**

Soutenue le : 10/10/2019

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom

Grade

Mr BOUDJEHEM Djalil	Pr.	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Président
Mr BABOURI Abdesselam	Pr.	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Encadreur
Mr ZHANG Xun	Dr.	Institut de ISEP France	Co-encadreur
Mr MOUSSAOUI Abdelkrim	Pr.	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
Mr KHELIL Khaled	Pr.	Univ. de Souk Ahras	Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon **directeur** de thèse, **Pr. Abdesselam Babouri** pour la confiance qu'il m'a accordé, ainsi que pour son disponibilité et sa patience, pour ses qualités humaines et scientifiques. Je ne pourrai jamais oublier son esprit de recherche et ses commentaires efficaces. Un grand merci de m'avoir donné la chance de réaliser ce modeste travail.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à **mon co-directeur de thèse, Dr. Xun Zhang** qui a été toujours disponible avec moi durant mon séjours à Paris ainsi à tous les membres de l'institut ISEP.

Je tiens à remercier **Pr. Boudjehem Djalil** pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury.

Je remercie **Pr. Moussaoui Abdelkrim** et **Pr. khelil khaled** d'avoir bien voulu accepter de faire partie du jury.

Merci à mes parents, mon épouse, ma petite fille, ma famille pour l'appui moral qu'ils m'ont témoigné, à qui je souhaite une vie pleine de bonheur, de santé et de prospérité.

A tous les membres des laboratoires LABCAV et LGEG de l'université 8 Mai 1945 Guelma s'adressent mes sincère remerciements.

A tous ceux qui de pris ou de loin ont contribué à ce que cette thèse soit réalisée se dirigent ma gratitude et mes pensées.

Système de Communication par la Lumière Visible (VLC): Architecture Simplifiée et Efficacité Énergétique d'un Système de Positionnement

Résumé

Le positionnement indoor est devenu un sujet de recherche attirant au cours des deux dernières décennies. Cependant, aucune solution satisfaisante n'a été trouvée en tenant compte à la fois de l'efficacité énergétique et de la complexité du système. Récemment, la recherche sur les communications par lumière visible offre de nouvelles possibilités pour réaliser un positionnement indoor économique en termes d'énergie avec une configuration de système relativement simple. Cette thèse porte sur plusieurs thèmes de recherche fondamentaux des systèmes de positionnements indoor basés sur la technologie de communication par lumière visible (VLC).

Dans ce contexte, l'efficacité énergétique et la simplicité du système sont tenus en considération. L'objectif principal de cette thèse est de répondre aux ces défis. Pour atteindre cet objectif, nous proposons des systèmes basant sur l'efficacité d'illuminance. Pour cela nous avons proposé un arrangement des LED qui consomme moins d'énergie et de réaliser un éclairage autour de toute la pièce. L'utilisation des récepteurs autonomes est l'un des moyens de communication les plus prometteurs en matière d'efficacité énergétique. Dans ce travail, nous proposons et développons un système de positionnement VLC-IPS qui utilise la communication de lumière visible (VLC) et une cellule solaire avec deux fonctions: agir en tant que récepteur du signal VLC et récupérer l'énergie de la lumière. Ainsi, nous introduisons une nouvelle approche de l'algorithme de positionnement indoor de fingerprinting basée sur RSS en utilisant des images RSS et une analyse spectrale compressée. Où la taille de la base de données collectée de l'environnement est considérablement réduite. Ces propositions ont fait l'objet d'une étude théorique et d'une analyse de performances du système.

Mots-clés: VLC-IPS, Efficacité Énergétique, RSS, complexité, Base de Données.

Visible Light Communication System: Simplified Architecture and Energetic Efficiency of Positioning System

Abstract

Indoor positioning has become an attractive topic of research over the past two decades. However, no satisfactory solution has been found taking into account both the energy efficiency and the complexity of the system. Recently, visible light communications research has opened up new possibilities for achieving energy-efficient indoor positioning with a relatively simple system configuration. This thesis focuses on several fundamental research topics in indoor positioning systems based on visible light communication (VLC) technology. In this context, the energy efficiency and the simplicity of the system are taken into consideration. The main objective of this thesis is to respond to these challenges. To achieve this goal, we propose systems based on the effectiveness of illuminance. For this, we have proposed an arrangement of LED that consumes less energy and achieve illumination around the entire room. The use of autonomous receivers is one of the most promising means of communication for energy efficiency. In this work, we propose and develop a VLC-IPS positioning system that uses visible light communication (VLC) and a solar cell with two functions: act as a receiver of the VLC signal and recover the energy of the light. Thus, we introduce a new approach to the RSS-based indoor fingerprinting positioning algorithm using RSS images and compressed spectral analysis. Where the size of the database collected from the environment is greatly reduced. These proposals were the subject of a theoretical study and a performance analysis of the system.

Keywords: VLC-IPS , Energy Efficiency, RSS, Complexity, Database.

ملخص

أصبح تحديد المواقع الداخلية موضوعًا جذابًا للبحث على مدار العقدین الماضیین. ومع ذلك ، لم يتم العثور على حل مرضٍ يأخذ في الاعتبار كلاً من كفاءة الطاقة وتعقید النظام. في الأونة الأخيرة ، فتحت أبحاث الاتصالات بواسطة الضوء المرئي إمكانيات جديدة لتحديد المواقع الداخلية الموفرة للطاقة مع تكوين نظام بسيط نسبيًا. تركز هذه الأطروحة على العديد من الموضوعات البحثية الأساسية في أنظمة تحديد المواقع الداخلية القائمة على تقنية الاتصال بالضوء المرئي (VLC).

في هذا السياق ، تؤخذ كفاءة الطاقة وبساطة النظام في الاعتبار. الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو الاستجابة لهذه التحديات. لتحقيق هذا الهدف ، نقترح أنظمة تستند إلى فعالية الإضاءة. لهذا اقترحنا ترتيب المصابيح التي تستهلك طاقة أقل وتوفر الإضاءة في جميع أنحاء الغرفة. يعد استخدام المستقبلات المستقلة أحد أكثر وسائل الاتصال الواعدة من حيث كفاءة الطاقة. في هذا العمل ، نقترح ونطور نظام تحديد موضع VLC-IPS يستخدم اتصال الضوء المرئي (VLC) وخليبة شمسية مع وظيفتين: العمل كمستقبل لإشارة VLC واستعادة طاقة الضوء. بالإضافة إلى ذلك ، نقدم طريقة جديدة لخوارزمية تحديد موقع البصمات الداخلية القائمة على RSS باستخدام صور RSS والتحليل الطيفي المضغوط. حيث يتم تقليل حجم قاعدة البيانات التي تم جمعها من البيئة. كانت هذه المقترحات موضوع دراسة نظرية وتحليل لأداء النظام.

كلمات البحث

VLC-IPS ، كفاءة الطاقة ، RSS ، التعقید ، قاعدة البيانات.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Généralités sur les systèmes de positionnement indoor	5
1.1 Introduction	5
1.1.1 La localisation Indoor basée sur la vision (caméras)	8
1.1.2 La localisation Indoor basée sur les technologies sans fils	9
1.1.3 Autres méthodes: utilisant l’empreintes acoustique, l’accél-éromètre, boussole et gyroscope	10
1.2 Les Critères d’Evaluation D’un Système De Localisation Indoor Sans Fils .	10
1.2.1 Exactitude (ou erreur de localisation)	11
1.2.2 Précision	11
1.2.3 Zone de couverture	11
1.2.4 Coût, Complexité et simplicité du système (Matériel et Logiciel) . .	11
1.2.5 Sécurité	12
1.2.6 Temps de localisation	13
1.3 Principes et Algorithmes pour la Localisation Indoor Sans Fils	13
1.3.1 Proximité	14
1.3.2 Triangulation	15
1.3.3 Analyses de Scène (Fingerprinting)	22
1.4 Classification des Technologies Sans Fils pour la Localisation Indoor	26
1.5 Les Caractéristiques des Signaux à l’environnement intérieur	29
1.5.1 Réflexion	30

1.5.2	Diffraction	31
1.5.3	Transmission	32
1.5.4	Diffusion	33
1.6	Localisation Indoor Sans Fil pour des Applications Industrielles	34
1.6.1	Gestion de l'Activité de Travail	35
1.6.2	Gestion des Risques et Secours d'Urgence	35
1.6.3	La Maintenance en Usine	36
1.7	Conclusion	37
2	Les systèmes de Positionnements VLC-IPS et état de l'art	38
2.1	Introduction	38
2.2	Technologie de communication par la lumière visible (VLC)	40
2.2.1	Définition et principe de fonctionnement	40
2.2.2	Avantages et inconvénients	41
2.2.3	Domaine d'Application	42
2.3	Notions de base pour la communication optique sans fil indoor	47
2.3.1	Modulation d'Intensité et Canaux de Détection Directe IM/DD	47
2.3.2	Gain statique du canal	50
2.3.3	Les sources de bruits	51
2.4	Algorithmes de positionnement basés sur VLC	54
2.4.1	Algorithmes de positionnement basés sur VLC	54
2.4.2	Etat de L'art sur les systèmes VLC-IPS	55
2.5	Architecture générale d'un système VLC-IPS	56
2.5.1	Module d'émission	57
2.5.2	Canal de transmission	62
2.5.3	Caractéristiques du module de Réception	71
2.6	Conclusion	75
3	Etude de l'efficacité énergétique d'un système VLC-IPS	77
3.1	Introduction	77

3.2	Evaluation des performances d'un système VLC-IPS	78
3.2.1	Transmission de données sans fil par la lumière visible	78
3.2.2	Présentation du système VLC-IPS proposé	84
3.3	Evaluation des performances du système proposé	88
3.3.1	Distribution de l'illuminance du système proposé	88
3.3.2	Évaluation de la performance de l'illuminance basée sur l'arrangement des LED dans un système VLC-IPS	91
3.3.3	La puissance optique reçue	98
3.3.4	Performances SNR du système proposé	100
3.3.5	Algorithme de Positionnement	104
3.4	Nouveau système VLC-IPS utilisant une cellule solaire	113
3.4.1	Description et analyse du modèle	115
3.4.2	Principe de d'algorithme de positionnement	119
3.5	Résultats et discussion	119
3.6	Concluion	124
4	Nouvelle technique de positionnement indoor basée sur la communica- tion par la lumière visible utilisant la compression spectrale	126
4.1	Introduction	126
4.2	Présentation du système étudié	129
4.2.1	Modélisation du signal RSS	129
4.2.2	Construction de fingerprint RSS	131
4.3	Compression DCT de la base de données pour un système VLC-IPS	132
4.3.1	Compression des images RSS	132
4.3.2	Calcul de la base de données	135
4.3.3	Nouvelle technique d'estimation de position basée sur les images RSS	137
4.3.4	Algorithme k-NN pour le positionnement VLC	137
4.3.5	Configuration et Arrangement des LED	138
4.4	Résultats et Discussions	139

4.4.1	Premier cas: 4 LED	139
4.4.2	Deuxième cas: 8 LED	143
4.5	Conclusion	147
	Conclusion générale	149
	Liste des figures	152
	Liste des tableaux	156
	Liste d'abréviations	157
	Bibliographie	159

Introduction générale

La localisation et le positionnement sont devenus un des sujets disciplinaires les plus considérés dans la vie moderne et l'un des besoins fondamentaux depuis l'antiquité. Au début, les informations de position des cibles sont estimées en sentant, sondant, traçant et en voyant. Malgré l'évolution du monde, tout devient de plus en plus compliqué, de même l'espace dans lequel on vit. Les gens modernes sont maintenant confrontés à un lieu contenant trop d'informations. Il est important pour eux d'obtenir autant de détails que possible sur leur position et leur environnement. Les informations de localisation ont donc un sens profond. À l'aide des informations de localisation, on peut non seulement fournir des services en fonction de la situation géographique, mais également en fonction de l'identité et de nos besoins. Ces services sont appelés les services basés sur la localisation (LBS) [1]. Un service basé sur la localisation est un service de niveau logiciel qui utilise les données de localisation pour contrôler les fonctionnalités. En tant que tel, LBS est un service d'information utilisé en plusieurs usages: dans les réseaux sociaux en tant qu'une information, en divertissement ou en sécurité, accessible avec les appareils mobiles via le réseau mobile et en utilisant des informations sur la position géographique d'un appareil mobile.

Les méthodes basées sur les fréquences RF fournissent des précisions de positionnement allant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres [2]. Mais cette précision n'est pas suffisante pour les applications intérieures décrites ci-dessus. Outre la précision relativement médiocre du positionnement à l'intérieur que l'on peut obtenir par les techniques RF, ils augmentent également les interférences électromagnétiques (EM). Pour ces raisons, les techniques basées sur la VLC (Visible Light Communication) at-

tirent l'attention. Les techniques basées sur VLC présentent l'avantage que les sources ne produisent pas d'interférences EM et peuvent donc être utilisées dans des environnements où les radiofréquences sont interdites. La plupart des techniques basées sur VLC utilisent les LED comme source de la lumière, car elles peuvent être modulées facilement et plus pratique que les lampes fluorescentes et, par conséquent, les données de localisation peuvent être transmises de manière plus simple. De plus, les LED sont actuellement installées dans la plupart des bâtiments, en particulier les plus grands, par exemple les musées et les centres commerciaux, en tant que source principale d'éclairage au lieu des lampes fluorescentes, qui ont l'avantage d'avoir une durée de vie beaucoup plus longue, moins consommation d'énergie et un coût d'exploitation réduit. Ainsi, les techniques de positionnements indoor existants basées sur la VLC sont d'excellentes options.

Modéliser un système de positionnement indoor basé sur la communication par la lumière visible (VLC-IPS) peut être insuffisant.

Cette thèse porte sur plusieurs domaines de recherche fondamentaux du positionnement indoor utilisant la technologie VLC. Pour notre contribution on a focalisé sur deux principaux critères lesquelles : Efficacité énergétique et la simplicité (moins complexité) du système.

Concernant l'efficacité énergétique du système deux contributions ont été proposées. La première intervenue au niveau du module émetteur où on a basé sur l'arrangement des LED prenant en compte l'espacement entre LED afin d'atteindre une distance optimale et minimiser le chevauchement entre l'illuminance des LED. L'objectif dans cette partie est d'augmenter l'efficacité lumineuse dans la pièce avec un nombre minimum des LED et une photodiode utilisée comme module de réception.

La deuxième proposition est de remplacer le module de réception (photodiode) par une cellule solaire. Suite à ses caractéristiques, on a assuré la détection des signaux VLC et la récupération de l'énergie. L'objectif est d'obtenir un module autoalimenté et eco-friendly.

Le critère de moins complexité du système est assuré par une proposition d'un nouveau mécanisme de positionnement exploitant la compression spectral afin de réduire la taille

de la base de données construite au niveau de la phase de formation (hors ligne) de l'approche de fingerprinting avec une précision de positionnement adéquate.

Les travaux au cours de ce travail de thèse étudient également les effets de plusieurs facteurs (par exemple, l'angle à mi-puissance, l'exposition directe et indirect au rayonnement solaire, l'angle d'orientation du récepteur) pour mieux simuler les performances du système lorsqu'il est déployé dans un environnement intérieur réel.

La structure de ce manuscrit est organisée en quatre chapitres comme suit :

Dans le chapitre 1, nous avons commencé par une description générale sur les systèmes de positionnement indoor (IPS) et ses critères d'évaluations. Puis, nous avons discuté les principes et les algorithmes exploités dans le domaine de localisation. Ensuite, un récapitulatif de l'état de l'art des systèmes IPS pour différentes technologies (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, ...etc.) avec ses classifications détaillé. Les caractéristiques des signaux dans l'environnement intérieur et l'application de la localisation dans le domaine industriel sont présentées, Enfin, nous avons clôturé le chapitre par une conclusion.

Dans le chapitre 2, nous avons commencé par présenter la définition et le principe de fonctionnement des communications par la lumière visible sans fil. Nous avons détaillé ensuite les spécificités liées au domaine du VLC en présentant les avantages, les inconvénients et les différents domaines d'applications. Après une brève description des algorithmes de positionnement existants associés à cette technologie, un état de l'art des travaux similaires est discuté. Puis, nous avons présenté l'architecture générale d'un système VLC-IPS.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude de l'efficacité énergétique. Deux contributions ont été étudiées, dans la première contribution le système de positionnement VLC-IPS proposé utilisant une photodiode comme récepteur, nous avons commencé par une application de transmission d'un signal audio et un signal textuel. Puis l'évaluation des performances d'illuminance du système exploitant l'espacement entre LED. Ensuite, nous avons analysé la puissance optique et le rapport signal/bruit (SNR) avec une exposition directe et indirecte au soleil. Après, nous avons discuté les résultats de positionnement. Dans la deuxième contribution nous avons proposé un nouveau système de positionnement

VLC-IPS utilisant une cellule solaire comme récepteur optique. Au cours de cette partie, nous avons commencé par la description et l'analyse du modèle proposé. Ainsi, nous avons évalué la caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-résistance (P-R). Puis, nous avons présenté la réponse fréquentielle et l'effet de rayonnement solaire sur le système. Après, nous avons discuté les résultats de positionnement de cette proposition, et nous avons clôturé le chapitre par une conclusion.

Dans le chapitre 4, nous présentons une nouvelle technique de positionnement indoor basé la méthode de fingerprinting utilisant des images RSS compressé au lieu des valeurs RSS afin de simplifier et de mettre le système à moins complexité. Avec la méthode fingerprinting, une construction de la base de données est nécessaire. La compression de la base de données du système effectué par la transformé cosinus discrète (DCT). Ensuite, nous avons étudié la réduction de la base de données et l'estimation de position par les images RSS. Après, nous avons discuté les différents résultats de simulation obtenus avec une analyse pour chaque cas étudié, ainsi qu'une comparaison et discussion des différents cas traités. Une conclusion est effectuée à la fin du chapitre.

Finalement, ces travaux de thèse sont clôturés par une conclusion générale et des perspectives.

Généralités sur les systèmes de positionnement indoor

1.1 Introduction

Les services basés sur la localisation (LBS) évoluent rapidement à cause de leur rôle important qui permet aux utilisateurs d'acquérir une meilleure expérience [2]. L'industrie du LBS croit exponentiellement. Selon un rapport de Berg Insight Global [3], en Amérique du Nord, les revenus provenant de la gestion du matériel devraient augmenter de près de 1,8 milliard de dollars en 2013 à près de 3,8 milliards de dollars en 2018, comme montre la figure. 1.1.

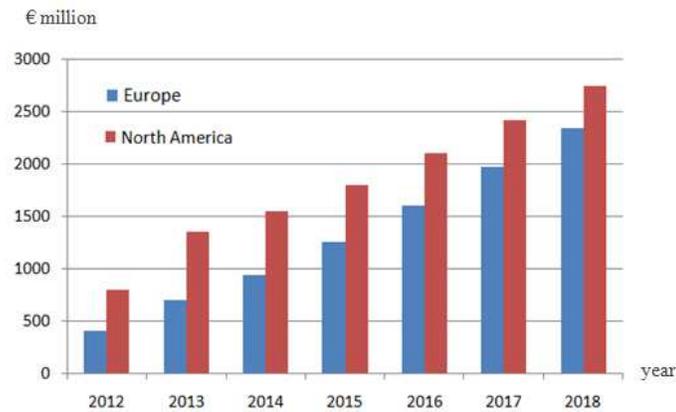


Figure. 1.1- Prévisions des revenus de LBS mobiles, (2012-2018) [3]

La taille du marché des LBSs du Conseil de Coopération du Golf (GCC) était estimée à 46171,2 milliers USD en 2016 et devrait attirer l'attention au cours de la période de prévision. En outre, l'utilisation croissante des plates-formes 3D dans divers secteurs devrait stimuler la demande de LBS indoor dans cette région [4]. (figure. 1.2).

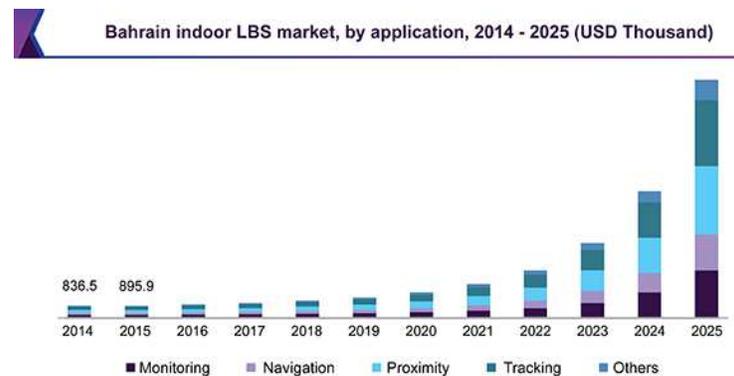


Figure. 1.2- Prévision du marché LBS indoor à Bahreïn, entre 2014-2025 (en milliers de USD) [4].

Cependant, La localisation et le positionnement sont souvent connus comme suit :” l’habilité de trouver la localisation géographique d’un objet mobile et de fournir des services basés sur l’information de cette localisation”. Les scénarios de localisation peuvent

être divisés selon l'environnement de l'application en deux catégories : localisation intérieur (Indoor) et localisation extérieur (Outdoor).

Pour la localisation outdoor, la plupart des services de localisation sont gouvernés par la technologie appelée Global Navigation Satellite System (GNSS). L'exemple le plus connu du GNSS est le Système de Positionnement Global (GPS), qui était conçu pour répondre aux besoins des militaires au début [5]. Maintenant, le GPS joue un rôle essentiel dans les LBSs [6]. Bien que le GNSS présente d'énormes avantages dans les activités de localisation, il peut difficilement être utilisé dans la localisation indoor. Normalement, il y a 20-30 dBm quand il y a des blocs tels que les toits [7]. Cette faible performance rend pratiquement impossible de travailler à l'intérieur. Ce problème est dû à l'existence des différents équipements et obstacles, ce qui peut affaiblir le signal et produire des bruits dans le signal GPS transmis. Cependant, le GPS est inapproprié pour l'environnement intérieur. Comme illustre la figure. 1.3.



Figure. 1.3- Limitation de GPS.

Généralement le GPS peut atteindre une précision d'environ 5 mètres, ce qui est probablement applicable pour les applications outdoor. Donc, cela ne s'applique pas dans une situation indoor où 5 mètres peuvent signifier une chambre ou une pièce différente. Dans [8], M. Azizyan et al. ont donné un argument qui suppose que le GPS peut avoir les mêmes performances que la situation outdoor. Il doit donc y avoir un moyen de mise en œuvre pour obtenir des informations de localisation et de temps avec une meilleure

précision. Certains chercheurs ont proposé des moyens pour aider le GPS à travailler à l'intérieur des bâtiments. Par exemple, Kerem [9] a proposé l'utilisation des répéteurs dans un environnement indoor. Ces répéteurs consistent en : une antenne directionnelle pour recevoir un ensemble de satellites GPS qui ne s'imbriquent pas, un amplificateur à faible bruit (LNA Low Noise Amplifier), un amplificateur de puissance pour compenser les pertes d'antenne et de câble et une antenne d'émission pour retransmettre les signaux GPS amplifiés. Paul [10] a analysé une technologie appelée GPS assisté (A-GPS) qui était destinée à donner au GPS une meilleure performance dans les applications indoor, mais qui ne peut toujours pas répondre à nos exigences. Selon l'étude menée dans [10], il suffit d'assurer une précision à moins de 100 mètres. Ceci est impossible pour la plupart des cas de localisation indoor.

Récemment, les Systèmes de Positionnement Indoor (IPS) sont devenus très populaires. Ces systèmes ont été utilisés avec succès dans plusieurs applications tels que : suivi des trucs ou des Robots, la gestion des stocks pour permettre aux utilisateurs de naviguer dans un grand centre commercial ou un complexe familial non connue et les aider à trouver facilement ce qu'ils désirent, en cas d'urgence sa peut être utile pour aider les personnes malvoyant. Le positionnement indoor n'est pas simplement une extension de localisation outdoor [11]. (figure.1.4).

Il y a plusieurs aspects qui peuvent être adapté à la localisation dans les environnements indoor, généralement sont données par [11]:

1.1.1 La localisation Indoor basée sur la vision (caméras)

Les informations visuelles peuvent être collectées et utilisées dans la navigation indoor dans nombreux ouvrages. Dans [12], le Micro-Flyer équipé de deux caméras prend des photos de la texture spéciale sur le mur. En analysant la déformation de la texture capturée, le système peut déduire ses positions relatifs des murs. Un drone (véhicule aérien sans pilote) dans [13] envoie des faisceaux laser aux alentours. En capturant et en analysant la position des points laser sur les murs et le sol, le drone (UAV) peut prédire sa distance par rapport au sol et aux murs. Cependant, la localisation basée sur l'image

consomme plus de ressources informatiques (analyse de l'image) et de puissance. Dans les systèmes de navigation robotisés, le robot doit être posé sur le sol pendant une longue période pour réduire ses positions potentiels. De plus, l'utilisation de la caméra augmente le coût du système, ce qui exclut l'extensibilité du système.

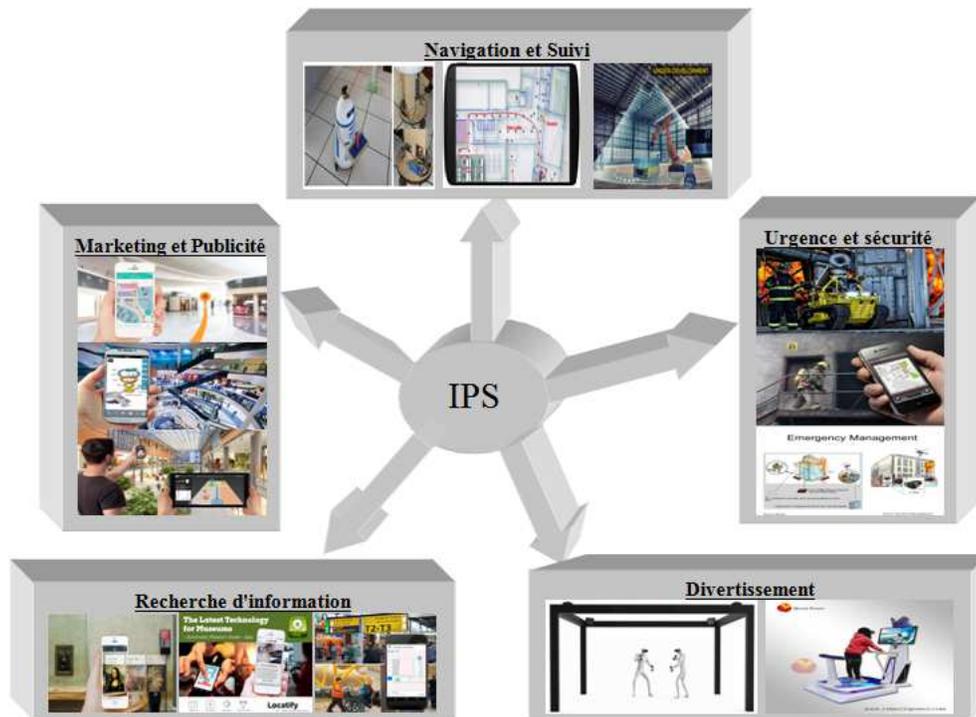


Figure. 1.4- Différentes applications des systèmes IPS.

1.1.2 La localisation Indoor basée sur les technologies sans fils

Les ondes sans fil peuvent traverser les portes et les murs et fournir une couverture omniprésente dans un bâtiment. La localisation indoor sans fils utilise les caractéristiques du signal reçu pour déduire la distance aux points connus et obtenir la position du point actuel. La plupart des travaux dans le domaine du positionnement indoor utilisent la localisation indoor sans fils. Le déploiement du système est facile et l'existence des ondes ne gêne pas les activités humaines dans les bâtiments. Le coût des puces sans fils est beaucoup moins cher que celui des caméras. La consommation d'énergie et de ressources

informatiques est également significativement inférieure à la localisation indoor basée sur la vision.

1.1.3 Autres méthodes: utilisant l'empreintes acoustique, l'accéléromètre, boussole et gyroscope

En outre du positionnement indoor basée sur la vision et sur les technologies sans fils, il existe également de nombreux moyens de localisation indoor. [14] utilise une empreinte acoustique pour localiser la position. Alors que [15] et [16] utilisent l'accéléromètre et le gyroscope pour obtenir le mouvement d'utilisateur. En adoptant une méthode de calcul du temps mort, l'emplacement de la position actuelle peut être calculé comme l'emplacement précédent en ajoutant le mouvement.

1.2 Les Critères d'Evaluation D'un Système De Localisation Indoor Sans Fils

Le système de localisation indoor sans fils est habituellement constitué de deux parties : les stations d'émission (point d'accès AP/LED) émettant le signal sans fils et les dispositifs d'utilisateur qui reçoit le signal [11].

Cependant, il y a une différence remarquable entre l'environnement indoor et l'environnement outdoor. La propagation des ondes sans fil peut être influencée par la réflexion, la diffusion et la diffraction. La force du signal peut être affectée par l'évanouissement multi trajet ou par l'évanouissement d'ombre. Dans l'environnement indoor, les murs, les meubles ou les piétons modifient la propagation des ondes sans fils et introduisent une variance dans le signal sans fils reçu par l'utilisateur. Il faut spécifier les critères d'évaluation du système de localisation indoor, tels que:

1.2.1 Exactitude (ou erreur de localisation)

C'est le critère le plus important pour les systèmes de positionnement. D'habitude, l'erreur de la distance moyenne est adaptée comme mesure de performance qui est la distance euclidienne entre la localisation estimée et la localisation réelle [17].

1.2.2 Précision

Indique le positionnement correcte. La précision de localisation détermine comment le système fonctionne, c'est la distribution de l'erreur de distance entre la localisation estimée et la localisation réelle. La fonction de distribution cumulative (CDF) de l'erreur de distance est utilisée pour mesurer la précision du système. Par exemple, la précision de localisation d'un système est de 90% en 2.3m (la CDF de l'erreur de distance de 2.3 est 0.9) [17].

1.2.3 Zone de couverture

La couverture désigne l'endroit couvert pour la localisation précise. Les systèmes les plus fiables sont les seuls qui couvrent la gamme la plus large. Les gammes des systèmes existant sont de 5 à 50 mètres. Un grand défi est de créer un système qui a une couverture plus que 60 mètres, les gammes courtes de la technologie sans fils doivent avoir plusieurs objets pour couvrir le même endroit [18].

1.2.4 Coût, Complexité et simplicité du système (Matériel et Logiciel)

Le coût est un critère important pour évaluer un système de localisation. Le coût d'un système de positionnement peut dépendre de plusieurs facteurs. Parmi les facteurs important : l'argent, le temps, le poids et l'énergie. . . . Le coût de calcul élevé signifie une grande consommation et un prix d'objet utilisé cher. La complexité du traitement du signal et des algorithmes utilisés pour estimer l'emplacement est un autre problème à

équilibrer avec les performances des systèmes de positionnement. Le compromis entre la complexité du système et la précision affecte le coût global du système.

La simplicité du système décrit la simplicité de l'implémentation et la faisabilité du système IPS. De nombreuses recherches utilisent ce critère pour comparer différents systèmes de positionnement [19], [20] et [21]. Cela implique le temps et le coût d'installation/maintenance (I/M) du matériel, la simplicité et le coût du logiciel, ainsi que la consommation d'énergie.

La simplicité matérielle représente la quantité de ressources (temps et coûts) investies pour l'installation et la maintenance d'un système de positionnement. Dans [19], il comprend deux parties: la complexité et le coût de l'infrastructure I/M, la complexité et le coût de l'utilisateur I/M. Par exemple, un IPS utilise des dispositifs spéciaux et une infrastructure spécialisée (réseaux de capteurs, capteurs à ultrasons, encodeurs, etc.), la complexité et le coût de l'I/M peuvent être élevés. La simplicité du logiciel est également appelée complexité de calcul dans [20]. Cette métrique est utilisée pour décrire la complexité de l'algorithme de positionnement qui implique le temps de calcul et la capacité de traitement requise (CPU, mémoire). Cela pourrait être une mesure très importante si le processus de positionnement est mis en œuvre sur un utilisateur mobile (par exemple, un robot, un téléphone mobile), en raison du positionnement en temps réel requis et du manque de forte puissance de traitement.

La consommation d'énergie peut ne pas poser de problème pour la partie fixe (infrastructure), mais c'est un point clé pour la durée de la batterie du récepteur. Généralement, cela dépend de la complexité du calcul de l'algorithme de positionnement [20].

1.2.5 Sécurité

La confidentialité est l'un des problèmes les plus importants pour les utilisateurs. La position de tout utilisateur peut être facilement consultée via le positionnement à distance. Ainsi, les informations de localisation ne devraient être disponibles que pour les personnes ayant un accès autorisé. Il est également lié à la façon dont le système détermine les informations de localisation et le type d'application. Par exemple, un appareil GPS peut

tirer sa propre position des satellites GPS, ce qui est complètement le cas. D'un autre côté, un suivi de localisation tel que le système E-911 [22] ayant pour objectif principal la capture d'emplacement de l'utilisateur peut être utilisé de manière abusive par des groupes non autorisés s'il n'y a pas de prise de sécurité. Ainsi, le système de localisation nécessite un protocole de sécurité intégré au système pour protéger les informations de localisation. Malheureusement, la sécurité du système est limitée par la technique de détection de localisation. Par exemple, un système de positionnement qui réutilise les signaux de communication aux fins de la détection de la position ne peut pas complètement protéger la confidentialité de l'utilisateur en raison de sa nature active [23]. Pour plus de détails sur ce critère voir [24].

1.2.6 Temps de localisation

Le temps nécessaire pour la localisation indoor sans fils varie selon les méthodes. Pour les méthodes prenant en charge la localisation pour un objet immobile, le temps de localisation peut être très rapide.

1.3 Principes et Algorithmes pour la Localisation Indoor Sans Fils

L'estimation de la position nécessite deux étapes: la première étape est l'étape d'estimation du paramètre qui peut être une estimation par le temps d'arrivée (TOA), la différence dans le temps d'arrivée (TDOA), l'angle d'arrivée (AOA) ou de la force du signal reçu (RSS); la deuxième étape est l'estimation de la position réelle [25]. L'étape d'estimation de la position implique le traitement du paramètre estimé à l'aide de différents algorithmes tels que la proximité, la triangulation/trilatération et l'analyse de scène (fingerprinting) comme montre la figure. 1.5 [25]. Utiliser plus d'un type d'algorithme de positionnement à la fois dans une seule technologie de localisation donne une meilleure performance.

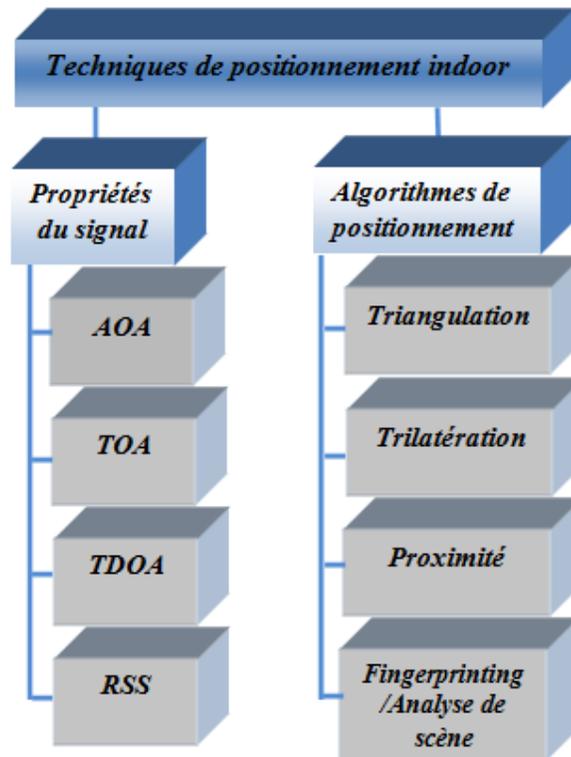


Figure. 1.5- Classification des techniques et algorithmes de positionnement.

1.3.1 Proximité

La proximité est une méthode simple pour la localisation indoor, le principe de cette méthode est basé sur : lorsque le point d'utilisateur est détecté ou est situé dans la gamme d'une station connue (parfois utilisation des détecteurs comme un réseau des antennes avec une position connue). Cette station est la seule considérée pendant le calcul de la localisation du point d'utilisateur. Si le point d'utilisateur est détecté par plusieurs stations, la station qui reçoit le signal le plus fort est à ce moment-là considérée dans le calcul de localisation de l'objet (voir figure.1.6). Ce principe est utilisé dans les systèmes à base de radiofréquence et rayonnement infrarouge (IR). M.Ficco [26] propose un autre exemple de la localisation basée sur GSM dont la précision obtenue entre 50-200m correspond à la taille de la cellule GSM.

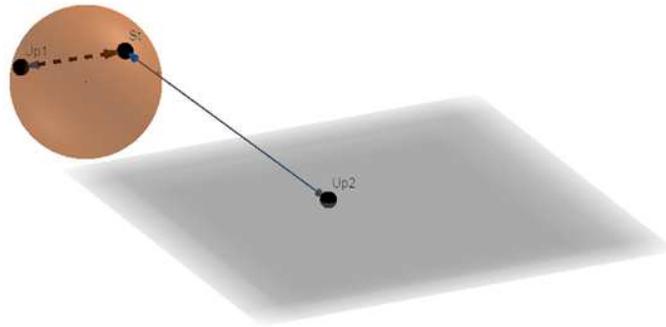


Figure. 1.6- La technique de positionnement par proximité.

Où $Up1$, $Up2$ sont les points d'utilisateurs, la zone de proximité de la station St est spécifiée et illustré par le cercle dans la figure.1.6. Ce schéma illustre que $Up1$ est dans la gamme de S_t et que $Up2$ ne l'est pas. Ce type de technique de localisation ne peut pas donner une estimation absolue ou relative de la position [27]. Par exemple, dans une chambre la proximité peut spécifier avec précision si un utilisateur est dans la pièce ou non.

1.3.2 Triangulation

Cette technique de localisation est basée sur la connaissance des propriétés géométriques des triangles pour localiser le point d'utilisateur. Et pour cela, deux approches peut être utilisée, qui sont la distance (dite tri-latération) et l'angle (dite tri-angulation) des points fixes connus appelés points de référence [28].

Technique de tri-latération

Dans la technique de trilatération, la position d'un point d'utilisateur est déterminée en mesurant la distance des points multiple avec des coordonnées connues. En deux dimensions (2D) la technique nécessite la mesure de distance de 3 points non colinéaire au minimum (Voir figure. 1.7) ; la localisation du point d'utilisateur peut être exprimée par l'intersection de trois cercles. En trois dimensions (3D), le mesure de la distance de 4 points non coplanaire est exigé [29].

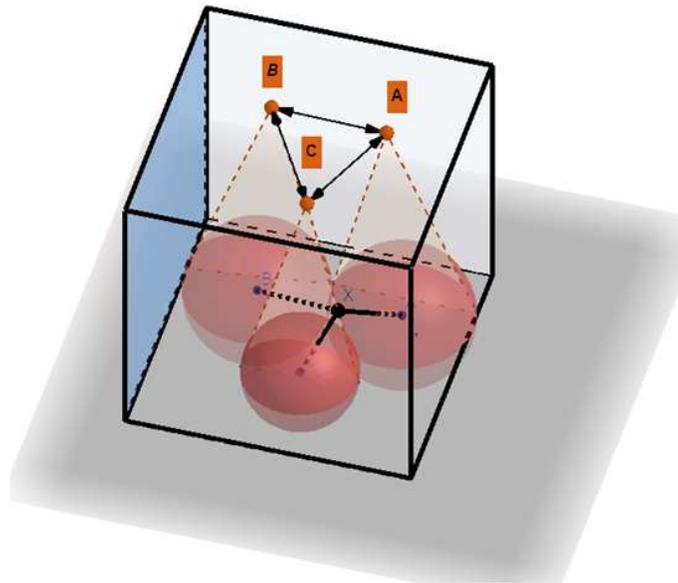


Figure. 1.7- Positionnement utilisant la trilatération.

Il y a des approches différentes utilisées pour mesurer la distance d'un objet. Ces approches sont soit transmises par le capteur ou mesurées par la station de base lorsque le signal arrive. Les approches sont: triangulation à base du temps comme : Temps d'arrivé (TOA) et la différence dans le temps d'arrivé (TDOA), triangulation à base de la force du signal reçu (RSS). La distance est obtenue par le calcul de la diminution de puissance du signal émis ou en multipliant la vitesse du signal et le temps de vol. Aussi, il y a d'autres approches utilisées pour l'estimation de la gamme dans certain systèmes, qui sont : temps d'aller-retour (RTOF) et méthode de phase du signal reçu (POA) [17].

TOA (Temps d'arrivée) TOA est une méthode qui permet de mesurer le temps pris par le signal pour aller au point d'utilisateur vers la station ou vice versa. Il est calculé par la soustraction de temps de départ (départ du signal depuis le point d'utilisateur) du temps d'arrivé (arrivé du signal à la station). Ce TOA direct nécessite deux conditions principales qui sont :

- Tous les stations et points d'utilisateur doivent synchroniser précisément leur temps.
- Le signal transmis doit être accompagné par l'horodatage.

Il existe plusieurs techniques et algorithmes de signalisation pour un système de localisation indoor à base de TOA telle que la séquence directe à étalement de spectre (DSSS), mesures de la Bande ultra-large (UWB) [30], le plus proche voisin (NN) et pondération résiduelle (RWGH) [31]. L'algorithme RWGH est essentiellement considéré comme un algorithme de moindre carré pondéré. Il est plus adapté pour les conditions des canaux LOS, Non-LOS (NLOS) et LOS/NLOS mixtes.

Cette approche directe utilise une méthode géométrique pour calculer les points d'intersection des cercles de TOA. La position d'utilisateur peut être aussi calculée par la minimisation des sommes carré d'une fonction du coût non linéaire i.e. l'algorithme des moindres carrés [32].

Supposant que la coordonnée du point d'utilisateur est (x_0, y_0) , le signal est transmis au temps t_0 , les coordonnées de N stations sont $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$, le signal reçu au temps t_1, t_2, \dots, t_N . En tant que mesure de performance, la fonction du coût est donnée par

$$F(x) = \sum_{i=0}^N a_i^2 f_i^2(x) \quad (1.1)$$

Où la fiabilité du signal reçu à la station i dépend du choix des a_i , et $f_i(x)$ est donné comme suit

$$f_i(x) = c(t_i - t) - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (1.2)$$

avec : c est la vitesse de lumière et $x = (x, y, t)^T$.

Cette fonction est formée pour chaque station $i = 1, \dots, N$ et $f_i(x)$ peut être égaux à zéro avec un choix approprié de x, y et t . L'estimation de localisation est déterminée par la minimisation de la fonction $F(x)$ ($Min F(x)$). ToA est la technique la plus exacte qui peut filtrer les effets des trajets multiples dans les situations intérieures. Cependant, il est complexe à implémenter [29].

TDOA (Différence de temps d'arrivée) Cette méthode est basée sur la synchronisation des stations même avec la non connaissance du temps de transmission. Son principe est de déterminer la position du point d'utilisateur par le calcul de la différence du temps dont le signal arrive à des stations multiple. Les stations peuvent avoir différente courbes

hyperbolique pour la localisation du potentiel de différent temps de transmission proposé où l'intersection des courbes dans un point singulier est la transmission du temps correcte. Ce point spécifie la localisation possible [11], [17]. Pour chaque mesure de TDOA l'émetteur doit se situer à un hyperboloïde avec une différence de gamme constante entre les deux stations.

Il existe plusieurs algorithmes différents pour mesurer les TDOA entre eux, la régression non linéaire de l'équation de l'hyperboloïde est la suivante

$$R_{i,j} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2} \quad (1.3)$$

Où (x_i, y_i, z_i) et (x_j, y_j, z_j) représentent les récepteurs fixes i et j , (x, y, z) représente la coordonnée de l'utilisateur [33]. Une solution facile est de linéariser l'équation en utilisant le développement en séries de Taylor et en créant un algorithme itératif [34].

Dans la Figure. 1.8, deux hyperboles sont formés à partir de la mesure TDOA en trois stations fixes (A,B et C) ils se coupent en un point qui détermine la localisation d'utilisateur P.

Aussi pour le calcul de l'estimation TDOA, la technique de corrélation est utilisée. TDOA peut être estimée à partir de la corrélation croisée entre les signaux reçus à une paire de stations. Supposons que pour le signal émis $s(t)$ le signal reçu à la station i est $x_i(t)$ et que $x_i(t)$ est corrompu par le bruit $n_i(t)$ et retardé par d_i , cependant $x_i(t) = s(t - d_i) + n_i(t)$. De même, le signal $x_j(t) = s(t - d_j) + n_j(t)$ qui arrive à l'unité de mesure j est retardé par d_j et corrompu par le bruit $n_j(t)$.

La fonction de corrélation croisée de ces signaux est obtenue par l'intégration du produit de retard des deux signaux reçus en une période du temps T

$$\hat{R}_{x_i, x_j}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) x_j(t - \tau) dt \quad (1.4)$$

L'estimation du TDOA est la valeur τ qui minimise $R_{x_i, x_j}(\tau)$ i.e. les différences des gammes.

Cette approche possède deux conditions où les stations doivent partager :

- Un temps de référence précis.
- Des signaux de référence.

Mais n'impose aucune condition au point d'utilisateur. Les techniques de traitement du domaine fréquentielle sont souvent utilisées pour calculer τ .

X. Li et al en [35] ont proposé une méthode de mesure retardée basée sur la mesure TDOA qui élimine la condition de la synchronisation dans la méthode précédente.

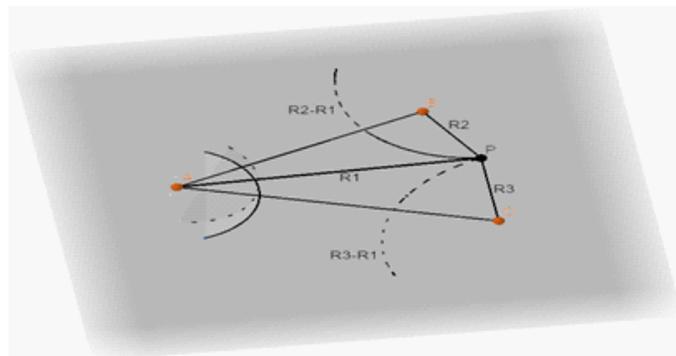


Figure. 1.8- La mesure TDOA utilisée pour le positionnement.

RSS (la force du signal reçu) A l'exception de l'utilisation du temps, il y a une approche alternative qui consiste à estimer la distance du point d'utilisateur à partir d'un certain ensemble de stations en utilisant la propriété du signal reçu. Cette technique utilise l'atténuation de la puissance du signal émis. Les valeurs RSS représentent la force du signal reçu de tous les périphériques sans fil (téléphones mobiles, PDA, adaptateurs de réseau sans fil ou tout autre périphérique équipé d'interfaces WLAN) en décibels (dB) ou en décibels milliwatt (dBm). RSS est la force du signal entrant dans un récepteur. Chaque récepteur mesure un indicateur de puissance du signal reçu (RSSI) qui dépend du fabricant et qui est ensuite mappé sur une valeur RSS (en dBm). Généralement, une valeur RSS plus élevée est générée par un signal fort. Le RSS est proportionnel à la puissance transmise et inversement proportionnel au carré de la distance à la source (dans l'espace libre) ou à une certaine puissance (dans d'autres environnements).

Nommé aussi c'est une méthode à base de l'atténuation du signal essayant de calculer la perte du trajet de signal dû à la propagation. Pour traduire la différence entre la puissance du signal émis et la puissance du signal reçu en une gamme estimée comme présenté dans la figure.1.9 où LS_1 , LS_2 et LS_3 indiquent la perte du trajet mesurée, plusieurs modèles sont utilisés comme la perte du trajet. Dans l'environnement intérieur, il existe plusieurs problèmes qui affectent la performance, parmi eux l'évanouissement multi trajet. Les paramètres utilisés dans ce modèle sont spécifiques aux sites. J.Zhou et al dans [36] ont utilisés les contours RSS pré-mesurées centrées sur les récepteurs avec l'utilisation des mesures multiples dans plusieurs stations pour démontrer l'exactitude de cette méthode. Dans [37] A. Teuber et al, ont utilisés un algorithme de logique flou capable de démontrer l'exactitude de la localisation en utilisant les mesures RSS.

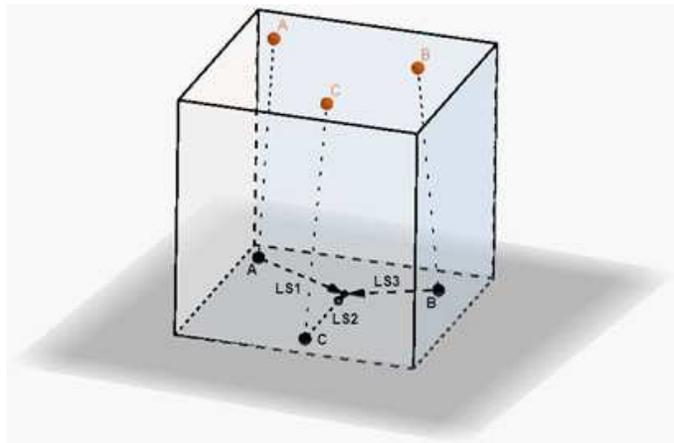


Figure. 1.9- Positionnement basé sur RSS.

RTOF (temps d'aller-retour du vol) La méthode de mesure de la portée est la même que TOA, cette technique consiste à mesurer le temps du vol du signal de l'utilisateur vers la station et faire le retour.

Le problème de conditionnement de synchronisation en TOA est remplacé par une synchronisation d'horloge relativement plus modérée. Le principe de cette méthode est de considéré la station comme un radar commun et l'utilisateur comme un transpondeur qui réagit avec le signal du radar interrogé.

Malgré les avantages de la synchronisation, la connaissance du retard exacte / temps de traitement provoqué par le répondeur est difficile pour la station. Ce retard est ignoré dans les systèmes à longue portée ou moyenne portée. Cependant, pour les systèmes à courte portée, il est un facteur important. Dans [38], une approche utilisant le concept de réflexion modulée est proposée pour surmonter cette contrainte. Dans [39], ils ont présenté un algorithme pour mesurer le temps de propagation de l'air des paquets de l'IEEE 802.11 avec une grande exactitude. Les algorithmes de positionnement pour TOA peuvent être directement applicables pour RTOF. Voir figure. 1.10.

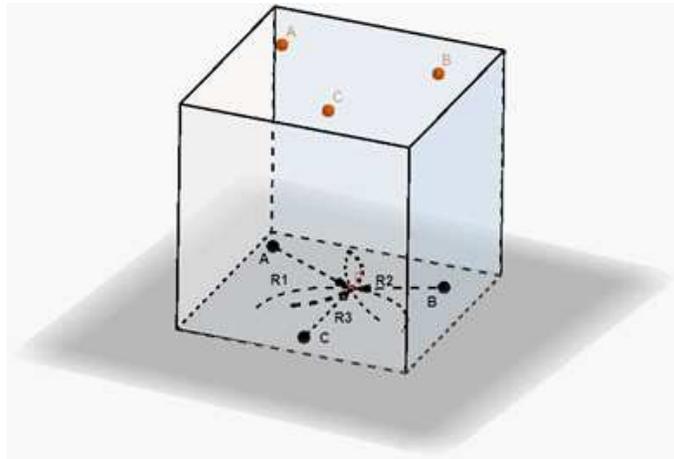


Figure. 1.10- Les techniques ToA /RTOF utilisées dans le positionnement indoor.

Méthode de phase du signal reçu (POA) Cette méthode est également appelée la phase d'arrivée (POA) ; elle dépend de la différence de phase ou la phase de la porteuse pour estimer la portée. Elle suppose que tous les signaux émis sont des signaux sinusoïdaux qui ont la même fréquence, mais le décalage de phase est égal à zéro. Ils nécessitent un retard du temps de transit fini pour calculer la phase des signaux reçus à un point d'utilisateur [30]. Pour plus hautes performances, nous pouvons utiliser cette technique avec TOA / TDOA ou RSS pour obtenir une localisation de positionnement plus précise. Cependant, ce procédé présente un problème car il nécessite un trajet de signal LOS pour surmonter les défis des mesures de la phase de porteuse.

Technique de tri-angulation

L'estimation AOA (Angle d'arrivée) appelée aussi la direction d'arrivée (DOA), son principe est similaires à celui de trilatération mais pour avoir l'angle du signal reçu. L'intersection de plusieurs lignes de direction d'angle nous donne la localisation de l'utilisateur. Comme représenté dans la figure. 1.11, AOA ne nécessite qu'au moins trois stations de mesure pour le positionnement 3-D ou deux stations de mesure pour le positionnement 2-D pour effectuer l'estimation de localisation sans temps de synchronisation entre eux.

L'estimation AOA dite aussi radiogoniométrie, peut être réalisée en utilisant les technologies d'antennes directionnelles. Ainsi, la précision de positionnement est liée à la précision d'angle, en raison d'existence d'ombre et les réflexions des multi trajets provenant des murs et des obstacles. L'angle de la station ne doit pas être toujours l'angle du signal reçu. Un autre problème se pose lorsque l'utilisateur localisé est loin de la gamme où l'estimation de localisation dégrade. Cette méthode contient un matériel grand et complexe [40].

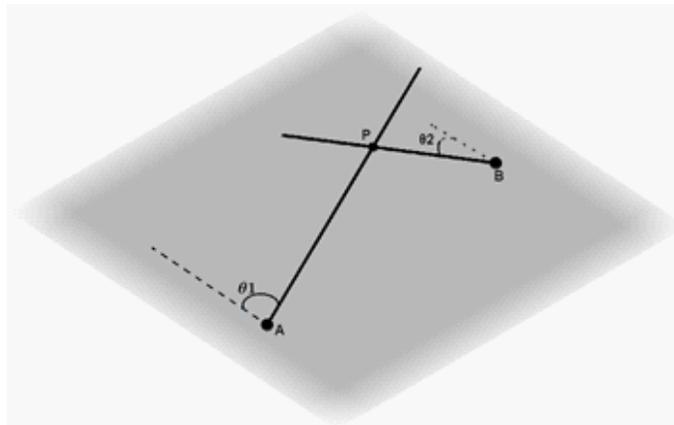


Figure. 1.11- Technique AOA/DOA.

1.3.3 Analyses de Scène (Fingerprinting)

L'analyse de scène est un autre principe consistant à positionner de façon indépendante de la géométrie dans lesquels on utilise les fingerprints. Un fingerprint est la signature

du signal reçu qui différencie la scène à partir d'autres, cela signifie les caractéristiques uniques collectées d'une scène. Elle fonctionne par la collecte des informations de la scène et la comparaison avec les autres existant dans la base de données, puis estimer la localisation d'un objet en faisant correspondre les informations collectées pour chaque scène. La localisation fingerprinting basée sur RSS est couramment utilisée dans l'analyse de la scène.

Cette méthode comporte deux phases : phase hors ligne (formation/construction) et phase en ligne (Estimation) comme illustré dans la figure.1.12 [41]. L'étape hors ligne est basée sur construction d'une base de données dont les caractéristiques sont mesurées par chaque station de l'ensemble de site représentatif de la position possible de l'utilisateur. Au cours de cette étape les coordonnées de localisation et les puissances respectives du signal de stations à proximité sont collectées. Considérant que la deuxième phase consiste à utiliser les caractéristiques mesurées du signal parmi eux, les puissances du signal observées de l'utilisateur et les comparés avec les informations pré-mesurée recueillis dans la phase hors ligne pour trouver un cas similaire dans la base de données pour déterminer une position estimée.

Le défi le plus important pour les techniques basées sur ce type de localisation est l'affectation de la puissance du signal reçu par la diffraction, la réflexion et la diffusion dans les environnements de propagation indoor. En conséquence, on distingue cinq algorithmes de positionnement de fingerprinting qui sont: méthodes probabilistes (ou PDF: fonction de densité de probabilité), k-plus proche voisin (kNN/W-kNN), plus petit sommet de M polygone (SMP), machine à vecteurs de support (SVM) et les réseaux de neurones [17].

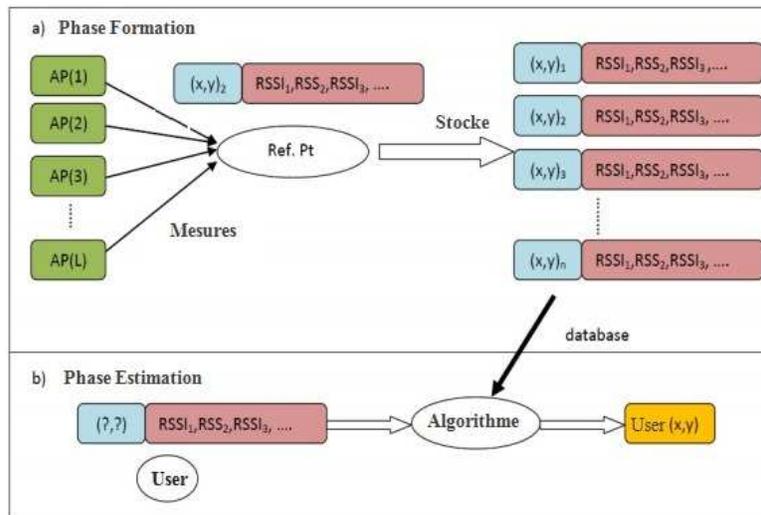


Figure. 1.12- Les deux phases de fingerprinting.

Méthodes probabilistes

Ces techniques utilisent les distributions de puissance du signal reçu au niveau de chaque récepteur. Dans la phase hors ligne, la distribution de puissance reçue est calculée pour chaque récepteur à chaque nœud de maille. Dans la phase en ligne le calcul se fait par l'arrangement du vecteur contenant la puissance mesurée à tous les récepteurs et en appliquant le critère de Bayes, d'où la localisation la plus probable est trouvée. En outre, l'approche du noyau (en anglais kernel) est utilisée dans le calcul de la probabilité où la probabilité de chaque localisation est considérée comme une distribution gaussienne, la moyenne et l'écart-type de chaque localisation peut être calculée. Si les stations sont indépendantes la probabilité globale d'une localisation peut être calculée en multipliant directement les probabilités de toutes les stations. Cependant, l'utilisateur peut être localisée à n'importe quelle position, mais cette approche est applicable uniquement pour les localisations discrets. Pour obtenir des résultats plus précis, une localisation 2-D estimée est donnée comme une moyenne pondérée des coordonnées de tous les positions d'échantillonnage. Il existe d'autres techniques de modélisation probabiliste pour des applications de positionnement dans les technologies sans fil telles que l'étalonnage,

l'apprentissage actif, l'erreur d'estimation et le suivi avec l'histoire où le positionnement basé sur le réseau Bayésien et/ou assisté par un suivi a été proposé [42].

k-plus proche voisin (K-NN)

Tout d'abord, le calcul du plus proche voisin (NN) dans les puissances (forces) de base de données du signal enregistré pendant la phase hors ligne: la méthode consiste à calculer la distance euclidienne entre les caractéristiques mesurées dans la phase en ligne $\hat{p} = [\hat{p}_1 \hat{p}_2 \dots \hat{p}_M]^T$ et ceux stockés dans la base de données. Le point pour lequel la distance euclidienne est minimale est considéré comme représentant de la position de la cible mobile. Deuxièmement, la moyenne des K plus proches voisins (K-NN) dans l'espace de puissance du signal reçu: Cette méthode est une extension de la précédente pour améliorer les résultats. Les coordonnées spatiales des K plus proches voisins en termes de puissance du signal reçu sont calculées pour donner une estimation de la position de la cible mobile. Dans cette approche, K est le paramètre qui est adapté pour une meilleure performance.

Le plus petit sommet de M- polygones (SMP)

Le plus petit sommet de M polygone (SMP) n'est que la localisation de M candidats de chaque point d'accès dont la distance dans l'espace de signal avec la mesure de temps d'exécution donnée sont recherchées à partir de la base de données de localisation. Les sommets de M polygones sont formés en ayant au moins une localisation candidat de chaque point d'accès. Le plus petit polygone est celui ayant le périmètre le plus court. Calculer la moyenne des coordonnées des sommets du polygone le plus petit donne l'estimation de localisation finale. SMP a été utilisé dans MultiLoc [43], [44].

Machine à vecteur de support (SVM)

SVM est une technique prometteuse pour la classification des données et de régression (c.-à-d. l'estimation de position). C'est un outil pour l'analyse statistique et l'apprentissage de la machine. La classification de vecteur de support (SVC) de plusieurs classes et la

régression du vecteur de support (SVR) ont été utilisés avec succès dans la localisation par l'identification des empreintes [45].

Les réseaux de Neurones

RSS et les coordonnées de localisation correspondant sont adoptées en tant que des entrées et des cibles aux fins de formation pendant la phase hors ligne. Après la formation de réseaux de neurones les poids appropriés sont obtenus. En général, un réseau perceptron multicouche (MLP) avec une couche cachée est utilisé pour le système de positionnement à base de réseaux de neurones. Un réseau de neurone perceptron multicouche est composé d'un grand nombre d'unités fortement interconnectés (neurones) travaillant en parallèle pour résoudre un problème spécifique. L'architecture du perceptron multicouche est organisée comme suit: les signaux circulent séquentiellement à travers les différentes couches de l'entrée vers la couche de sortie. Pour chaque couche, chaque unité calcule d'abord un produit scalaire entre un vecteur de poids et un vecteur donné par les sorties de la couche précédente [46].

1.4 Classification des Technologies Sans Fils pour la Localisation Indoor

La technologie sans fil utilisée pour la localisation indoor peut être classée selon la fréquence utilisée. Parce que la fréquence de la technologie sans fil affecte ces capacités telles que la couverture, pénétration de mur et la résistance devant les obstacles. Une comparaison générale de ces technologies en fonction des facteurs tels que : le coût, l'erreur de positionnement, la complexité et la réutilisation potentielle des infrastructures disponibles est fourni dans le tableau 1.1 [28].

Tableau1.1.Comparaison entre les technologies des systèmes de positionnement Indoor (IPS).

Technologie des modèles IPS	l'erreur de positionnement (m)	la complexité	Robustesse	le coût	La réutilisation potentielle des infrastructures
Technologie Wi-Fi.	1-7	Moyenne	la performance dépend de l'algorithme de positionnement et la base de données d'empreintes digitales.	Faible	utilise l'infrastructure Wifi déjà installée.
Technologie GSM	5	Moyenne	les signaux de plusieurs stations de base et la base de données d'empreintes digitales nécessaires pour la précision.	Faible	utilise des stations de base existantes.
Technologie GPS.	5-10	Faible	mauvaise précision due à des signaux d'atténuation.	Faible	nécessite répéteurs GPS.
Technologie Bluetooth	2-5	Moyenne	le rendement (performance) est affecté par les obstacles.	Moyenne	nécessite des balises Bluetooth, serveur de localisation.
Technologie Zigbee.	3-5	Faible	sensibles aux interférences	Faible	exige le module Zigbee.
Technologie de champ magnétique terrestre.	<1	Moyenne	le rendement (performance) est affecté par des objets métalliques.	Moyenne	nécessite un compas magnétique.
Technologie UWB Ultra Wide Band	0.1 - 0.3	Moyenne	sensibles aux trajets multiples et interférences de signaux de réflexion UWB.	Haute	Exige un générateur d'ondes UWB et récepteurs.
Technologie ultrason	0.1-1	Moyenne	les performances sont affectées par d'autres ondes réfléchies.	Haute	exige des émetteurs ultrasonores.
Technologie de son audible	0.4	Faible	influencé par le bruit du son dans les environs.	Faible	exige les capteurs acoustiques.
Technologie RFID Identification par Radiofréquence	1-2	Moyenne	la précision dépend du nombre et du type d'étiquettes.	Faible	exige des étiquettes et des récepteurs RFID.
Technologie IR Infra Rouge	0.1	Faible	le nombre de diodes est au moins la moitié du nombre de paramètres inconnus.	Faible	exige des LED Infra Rouge.
Technologie de la Communication par la lumière visible (VLC).	0.01-0.35	Faible	Restriction du nombre des LED (minimum 3 dans la plupart des cas pour la localisation).	Faible	utilise l'infrastructure d'éclairage LED existant.

Ce tableau démontre clairement que certaines technologies IPS peut réutiliser l'infrastructure disponible tels que les points d'accès Wi-Fi (AP) et les stations de base pour les connexions Wi-Fi et GSM respectivement.

L'erreur de positionnement fournies par la technologie Wi-Fi [41, 47-50] est plus faible par rapport aux techniques basés sur GSM [51] et GPS [52, 53]. Pour utiliser la technologie GPS pour le positionnement indoor, des répéteurs GPS sont nécessaires pour stimuler la réception des signaux GPS. La motivation principale de l'utilisation de la technologie GPS pour la localisation indoor réside dans sa simplicité et la réutilisation des infrastructures existantes. Dans ces solutions les signaux satellites reçus par une antenne extérieure sont amplifiés et ré-rayonnée par l'antenne intérieure fournissant ainsi des signaux GPS en direct à l'intérieur. Divers algorithmes de positionnement sont proposés pour déterminer l'emplacement des récepteurs à l'intérieur à l'aide de ces signaux. Malheureusement, une erreur de positionnement indoor ne soit jamais inférieure à l'erreur du positionnement Outdoor (plusieurs mètres 5-10 m). Les modèles basés sur Bluetooth [54-58] et Zigbee [59, 60] ont également été développés mais ils ont besoin d'infrastructures supplémentaires et ne peuvent pas fournir une erreur de positionnement faible. Les technologies basées sur le champ magnétique de la terre [61] Ultra-Wide Band (UWB) [62-64] et l'ultrason [65] peuvent être utilisées pour développer des modèles IPS très précises. Cependant, le coût et la complexité de ces systèmes est également élevé car ils nécessitent du matériel supplémentaire. Les modèles des IPS qui utilisent le son audible [66-68] exigent des capteurs acoustiques et peuvent être facilement mises en œuvre avec une faible complexité de fournir une précision de localisation modérée. Les techniques d'identification par radiofréquence (RFID) [69-71] proposées à la fin du positionnement nécessitent des balises supplémentaires qui augmentent leur coût global et leur complexité. Les modèles basées sur la lumière infrarouge (IR) [72, 73] peuvent fournir une grande précision de localisation mais nécessitent des LEDs spéciales (la lumière IR).

Il y a aussi des systèmes qui intègrent deux ou plusieurs techniques de localisation afin de mettre au point un modèle IPS précis [8, 74]. Dans [8] ont utilisé un téléphone mobile pour former une base de données des paramètres physiques tels que la lumière ambiante,

la couleur et le son à des positions différentes qui est utilisé lors de l'étape en ligne pour déterminer les coordonnées du récepteur. De même, [74] ont intégré la technologie Wi-Fi avec la technique acoustique pour localiser la gamme large de dispositifs dans un environnement de bureau. Pour la localisation Indoor, la technologie Wi-Fi est un choix plus populaire car les modèles IPS basés sur le Wi-Fi peuvent exploiter les points d'accès disponibles et peuvent également fournir une précision de localisation à quelques mètres avec un coût et une complexité modéré [75]. Enfin, les modèles VLC peuvent fournir une grande précision de localisation (erreurs de positionnement extrêmement faible) tout en utilisant l'infrastructure de l'éclairage intérieur. Cependant, ni Wi-Fi ni aucune autre technologie de modèle IPS peut être considéré comme un favori puisque chaque technologie a ses propres mérites, limites et compromis.

En général, une faible erreur de positionnement signifie une grande précision de localisation qui est un attribut souhaitable pour les modèles IPS.

1.5 Les Caractéristiques des Signaux à l'environnement intérieur

Dans cette section, nous discutons des facteurs fondamentaux qui font la différence entre les canaux VLC et RF, tels que la propriété de longueur d'onde, la réflexion, la diffraction et la transmission. Afin de comparer son comportement avec les signaux RF, nous considérons la lumière visible comme une onde électromagnétique dont la fréquence se situe dans la plage de THz. le premier facteur est la propriété de la longueur d'onde, car l'onde électromagnétique de longueur d'onde (λ) ne peut pas pénétrer à travers l'intervalle qui a une distance égale ou similaire à $(\lambda/2)$. Ainsi, des points de réflexion spéculaires dans chaque bande de fréquences peuvent être modifiés dans différents environnements, parmi lesquels les chemins de propagation dans chaque bande de fréquences. Les points de réflexion spéculaires variés dans chaque bande de fréquence sont considérés comme l'impact majeur de tous les facteurs suivants [76].

1.5.1 Réflexion

Le deuxième facteur qui cause la diversité est la réflexion. Le traitement normal de la réflexion spéculaire est simplifié par la physique optique. La réflexion est une fonction de la fréquence, la polarisation et l'angle d'incidence. En utilisant des points d'accès bi-bande comme émetteurs, les coefficients de réflexion ne sont principalement influencés que par deux facteurs; fréquence d'onde transmise et angles d'incidence de chaque bande de fréquence alternés à partir de la propriété de longueur d'onde (voir figure.1.13). Les coefficients de réflexion des polarisations parallèle et perpendiculaire sont données dans (1.5) et (1.6).

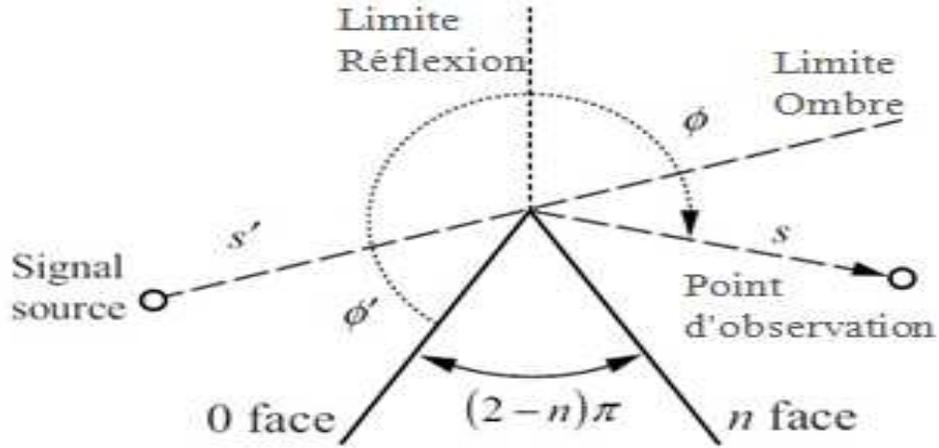


Figure. 1.13- Réflexion indoor.

$$R_{//} = \frac{\eta_2 \sin \gamma_t - \eta_1 \sin \gamma_i}{\eta_2 \sin \gamma_t + \eta_1 \sin \gamma_i} \quad (1.5)$$

$$R_{\perp} = \frac{\eta_2 \sin \gamma_i - \eta_1 \sin \gamma_t}{\eta_2 \sin \gamma_i + \eta_1 \sin \gamma_t} \quad (1.6)$$

où γ_i est l'angle d'incidence par rapport à un plan tangent au point de réflexion et $\eta_{1,2}$ est la permittivité complexe donnée par (1.7).

$$\eta_{1,2} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_{1,2}}{\sigma_{1,2} + j\omega\epsilon_{1,2}}} \quad (1.7)$$

où σ , ε et μ sont la conductivité, la permittivité et la perméabilité de l'air et du matériau réfléchissant et w est la fréquence du rayonnement incident en radians.

1.5.2 Diffraction

Le troisième facteur, la diffraction est également la conséquence de la divergence des points de réflexion spéculaires dans les différentes bandes de fréquences provoquée par la propriété de longueur d'onde et la réflexion. La diffraction est la fonction de la fréquence et de l'angle incident comme présenté dans la figure.1.14. Cela se produit quand il y a un blocage partiel d'une partie du front d'onde par un objet. Le modèle de Luebbers [77] est considéré comme l'un des modèles les plus précis incluant le coefficient de réflexion qui est également la fonction de fréquence dans la théorie uniforme de la diffraction (UTD), comme indiqué dans (1.8).

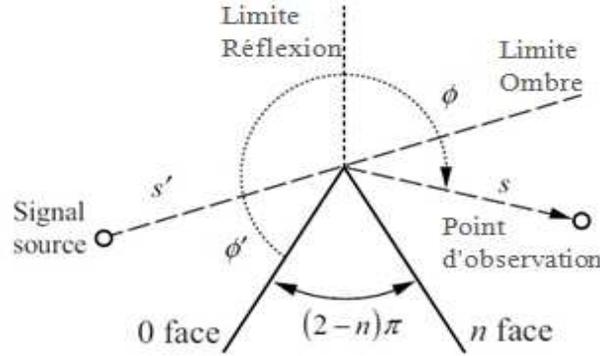


Figure. 1.14- Géométrie de diffraction en 2D.

$$D_{//}^{\perp} = \frac{-e^{j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k}} \left[\begin{array}{l} \cot\left(\frac{\pi+(\phi-\phi')}{2n}\right) F(kLa^+(\phi-\phi')) \\ + \cot\left(\frac{\pi-(\phi-\phi')}{2n}\right) F(kLa^-(\phi-\phi')) \\ + R_{//,0}^{\perp} \cot\left(\frac{\pi+(\phi+\phi')}{2n}\right) F(kLa^-(\phi+\phi')) \\ + R_{//,n}^{\perp} \cot\left(\frac{\pi+(\phi+\phi')}{2n}\right) F(kLa^+(\phi+\phi')) \end{array} \right] \quad (1.8)$$

Où // et \perp dénotent le coefficient de diffraction d'onde incidente parallèle et perpendiculaire respectivement. Les symboles ϕ' et ϕ sont les angles d'incidence et de diffraction,

et $n\pi$ l'angle du coin extérieur. La constante de phase k est directement proportionnelle à la longueur d'onde $n\pi/\lambda$.

Avec le terme de distance L est donné par

$$L = \frac{ss'}{s + s'} \quad (1.9)$$

Où s est la distance entre le bord diffractant et le point du champ qui peut varier dans chaque bande de fréquences en raison de la propriété de longueur d'onde, et s' est la distance entre le bord et la source. Aussi, Le paramètre a est donné par

$$a^\pm (\phi - \phi') = 2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi N^\pm - (\phi \pm \phi')}{2} \right) \quad (1.10)$$

L'intégrale de Fresnel pour corriger les singularités aux limites de l'ombre est donnée par

$$F(x) = 2j\sqrt{X}e^{jX} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau \quad (1.11)$$

Où X représente les différents arguments possibles de $F(\cdot)$.

Dans (1.10), les paramètres N^\pm sont des entiers qui vérifient les équations suivantes :

$$2\pi nN^+ - (\phi \pm \phi') = \pi \quad (1.12)$$

$$2\pi nN^- - (\phi \pm \phi') = -\pi \quad (1.13)$$

Les termes R_0 , R_n désignent les coefficients de réflexion de la face du coin d'incidence (face 0) et de la face du coin opposé (face n). Ils sont calculés pour les polarisations parallèles et perpendiculaire en utilisant (1.5) et (1.6), respectivement.

1.5.3 Transmission

Le quatrième facteur est la transmission qui se produit lorsqu'une onde électromagnétique pénètre d'un milieu à un autre. Une partie de l'énergie est réfléchi et le reste est transmis au deuxième support. L'onde transmise change d'amplitude et de direction à mesure qu'elle se poursuit dans le deuxième milieu. Les coefficients de transmission prennent une

forme similaire aux coefficients de réflexion; la transmission est également fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence, comme indiqué dans les formules qui suit :

$$T_{//} = \frac{2\eta_2 \sin \gamma_i}{\eta_2 \sin \gamma_t + \eta_1 \sin \gamma_i} \quad (1.14)$$

$$T_{\perp} = \frac{2\eta_2 \sin \gamma_i}{\eta_2 \sin \gamma_i + \eta_1 \sin \gamma_t} \quad (1.15)$$

Le RSS des ondes électromagnétiques(EM) transmises à travers le corps humain est fortement atténué par la bande de fréquences de 2,4 GHz [23, 78]. Concernant l'eau qui a également une fréquence de résonance de 2,4 GHz, il joue un rôle important dans le corps humain.

1.5.4 Diffusion

Une surface réfléchissante lisse est une surface idéalisée que l'on ne rencontre que rarement dans des environnements de propagation réels. Les surfaces généralement rencontrées présentent des variations aléatoires comme dans la surface de la terre qui présente des variations systématiques telles que les murs et les toits de structures artificielles. En fonction de la longueur d'onde du signal sans fil, la hauteur de ces variations peut être significative ou non en termes de calcul d'amplitude de réflexion. Dans les cas extrêmes, la surface peut sembler être une pure dispersion. Le degré de rugosité ou le critère sur lequel il convient de prendre en considération la rugosité est souvent donné par [79], également appelé critère de Rayleigh:

$$h_R = \frac{\lambda}{8 \sin \gamma_0} \quad (1.16)$$

Où h_R est la différence entre les variations maximales et minimales de la surface. Pour une fréquence de 2 GHz et un angle d'incidence de 20 degrés, $h_R = 5,5$ cm. Le terrain et les surfaces extérieures des bâtiments peuvent facilement présenter des variations de surface plus importantes. Dans figure.1.15, on a récapitulé les principaux types de propagation des signaux dans l'environnement intérieur.

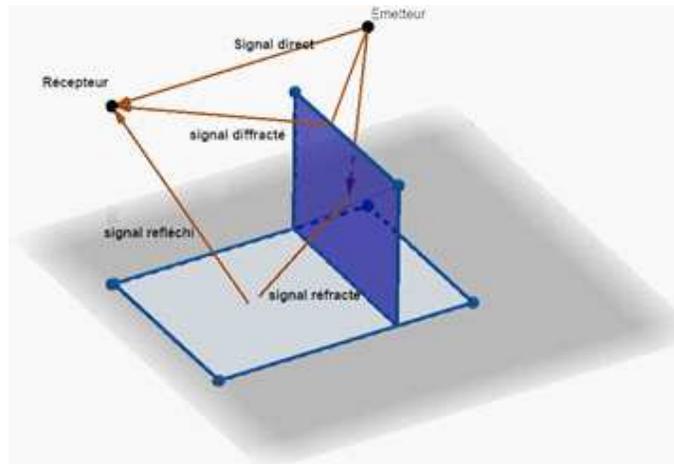


Figure. 1.15- Principaux types de signaux dans un environnement intérieur.

1.6 Localisation Indoor Sans Fil pour des Applications Industrielles

Auparavant, on a discuté sur les services basés sur la localisation, puis on a souligné l'importance de la localisation indoor car la plupart des activités humaines se déroulent dans un environnement intérieur. La partie principale de ce chapitre portait sur les notions des technologies de localisation indoor. Pour cela, une question se pose : **Quelle est la valeur de la localisation indoor pour le secteur industriel?**

Le succès de l'industrie moderne résulte dans la coopération entre l'homme, les machines et les équipements. Avec la croissance rapide de l'industrie, les technologies de l'information et de la communication (ICT) jouent un rôle de plus en plus important pour aider les grandes, petites et moyennes entreprises (SMEs) à optimiser leurs performances de gestion. Cependant, du fait que ces solutions ICT actuelles ne permettent pas de fournir les informations exactes à la bonne personne, les ICT constituent déjà un défi pour les gestionnaires [80]. Il est urgent de mettre en œuvre ces plates-formes ICT avec une capacité de prise de conscience pour ce contexte [81].

1.6.1 Gestion de l'Activité de Travail

Lorsque le gestionnaire peut connaître la localisation des travailleurs en temps réel ou que le système peut enregistrer la trajectoire des travailleurs liée aux informations de temps. Le responsable peut donner des instructions à la bonne personne en fonction de son emplacement actuel. Le système d'enregistrement de trajectoire peut assurer que les ouvriers ou le policier font leur travail correctement. Ceci est extrêmement important lorsqu'il s'agit de l'inspection quotidienne de l'infrastructure d'usine ou des patrouilles de sécurité. Peng Lin [82] a utilisé son système pour surveiller le comportement en temps réel des chantiers de construction de grands barrages afin de mieux documenter, analyser et comprendre les performances des travailleurs et d'améliorer les mauvaises pratiques. Pour atteindre cet objectif, le système prédéfini par la trajectoire est supposé suit, puis la position des ouvriers en temps réel est surveillée et enregistrée afin qu'elle puisse tracer une trajectoire réelle. En comparant ces deux trajectoires par la distance euclidienne, déformation temporelle dynamique (DTW) ou sous-séquence commune la plus longue (LCSS), l'analyse du comportement peut être effectuée. Les données collectées peuvent être envoyées aux ingénieurs industriels pour améliorer les performances et peuvent être utilisées par les ressources humaines (HR) comme référence pour évaluer le comportement au travail de chaque travailleur.

1.6.2 Gestion des Risques et Secours d'Urgence

La sécurité est une question vitale pour toutes les activités industrielles. La localisation indoor peut aider à gérer les risques et à porter secours en cas de catastrophe.

Dans un système de localisation indoor, une zone sensible aux risques peut être marquée. Lorsque le système détecte toute personne autre que les employés liés à la maintenance, il peut avertir la personne qui approche et le responsable lorsque cela est nécessaire. Lorsqu'un travailleur détecte une nouvelle situation de risque il peut aider à mettre à jour le système. Le système peut donc alarmer d'autres collègues.

Lorsqu'un accident survient, il peut être difficile pour l'équipe de sauvetage de retrouver le blessé. Ils ne savent pas combien de personnes sont piégées et où elles se trouvent. Le

système de localisation indoor peut fournir ces informations lorsque le système fonctionne encore ou indiquer le dernier poste de travail lorsque des infrastructures connexes sont en panne. Cette information peut aider l'équipe d'urgence à sauver les gens de manière efficace et confiante.

Dans ses travaux ultérieurs dans [83], Peng Lin a développé un système de localisation indoor avec la fonction d'évaluation du risque de Réseau Neuronal Artificiel (RNA) afin d'améliorer la gestion de la sécurité pour les travailleurs des tunnels. Dans ce système, la position en temps réel des travailleurs équipés d'un Smartphone est surveillée. Ils peuvent signaler et partager des informations sur les risques en temps réel et être alarmés lorsqu'ils approchent d'une zone de risque. La société peut créer et entretenir un système de gestion des problèmes de risques en fonction des informations communiquées.

1.6.3 La Maintenance en Usine

Les échelles d'usines se développent à une vitesse rapide, la mise en page du site est mise à jour fréquemment. Grâce aux capteurs et au système de réseau sans fil, la position des appareils est beaucoup plus flexible que jamais. D'une part, cela présente des avantages considérables pour le développement de l'industrie mais d'autre part cela pose des défis extraordinaires au travail de maintenance. De nos jours, les usines sont équipées de machines de pointe qui nécessitent une maintenance professionnelle par un prestataire de services externe ou par un fournisseur de machines [84]. Il est important de réduire le temps nécessaire aux ingénieurs pour accéder à l'appareil.

Dipl dans son travail [85], a expliqué en détail que les informations de contexte spatial peuvent considérablement optimiser le processus de maintenance dans l'usine intelligente moderne. Le service de localisation indoor aide l'ingénieur à trouver le périphérique cible de manière rapide et efficace et à améliorer la qualité des services et des processus. Cela peut conduire à une meilleure accessibilité des appareils et à une efficacité globale de l'équipement [86].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents critères d'évaluation d'un système de localisation indoor quelque soit la technologie utilisée. Puis, nous avons discuté les principes et les algorithmes utilisés dans le domaine de localisation. Ensuite, un récapitulatif d'une vue bibliographique sur les systèmes IPS pour différentes technologies est présenté. Les caractéristiques des signaux dans l'environnement intérieur et l'application de la localisation dans domaine industriel sont présentées. De ce fait, les systèmes RF ont montré des limitations pour certains scénarios. Au delà, la nouvelle technologie de communication par la lumière visible attire l'attention comme un élément complémentaire aux technologies RF et parfois le seul candidat. Dans le prochain chapitre, nous nous intéressons aux différentes caractéristiques des systèmes VLC. Nous présentons notamment les domaines d'applications, les fonctionnements des émetteurs et récepteurs, et aussi les méthodes permettant de déterminer la propagation d'un signal optique au sein d'un environnement et de modéliser le canal de communication.

2.1 Introduction

Dans les années récentes, la société moderne a connu une progression intéressante dans le domaine des technologies : communications / transfert des données sans fil, on prévoit que cette dernière va croître exponentiellement pendant les prochaines années [87]. Outre les considérations écologiques majeures liées à la production et au recyclage de tels appareils, et sachant que le terme « sans fil » désigne essentiellement les technologies radiofréquences (RF) (30KHz à 300GHz), le challenge principal est la saturation du spectre électromagnétique. Pour faire face à l'accroissement de connectivité, de nombreuses solutions et techniques avancées [88] sont envisagées dans les futures normes (5G) tout en essayant de limiter le coût énergétique et indirectement l'impact écologique (l'effet du carbone).

Une solution alternative pour surmonter les problématiques est d'utiliser une technologie complémentaire aux radiofréquences au-delà de 300 GHz. Ce domaine est celui de l'optique sans fil. La technologie optique sans fil se présente aujourd'hui comme une alternative aux technologies radiofréquences (RF) dans différents domaines d'applications et peut constituer une opportunité d'autant plus que le spectre RF devient limité en bande

passante. De plus, il existe des cas ou des scénarios dans lesquels l'utilisation des RF peut causer des interférences, par exemple dans les avions, les aéroports ou les hôpitaux. L'architecture d'un lien optique est semblable à celle d'un lien RF à part que les ondes radios sont remplacées par les ondes optiques et que les antennes sont remplacées par des composants optoélectroniques. La fréquence des signaux optiques utilisés varie entre 300 GHz et 30 Peta-Hertz (PHz). Le spectre des communications optiques sans fil comprend donc les longueurs d'ondes en infrarouge (IR), en visible light (VL) et en ultraviolet (UV) comme illustré dans la figure.2.1, [89].

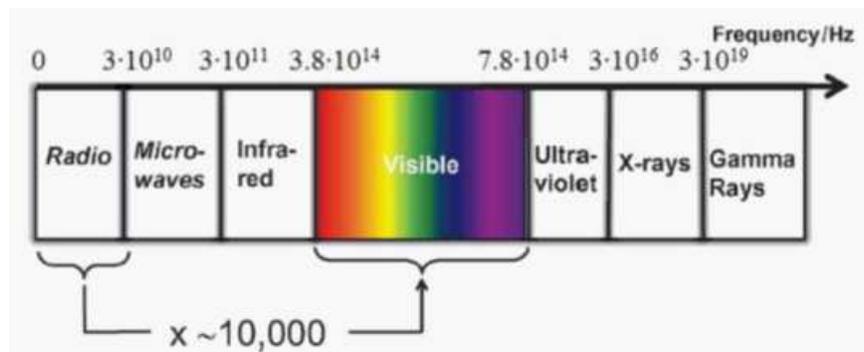


Figure. 2.1- Le spectre électromagnétique.

Au cours de ce chapitre, nous commencerons par présenter la définition et le principe de fonctionnement des communications par la lumière visible sans fil. Nous détaillerons ensuite les spécificités liées au domaine du visible (Visible Light Communication ou VLC) en présentant les avantages et inconvénients, les différents domaines d'applications. Après une brève description des algorithmes de positionnement existants associés à cette technologie, un état de l'art des travaux similaires. Puis, nous présentons l'architecture générale d'un système VLC-IPS. Tous ces éléments permettent de définir le contexte de la thèse lié aux applications de positionnement indoor ainsi que les différentes problématiques étudiées dans ce document.

2.2 Technologie de communication par la lumière visible (VLC)

2.2.1 Définition et principe de fonctionnement

Définition

La VLC est une technologie de communication sans fil basée sur l'utilisation de la lumière visible comprise entre la couleur bleu et la couleur rouge. Il s'agit d'un protocole qui transforme le Wi-Fi en VLC via la lumière des LED (Diode Electroluminescente). Alors que le Wi-Fi utilise la partie radio du spectre électromagnétique, la VLC utilise le spectre optique et repose sur l'envoi de données par une modulation et selon un protocole bien définis et standardisés.

Principe de fonctionnement

Parce que les LEDs sont des semi-conducteurs, elles ont la capacité de s'éteindre et de s'allumer avec des temps de l'ordre nanoseconde. En allumant et en éteignant plusieurs milliers de fois par seconde, on peut transmettre des informations en créant une fréquence. Si une LED est allumée, elle transmet un bit 1, si elle est éteinte, un bit 0 (voir figure.2.2). Les changements de fréquence sont si rapides qu'ils ne sont pas visible par l'œil humain qui ne perçoit pas le clignotement et ne voit qu'une lumière fixe. En termes de débit, cela correspond à 1 Gbits/s contre un débit d'ordre 100 Mbits/s pour le Wi-Fi, soit 10 fois plus faible [90].

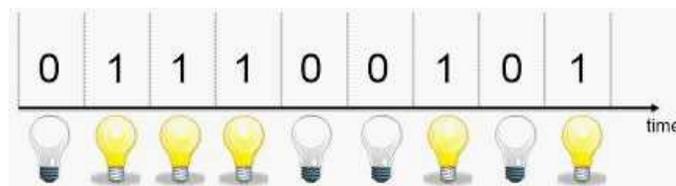


Figure. 2.2- le principe de fonctionnement.

2.2.2 Avantages et inconvénients

Avantages

Comparées aux technologies RF, les communications VLC sans fil présentent de nombreuses caractéristiques très avantageuses [91-93]. Tel que :

- **Bande passante large**

La bande passante disponible est supérieure à celle des RF et de plus elle est non régulée. La VLC prend plusieurs avantages et ça en utilisant le spectre de la lumière visible qui est compris entre 380 et 780 THz, ajoutant 400 THz de la bande passante pour la communication sans fil.

- **Technologie sans restriction**

Un autre point est que la technologie optique est robuste par rapport aux perturbations électromagnétiques, sans influence aux équipements électronique ce qui est un avantage dans les environnements sensibles aux ondes RF tel que les hôpitaux, avions, zones industrielle,

- **Sécurité**

D'autre part, elle offre une grande sécurité où les rayons optiques ne traversent pas les murs et les obstacles, on peut voir les données et leur sécurité tout simplement en fermant la porte .On effet la VLC est adéquate pour les applications militaires ou dans les zones de haute sécurité. Comme illustré dans la figure 2.3.

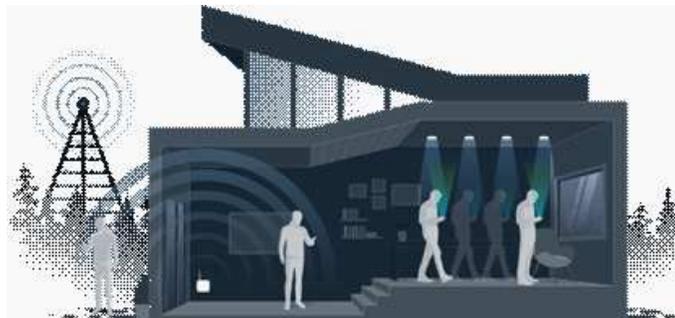


Figure. 2.3- La sécurité pour la VLC.

- **Faible cout d'implémentation et économie d'énergie**

1. Le premier facteur est que la bande passante est libre (pas de licence).
2. Deuxième facteur qui aide la VLC de réduire le coût de la mise en œuvre de certains systèmes est que la lumière est naturellement omniprésente.
3. Troisième facteur est que les composants optiques principalement les LEDs et les photo-détecteurs sont moins couteux grâce à certains de ses caractéristiques.

En outre, la VLC n'utilise pas une puissance supplémentaire pour la communication (au niveau émetteur), la même lumière qui est utilisé pour éclairer est exploitée pour porter les données. Aussi, l'utilisation des LEDs qui consomment moins d'énergie et réduisent le CO₂.

- **Technologie inoffensive**

Par ailleurs, Il faut noter aussi que cette technologie est inoffensive pour la santé humaine.

Inconvénients/limitations

Malgré ces avantages, cette technologie a des inconvénients/limitations. Les systèmes de communication optique sans fil sont affectés par les blocages des personnes ou les obstacles présents dans l'environnement. Ces systèmes opèrent dans des environnements où les différentes sources de bruit optique (comme la lumière du soleil, les lampes à incandescence et fluorescentes) détériorent les performances. De plus, le porté de transmission est limité.

2.2.3 Domaine d'Application

Milieu d'application

Il existe deux types de communications optiques sans fils selon l'environnement : en espace libre ("Outdoor" ou "Free-Space") et en espace confiné (fermé) ("Indoor"). Les applications en espace libre sont très variées, où nombreuses utilisations en extérieur sont également possibles notamment dans le contexte des smart villes, des systèmes de

transports intelligents et des communications entre bâtiments [94]. D'autre part, les liens en espace confiné concernent des applications à courtes portées, ce qui correspond comme exemple au milieu hospitalier, zone industrielle, centre commerciaux, musée, etc...

Comme on peut l'observer sur l'illustration de la figure 2.4, un des objectifs est de s'inscrire dans le développement de l'inter-connectivité des personnes avec leur environnement intérieur. Il s'agit du type d'application le plus couramment considéré car 70% des communications sont effectuées en intérieur [95].



Figure. 2.4- Illustration des applications utilisant les VLC en milieu intérieur.

Source : <https://www.theengineer.co.uk>

Domaine d'application

Grâce aux avantages de cette technologie, nombreuses applications sont effectués dans différents domaines. Parfois elle peut être le seul choix et des fois une solution complémentaire pour la communication radiofréquence.

- **Transmission de données (Li-Fi)**

Parmi les plus importantes applications du VLC on cite le Li-Fi (Light-Fidelity). Grâce à l'énorme bande passante disponible, la VLC offre une connexion internet à haut débit à partir des LEDs installé au plafond [96-100]. Cette application est plus adaptée aux courtes distances (distance entre plafond et bureau). Voir figure 2.5.



Figure. 2.5- l'utilisation de la VLC pour la connexion sans fil (Li-Fi).

- **La création des lieux intelligents**

La communication par la lumière visible pourrait être également utilisée pour créer des endroits intelligents comme dans les musées, les informations sur l'exposition peuvent être fournies à des utilisateurs des Smartphones ou des tablettes en utilisant l'éclairage intérieur [101]. Voir la Figure 2.6.

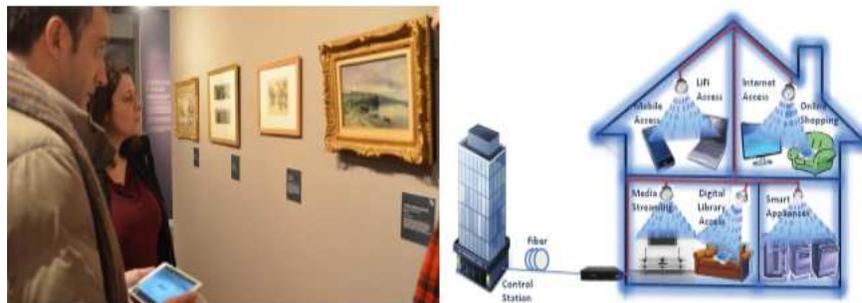


Figure. 2.6- l'utilisation de la VLC au musée et smart home.

- **Le transport intelligent**

On peut exploiter la technologie de la VLC dans le système du transport intelligent (ITS), et ce en communiquant véhicule-véhicule (V2V) et/ou infrastructure-véhicule (I2V). Les voitures situées sur la même ligne peuvent également se communiquer

entre eux au sujet de leur état mécanique, comme la vitesse, l'accélération, l'action de freinage ou d'autres données pour améliorer la circulation et la sécurité [102, 103]. Voir la figure 2.7.



Figure. 2.7- l'utilisation de la VLC dans les applications automobiles.

- **Les communications sous marine**

Tant que la communication radiofréquence n'est pas valable à l'environnement sous marine, la VLC peut être utilisé dans cet environnement [104]. Cette dernière peut fournir une communication de courte portée qui permet au plongeur de communiquer avec l'autre ou avec la base comme montré dans la figure 2.8.



Figure. 2.8- application sous marine

- **Zone d'interférence**

En raison de ces avantages, la VLC peut être utilisé dans les zones où la communication RF pose des problèmes, tels que les hôpitaux [106], les avions, les environnements dangereux où il y a un risque d'explosion, comme les mines, les usines chimiques ou les plateformes pétrolières. Voir la figure 2.9.



Figure. 2.9- l'utilisation de la VLC dans l'hôpital et l'avion.

- **La localisation et Le positionnement**

Avec ses nombreux avantages, la technologie VLC offre une solution prometteuse à la problématique de la localisation et navigation indoor. Ce type d'application a fait l'objet de nombreuses études et est l'une des premières solutions commercialisées [107, 108]. Les méthodes classiques de triangulation, de trilatération ou de fingerprinting associées aux VLC permettent à l'heure actuelle d'obtenir des précisions de localisation de l'ordre du centimètre, alors que par exemple on est autour du mètre en Wi-Fi [108]. La puissance générée par les éclairages permet en effet d'améliorer drastiquement les performances. De plus, il est possible d'établir facilement un suivi du signal entre les différentes pièces, de par la continuité des sources d'éclairages installées.

- Pour les applications de navigation, le récepteur est considéré comme étant mobile. On le représente généralement par un téléphone ou une tablette portée par un utilisateur. L'industrie de la grande consommation s'intéresse particulièrement à ce

genre d'application. En effet, cela permet par exemple d'indiquer au client la localisation d'un produit ainsi que le chemin pour s'y rendre. On peut notamment citer le fabricant Phillips qui s'est lancé ces dernières années dans le développement de ce type de systèmes [109]. De ce fait, les applications combinant positionnement et mobilité offrent des perspectives très prometteuses. Cependant, il reste de nombreux défis à relever, et notamment parmi eux celui lié aux conséquences de la mobilité du dispositif dans un milieu fermé.

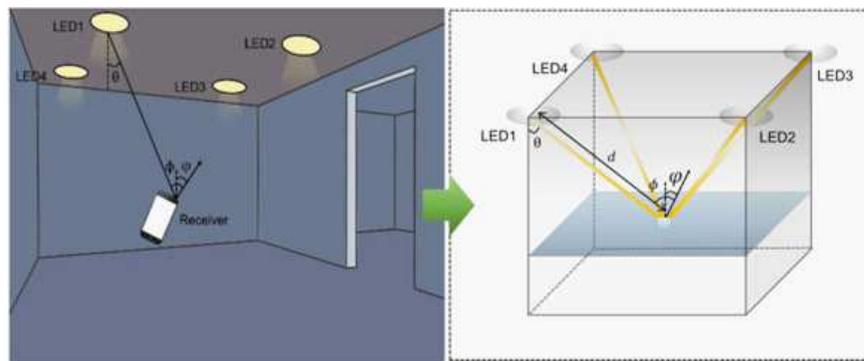


Figure. 2.10- Application de la localisation.

2.3 Notions de base pour la communication optique sans fil indoor

2.3.1 Modulation d'Intensité et Canaux de Détection Directe IM/DD

Les communications optiques sans fil sont basées, quelle que soit la bande de fréquence utilisée, sur la technique de modulation d'intensité associée à une détection directe (IM/DD Intensity Modulation–Direct Detection). La modulation de l'intensité (IM) est obtenue en faisant varier le courant de polarisation de la source optique. Contrairement au cas des RF où l'information peut être contenue dans l'amplitude, la phase ou la fréquence de la porteuse, elle est contenue ici dans la puissance instantanée. Le signal transmis est donc

réel et positif. En réception par détection directe, le composant de réception produit un photo-courant proportionnel à la puissance optique incidente. La figure 2.11 propose une illustration de ce concept.

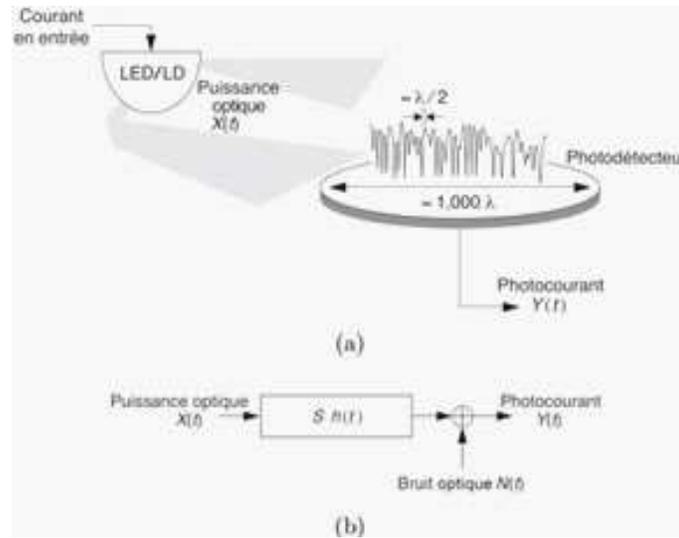


Figure. 2.11– (a) Schéma de transmission/réception IM/DD d’une liaison optique sans fil. (b) Modélisation de la liaison par la réponse impulsionnelle du canal $h(t)$, le bruit additif $N(t)$ et la sensibilité S du photo-détecteur [91].

Le schéma de transmission le plus courant dans les systèmes optiques sans fil est appelé IM/DD « Intensity Modulation/Direct Detection ». L’émetteur représenté par une DL (diode laser ou une LED émet un signal optique exprimé par sa puissance $X(t)$ en appliquant une modulation d’intensité. Donc, la puissance optique moyenne émise P_t est exprimée par :

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (2.1)$$

T étant le symbole du temps. Cette puissance moyenne est importante pour la caractérisation d’une liaison optique sans fil, car elle doit respecter les standards internationaux liés à la sécurité oculaire, qui fixent une puissance maximale P_{max} en fonction de la longueur d’onde utilisée pour la transmission, donc $P_t \leq P_{max}$ [110].

Le signal $X(t)$ va ensuite se propager à travers le canal considéré comme stationnaire et représenté par sa réponse impulsionnelle $h(t)$, sur laquelle vient s'ajouter le bruit $N(t)$. Le récepteur représenté par un photo-détecteur caractérisé par une sensibilité S (A/W), reçoit le signal $Y(t)$ en employant une détection directe. Donc, le signal reçu $Y(t)$ peut s'exprimer sous la forme suivante [111, 112] :

$$Y(t) = S(X(t) * h(t)) + N(t) \quad (2.2)$$

Les liaisons optiques sans fil, comme les liaisons radio, sont soumises aux effets de dispersion dus à la propagation multi-trajets. Cette dispersion est plus présente dans le cas des liaisons non-directionnelles.

Pour les deux systèmes, la propagation par trajets multiples provoque des chutes d'amplitude sévères à l'échelle d'une longueur d'onde. Par conséquent, un détecteur de dimension inférieure à une longueur d'onde éprouverait des évanouissements dus à ces trajets multiples.

Cependant, les récepteurs optiques sans fil ont des zones de détection avec une largeur d'environ 1000 fois la longueur d'ondes (Figure 2.11(a)), ce qui implique que le photocourant total généré est proportionnel à l'intégrale de la puissance optique sur la surface du photo-détecteur. Cette propriété des photo-détecteurs offre une diversité spatiale naturelle, empêchant ainsi les phénomènes d'évanouissement multi-trajets [110, 113].

A partir de la réponse impulsionnelle du canal, on peut définir le gain statique $H(0)$ du canal optique sans fil :

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (2.3)$$

La puissance optique moyenne reçue est donnée par

$$P_r = H(0)P_t \quad (2.4)$$

Le bruit $N(t)$ est composé d'un bruit thermique et d'un bruit ambiant dus aux sources optiques naturelles et artificielles.

2.3.2 Gain statique du canal

La réponse fréquentielle des canaux optiques est relativement plate près du courant continu (DC). Ainsi, dans la plupart des cas, la quantité de signal la plus importante caractérisant un canal est le gain statique $H(0)$, qui relie les puissances moyennes émises et reçues via l'équation (2.4).

Nous considérons la géométrie du lien représentée à la figure 2.12. Supposons que l'émetteur émette un diagramme de rayonnement à symétrie axiale décrit par l'intensité radiale $P_t R_0(\phi)$ (W/sr). Ici, $R_0(\phi)$ est normalisé de sorte que $2\pi \int_0^\pi R_0(\phi) \sin \phi d\phi = 1$. Au récepteur, situé à une distance d et un angle ϕ par rapport à l'émetteur, l'irradiance en (W/cm^2) est :

$$I_s(d, \phi) = P_t R_0(\phi) / d^2 \quad (2.5)$$

La puissance reçue est

$$P_r = \begin{cases} I_s(d, \phi) A T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2.6)$$

Où $T_s(\psi)$ est le gain du filtre, $g(\psi)$ le gain du concentrateur et ψ_c est le FOV du concentrateur.

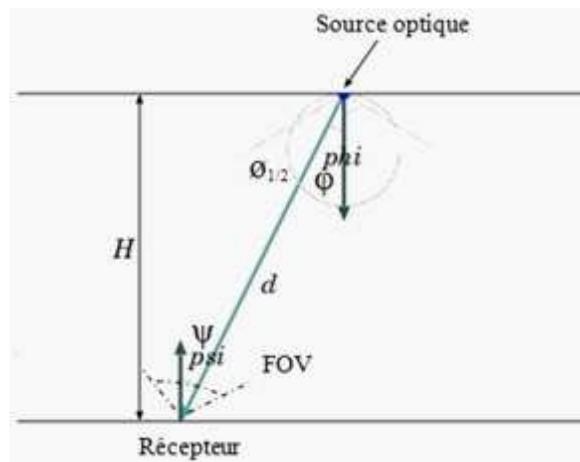


Figure. 2.12- Calcul du gain statique du canal.

Dans cette thèse, pour simplifier, nous supposons que $T_s(\psi) = 1$ et $g(\psi) = 1$. On obtient le gain statique du canal:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{A}{d^2} R_0(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2.7)$$

Ce que nous observons est proportionnel à d^{-2} . D'après l'équation (2.10), nous observons que si d et $R_0(\phi)$ sont fixes, le moyen le plus efficace d'augmenter consiste à augmenter $H(0)$ la surface de détection A .

Il est possible de modéliser raisonnablement l'émission d'émetteurs LOS pratiques en utilisant une intensité radiale Lambertienne généralisée [114].

$$R_0(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi) \quad (2.8)$$

L'ordre m est lié à $\phi_{1/2}$, l'angle à mi puissance, donné par

$$m = \frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (2.9)$$

Donc, le gain statique du canal est donné par

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m \phi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2.10)$$

2.3.3 Les sources de bruits

Dans le domaine des communications VLC, il existe de nombreuses sources de bruits. Elles peuvent être induites par le canal optique, comme le bruit optique ambiant issu de sources externes, ou bien générées localement par le récepteur (principalement associées au bruit thermique).

Le bruit optique ambiant

Ce bruit est souvent considéré comme la principale limitation dans le domaine de l'optique sans fil. Il est caractérisé par les perturbations provenant des sources lumineuses autres que le système d'émission présent dans l'environnement. Ainsi, la photodiode en réception

peut détecter de la lumière parasite pour le signal utile. Ce phénomène est illustré dans la figure 2.13. On observe dans ce cas que, pour les longueurs d'ondes du visible, les sources de bruits optiques prédominantes sont liées au soleil et aux sources artificielles telles que les lampes à incandescence ou fluorescentes. Lorsque que l'on s'éloigne vers l'infrarouge, on note que le bruit généré par les lampes fluorescentes devient nul.

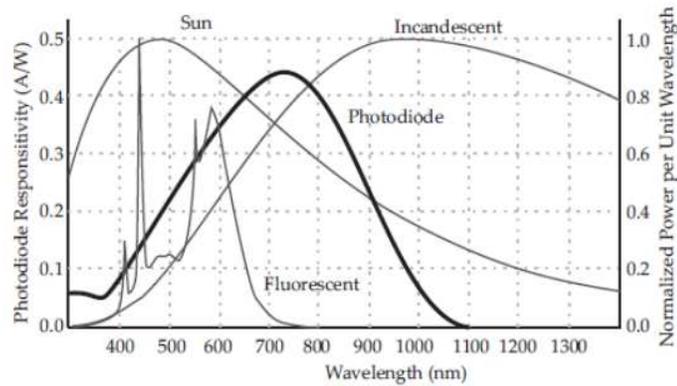


Figure 2.13- Impact des différentes sources de bruits optiques comparé à la réponse en fréquence d'une photodiode [115].

On modélise généralement le bruit optique ambiant par une distribution de Poisson. Etant indépendant du signal émis, on le représente classiquement par un bruit blanc Gaussien [116]. Il est caractérisé par un photocourant I_b au niveau de la photodiode qui dépend de la puissance de la lumière ambiante et de la sensibilité du composant. On peut exprimer la variance associée au bruit optique par [116, 113]:

$$\sigma_{shot}^2 = 2q (I_r + I_b) B \quad (2.11)$$

Avec q la charge d'électron élémentaire ($\approx 1.6 \times 10^{-19} C$) et B la bande passante de la photodiode. La valeur du photocourant I_r est liée à l'intensité du signal reçu. Celle-ci correspond au bruit pouvant être généré aléatoirement par le mouvement des électrons lors

de la création d'un courant électrique. On considère cependant qu'en pratique, $I_b \gg I_r$ [113]. De ce fait, on peut approximer la variance liée au bruit ambiant par :

$$\sigma_{shot}^2 = 2qI_bB \quad (2.12)$$

De par sa faible variation en fonction de la longueur d'onde, on considère généralement pour le domaine de l'infrarouge une valeur de $I_b = 200\mu A$ [114]. Cependant, dans le cas du visible, les nombreuses longueurs d'ondes considérées peuvent faire varier cette valeur en fonction de la source de bruit. Le tableau 2.1 propose des exemples de valeurs de I_b pour le domaine du visible avec les sources optiques perturbatrices associées [117]:

Tableau 2.1 Valeur du photocourant I_b généré en fonction de la source dans le domaine du visible [117]

Sources	Photocourant I_b	
	Sans filtre optique	Avec filtre optique
Lumière du soleil directe	5100 μA	1000 μA
Lumière du soleil indirecte	740 μA	190 μA
Lumière incandescente	84 μA	56 μA
Lumière fluorescente	40 μA	2 μA

On observe que, de manière évidente, la principale source de bruit optique ambiant dans le domaine du visible provient du soleil. Il est donc important d'utiliser des filtres pour diminuer les composantes indésirables collectées en réception. La lumière du soleil qui est non-modulée induit un courant DC en sortie du photo-détecteur qui peut être facilement éliminée par un filtre électrique de type passe-haut. D'autre part, des filtres optiques de type passe-bande sont utilisés pour réduire les interférences provenant de l'éclairage artificiel et ne laissent passer que le rayonnement de l'émetteur [118]. Il est possible également de réduire le bruit ambiant en optimisant la configuration du récepteur, par exemple en changeant l'orientation par rapport aux sources perturbatrices.

Le bruit thermique

Le bruit thermique dû à l'agitation thermique des électrons est lié à l'électronique du récepteur, en particulier au type d'amplificateur utilisé (classiquement un amplificateur courant/tension ou trans-impédance) mais aussi aux composants électroniques associés (résistance, transistors bipolaires, à effet de champ...). Ce bruit est propre à chaque composant, et même s'il est possible de le réduire en optimisant leur fabrication, il est impossible de l'éliminer totalement. Il est fonction de la conductivité du matériau, de sa température et est généré indépendamment du signal reçu. On le considère classiquement comme étant un bruit blanc Gaussien, sa densité spectrale de puissance étant indépendante de la fréquence. Sa variance peut être généralisée par [119] :

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4KT_eB}{R_L} \quad (2.13)$$

Avec K la constante de Boltzmann, T_e la température absolue du système, R_L la résistance équivalente du circuit. Il existe d'autres types de bruit (par exemple liés à la capacité du détecteur) mais qui sont majoritairement négligeables par rapport au bruit optique ambiant et au bruit thermique. La variance du bruit total est alors la somme de celles du bruit optique ambiant et du bruit thermique, les deux correspondantes à un bruit blanc Gaussien :

$$\sigma_{noise}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (2.14)$$

2.4 Algorithmes de positionnement basés sur VLC

2.4.1 Algorithmes de positionnement basés sur VLC

Les algorithmes de positionnement basés sur RF qui ont été développés pour les systèmes de positionnement indoor ceux-ci sont également applicables aux systèmes de positionnement VLC-IPS. Ces approches sont classées dans les quatre catégories suivantes (illustrées à la figure 2.7): proximité, trilatération, triangulation et fingerprinting. De plus, les propriétés de signaux principales utilisées sont RSS, TOA / TDOA ou AOA [101].

Proximité: Normalement, les lampes d'intérieur à LED sont placées à 2 ou 3 mètres l'une de l'autre. Cette méthode peut donc être appliquée dans les cas où des estimations grossières sont suffisantes.

Trilatération: les algorithmes de positionnement basés sur la trilatération doivent utiliser au moins trois LED avec des positions connus dans le système.

Triangulation: AOA est l'algorithme le plus populaire pour déterminer l'emplacement par triangulation.

Empreinte digitale: la même chose pour la technologie RF, elle consiste de deux étapes: hors ligne et en ligne. Les conceptions VLC-IPS actuelles adoptent principalement l'algorithme de prise de fingerprints basé sur RSS.

2.4.2 Etat de L'art sur les systèmes VLC-IPS

Avec le passage de l'éclairage électrique à l'électronique et l'omniprésence de la lumière dans les environnements intérieurs, la lumière visible pourrait s'avérer être la prochaine infrastructure de communication à exploiter pour les services de positionnement. La lumière visible est l'une des solutions les plus viables pour le positionnement indoor en raison de sa directivité, de sa réponse impulsionnelle courte, ainsi que de la distribution et de la disponibilité des LEDs pour répondre aux besoins d'éclairage des espaces intérieurs. Le travail dans la zone de positionnement basé sur la lumière visible est relativement nouveau comparativement, offrant ainsi la possibilité de nombreuses opportunités à explorer encore. Malgré leur nouveauté, des efforts ont été déployés pour définir des normes internationales pour l'adoption du positionnement par la lumière visible tout en maintenant l'intégrité de l'éclairage et pas nécessairement le VLC (JEITA CP-1222) [120].

Nous résumons notre évaluation d'état de l'art les systèmes de positionnement VLC-IPS dans le tableau 2.2 en fonction des critères de performance Exactitude (Accuracy), Complexité et Coût.

Tableau.2.2: Récapitulatif de l'état de l'art des systèmes VLC-IPS

Algorithme de positionnement		Exactitude (Accuracy) cm	Complexité	Coût	Références
Proximité	RSS	<130	Moyenne	Faible	[126]
Trilatération	RSS	40,6, 1.5, 8, 1.5, 7, 40, 3.2, 7.3, 4.78, 6, 3.9, 53, 70, 30, 20, 3, 15, 1.58, 0.44, 14.	Faible	moyen	[127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141], [142], [143], [144], [145], [146], [147]
	TOF	2 à 6	Faible	moyen	[148]
	TDOA	14, 14, 3, 3, 68.2, 1, 1, 2, 500	Faible	moyen	[149], [150], [151], [152], [153], [154], [155], [156], [157], [158], [159]
	Proximité	4.5,200,60, 12.9	Faible	moyen	[160], [161], [162], [163], [164], [165], [166]
	Vision	7, 10,5, 10, 30, 150,85.	Faible	moyen	[167], [168], [169], [170], [171], [172], [173], [174]
	Hybride	0.5, 20,50, 10.5, 100, 50,20	Faible	moyen	[175], [176], [177], [178], [179], [180], [181], [182]
Triangulation	AOA	30, 25, 6,10, 5	moyenne	moyen	[183], [184], [185], [186], [187], [165], [188], [189], [166]
Fingerprinting	RSS	14.84, 26.4, 81, 6,60, 3	moyenne	Elevé	[190], [191], [192], [193], [185], [194]

2.5 Architecture générale d'un système VLC-IPS

Le système de la communication par la lumière visible consiste principalement, d'un émetteur qui module la lumière produit par les LEDs, un récepteur basé sur un élément photosensible utilisé pour extraire le signal modulé à partir de la lumière et un canal où la visibilité directe est une condition obligatoire. le schéma du système VLC est illustré dans la Figure.2.14 [103].

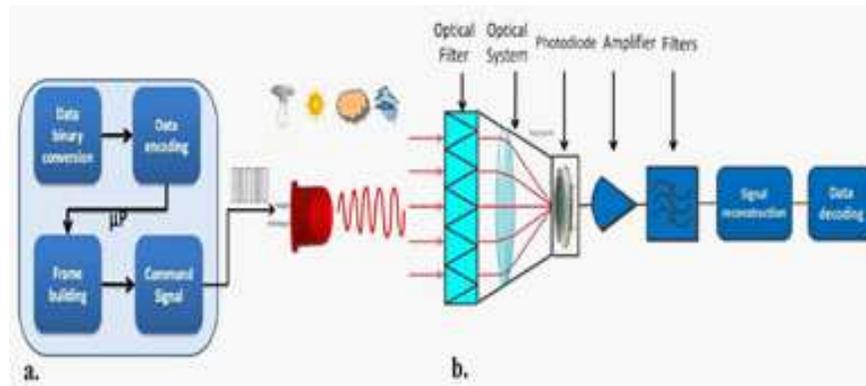


Figure. 2.14- Architecture du système VLC : a) Émetteur, b) Récepteur.

2.5.1 Module d'émission

Dans le domaine des communications par optique sans fil, les principaux composants utilisés en émission sont les diodes. Il en existe principalement deux types : les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes laser (LD).

En VLC, les LED sont privilégiées en raison de leur faible coût et de leur large surface d'émission, permettant de produire des faisceaux optiques plus diffus, facilitant ainsi le respect des contraintes d'éclairage ainsi que celles liées à la sécurité oculaire.

Les LD ont de meilleures performances que les LED en termes de bande passante et de rendement mais elles émettent généralement des faisceaux très étroits, devant alors respecter des contraintes de sécurité oculaire. Il est possible d'utiliser des diffuseurs afin de palier à cette limitation, cependant ces composants sont très onéreux. Les LD sont classiquement utilisées pour des applications plus spécifiques, par exemple point à point à très haut débit [96, 100, 105].

Sources LED

Le composant communément appelé LED consiste en un matériau semi-conducteur dopé avec des impuretés afin de créer une jonction p-n. Comme pour les diodes classiques, le courant circule facilement par le côté n, ou cathode, mais ne peut pas aller dans l'autre direction (Figure 2.15).

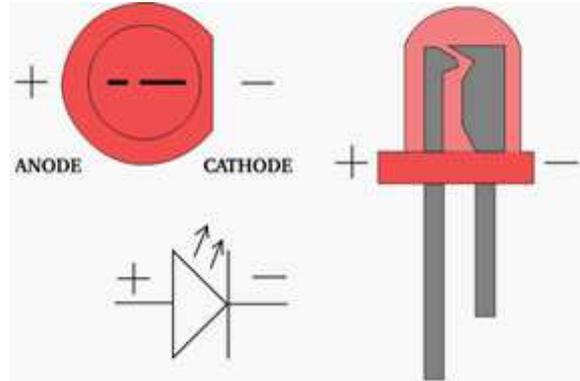


Figure. 2.15- représentation standard d'un composant LED.

La puissance optique générée par ce composant dépend du courant I qui la traverse. Cependant, la relation n'est pas complètement linéaire. Généralement, on choisit d'utiliser les LED uniquement dans leur partie linéaire afin d'en faciliter l'étude. De ce fait, on ne tiendra pas compte dans ce document du comportement non-linéaire du composant.

Une autre caractéristique importante des LED est la réponse fréquentielle. Elle dépend essentiellement de la durée de vie des porteurs de charge du semi-conducteur et de la capacité parasite et est lié aux longueurs d'ondes émises. On considère généralement que le comportement d'une LED peut être modélisé par un filtre passe bas RC du premier ordre. La bande passante correspondante est alors exprimée par la fréquence de coupure f_c à -3dB :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = B \quad (2.15)$$

Où B correspond à la bande passante du composant. Cette valeur peut également s'exprimer à partir du temps de montée t_r (rise time) de la LED. Il s'agit du temps nécessaire pour que le signal passe de 10% à 90% de sa valeur maximale, ce qui donne $t_r = \frac{1}{RC} \ln(9)$.

On peut donc en déduire que

$$B = \frac{\ln(9)}{2\pi t_r} \approx \frac{0.35}{t_r} \quad (2.16)$$

Dans le cas des LED n'émettant qu'une seule longueur d'onde (rayonnement monochromatique), la génération de celle-ci dépend du matériau utilisé. Deux familles de matériaux sont utilisées pour la fabrication de LED : les semi-conducteurs inorganiques ou organiques. Selon le matériau, la couleur de la lumière émise va de l'ultraviolet à l'infrarouge. Historiquement, le matériau privilégié dans le proche infrarouge est l'arséniure de gallium (GaAs) dopé au silicium ou au Zinc. Ce matériau a l'avantage d'être peu coûteux tout en fournissant des caractéristiques très correctes, notamment en termes de bande passante. Par la suite, La substitution partielle de l'arsenic par le phosphore dans GaAs a permis l'apparition de la première LED visible apparaît en 1962, elle est rouge.

En 1993, la première LED bleue est créée en utilisant du nitrure de gallium-Indium (InGaN). C'est l'étape cruciale avant les LED blanches qui a fait d'ailleurs l'objet d'un prix Nobel pour ses inventeurs en 2014 [184].

Concernant les LEDs organiques, ou OLED, étudiées depuis les années 1990, elles sont généralement élaborées par des techniques de dépôt potentiellement à bas coût, sur des substrats rigides ou flexibles, en polymère [185,186]. Ces composants produisent une plus forte intensité que les LED inorganiques ainsi qu'une consommation en puissance réduite. Ils ont suscité un grand intérêt auprès des chercheurs et des industriels pour la réalisation d'afficheurs et d'écrans souples. Les OLED émettant de la lumière blanche (WOLED pour «white » OLED) font l'objet de nombreuses recherches car elles permettent de diminuer encore plus la consommation électrique liée à l'éclairage. Aujourd'hui, leur principale limitation pour une utilisation VLC réside dans leur coût trop élevé et dans le fait que leur bande passante est très inférieure à celle des LED et LD classiques, limitant ainsi les débits atteignables.

Même si la technologie OLED est très prometteuse, les LED inorganiques restent pour l'instant le principal composant utilisé pour les communications par optique sans fil.

LED inorganique pour une lumière blanche

De manière conventionnelle, l'éclairage au sein d'une pièce est réalisé avec des LED de lumière dite « blanche ». Elle est constituée d'un mélange hétérogène de toutes les

couleurs composant le spectre visible. Actuellement, il est très difficile à partir d'une LED seule de générer une lumière blanche. Pour se faire, on utilise principalement deux types de méthodes:

- Les LEDs Rouge-Vert-Bleu (RVB) ou Red-Green-Blue (RGB) (Figure 2.16. (a))

Ce sont des compositions de 3 LED de couleurs distinctes : rouge, verte et bleue. Il s'agit des trois couleurs dites « primaires ». En les combinant, il est possible d'obtenir n'importe quelle couleur. On peut donc les utiliser pour obtenir une lumière blanche. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'adapter la lumière générée en modulant avec précision le signal émis par chacune des LED. Ces composants sont généralement plus onéreux que les LED bleues phosphores, et leur utilisation est aussi plus complexe.

- Les LED bleues avec phosphore (Figure 2.16. (b))

Les LED bleues avec phosphore consistent à associer un semi-conducteur émettant du bleu avec une couche de phosphore, habituellement jaune directement sur le substrat. Une partie de l'émission bleue est absorbée par le phosphore qui réémet des photons avec des longueurs d'onde plus longues, de telle sorte que se superposent les 2 émissions en sortie de la LED, donnant l'impression d'une lumière blanche. Ces composants ont l'avantage d'être peu coûteux et faciles d'utilisation. Cependant, la qualité de la lumière blanche est difficile à contrôler.

Il faut également noter que les LED RVB possèdent une bande passante bien plus importante que celles au phosphore bleu. En effet, les LED monochromatiques possèdent une bande passante d'une centaine de MHz, mais les LED bleues avec phosphores sont limitées à quelques MHz, notamment à cause de la réponse temporelle du phosphore. Même en utilisant des méthodes de sélection de fréquence en réception, par exemple en ne gardant que la lumière bleue, il est difficile d'obtenir une bande au-delà de 20 MHz [113, 187].

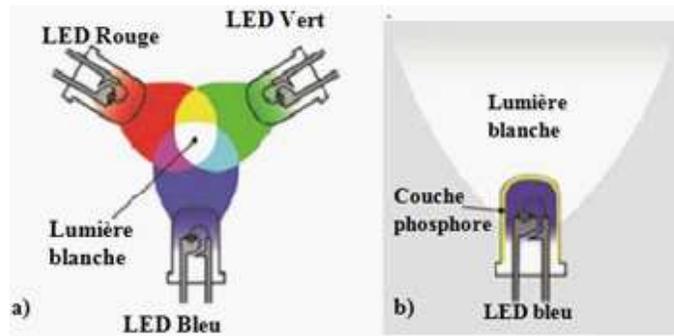


Figure. 2.16- Génération d'une lumière blanche avec : (a) une LED rouge-vert-bleu, (b) une LED bleue avec phosphore.

Radiométrie et Photométrie

La radiométrie et la photométrie sont deux domaines de métriques associées à l'étude de systèmes VLC permettant notamment de traduire une notion de puissance.

La radiométrie concerne la mesure des rayonnements électromagnétiques compris entre 3.81014 et 7.81014 Hz, incluant donc les longueurs d'ondes de la VLC sans fil. Elle permet d'exprimer la capacité d'une source à transmettre de la lumière dans un large spectre. La photométrie diffère de la radiométrie par le fait que celle-ci ne s'intéresse qu'à ce que l'œil humain peut percevoir. On peut la considérer comme la réponse de l'œil humain aux diverses longueurs d'ondes du spectre lumineux (sensibilité de l'œil représentée sur la figure 2.17).

Il est possible d'utiliser une approximation par une fonction gaussienne pour traduire la sensibilité de l'œil humain [113] en fonction de la longueur d'onde λ :

$$V(\lambda) \approx 1.019e^{-285.4(\lambda \cdot 10^{-6} - 0.559)^2} \quad (2.17)$$

On peut noter que $V(555nm) \approx 1$, signifiant ainsi que la sensibilité est maximale pour la couleur verte.

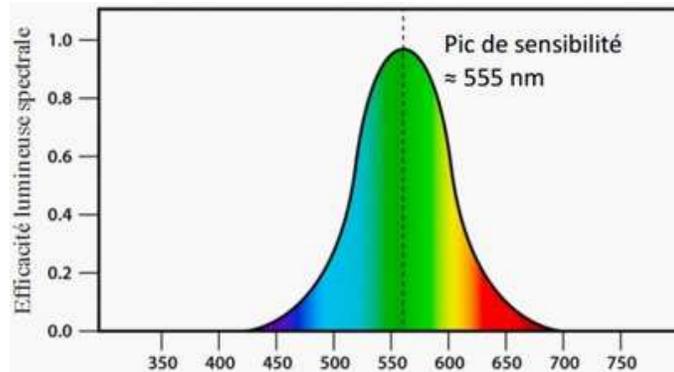


Figure. 2.17- Evolution de la sensibilité de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde

Source : <http://www.npl.co.uk>.

2.5.2 Canal de transmission

Le modèle équivalent d'un lien de communication IM/DD est décrit selon le schéma de la figure 2.11 (b). $Y(t)$ correspond au photo-courant généré au niveau du récepteur et $X(t)$ est la puissance optique instantanée émise. Celle-ci a la particularité d'être toujours positive. De plus, elle doit respecter les contraintes liées à la sécurité oculaire. Comme présenté dans les paragraphes précédents, la puissance optique moyenne émise est également imposée par les contraintes d'éclairage d'un environnement donné en ce qui concerne les VLC.

Les différents types de propagation des liens optique sans fil

La Réponse Impulsionnelle (RI) $h(t)$ est définie pour une configuration de transmission optique qui dépend des caractéristiques des transmetteurs, de leur positionnement et de leur orientation dans l'environnement. De manière générale, les modes de propagation en optique sans fil sont séparés en deux catégories comme illustré dans la figure.2.18 :

- En ligne de vue, ou Line Of Sight (LOS) pour lesquels il existe un lien optique direct entre l'émetteur et le récepteur.

- En trajet indirect, ou Non-Light-Of-Sight (NLOS) qui utilisent les réflexions sur les surfaces de l'environnement pour établir le lien entre émetteur et récepteur.

De plus, on peut qualifier une configuration de directive, non directive ou hybride en fonction de la directivité de l'émetteur et du récepteur. Dans le cas LOS directif, l'émetteur et le récepteur sont très directifs. A l'opposé, en LOS non directif ils ont des angles d'ouvertures larges. On a également les cas intermédiaires appelés LOS hybride où un seul des transmetteurs est directif. Dans le cas du NLOS, on retrouve les mêmes différenciations. Le cas NLOS non directif est une configuration connue sous le nom « diffus ». La plupart des études considèrent des configurations LOS directif ou LOS Hybride. En effet, le récepteur étant souvent immobile, il est préférable de privilégier des configurations où l'on a la possibilité de créer un lien sans obstruction ni réflexion entre l'émetteur et le récepteur, et ce afin d'obtenir les meilleures performances possibles.

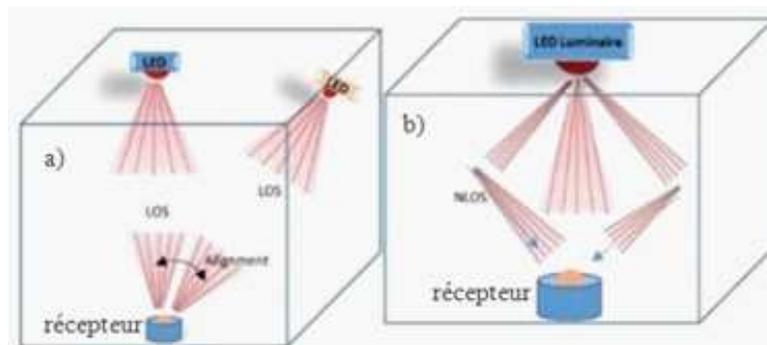


Figure. 2.18- Mode de propagation a) LOS, b) NLOS

Lorsqu'on considère une liaison VLC avec des émetteurs fixes (luminaires) et des récepteurs immobiles à l'intérieur de l'environnement, on se situe dans une configuration LOS et NLOS comme le cas étudié dans ce travail.

Lien LOS Le lien LOS correspond au trajet qui relie directement l'émetteur au récepteur. Il est donc inversement proportionnel au carré de la distance d entre émetteur et récepteur. L'émetteur est considéré Lambertien, son intensité rayonnée est donnée par l'équation (2.8).

Le flux détecté au niveau du récepteur dépend de la zone de collecte de la photodiode.

On ne considère ici ni de concentrateur ni de filtre au niveau de la réception. La figure 2.19 propose une illustration de la propagation du lien. On peut donc ainsi exprimer la RI $h_{LOS}(t)$ d'un canal de communication LOS par l'équation [119] suivante:

$$h_{LOS}(t) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m \phi \cos \psi \delta \left(t - \frac{D}{c} \right), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (2.18)$$

Où ϕ et ψ représentent respectivement les angles d'irradiance et d'incidence du rayon optique, $\delta(\cdot)$ est la fonction Dirac et D/c est le retard correspondant au temps qu'il faut aux photons pour passer de la lampe au récepteur à la vitesse de la lumière c .

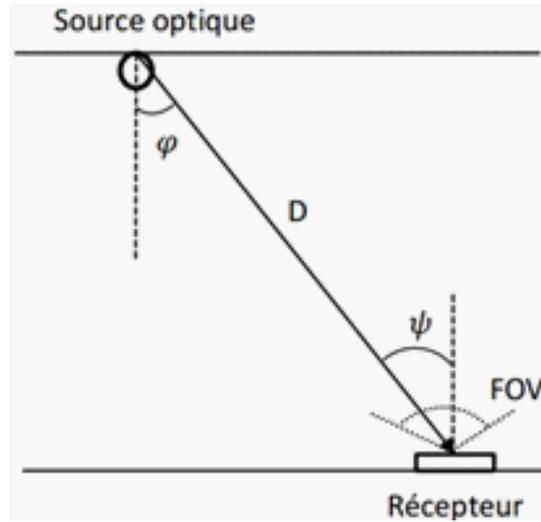


Figure. 2.19- Illustration d'un lien LOS entre un émetteur et un récepteur.

A partir de la réponse fréquentielle du canal LOS on peut définir le gain statique $H_{LOS}(0)$ qui correspond à l'atténuation, c'est-à-dire au rapport entre la puissance moyenne reçue P_r et la puissance moyenne émise P_t :

$$H_{LOS}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m \phi \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (2.19)$$

Ce sont les liens de types LOS qui permettent d'obtenir les plus fortes valeurs de gain et ce d'autant plus que la configuration est directive (ϕ et ψ faibles). Cependant, ils

sont très sensibles aux phénomènes de blocages, limitant ainsi leur contribution dans des scénarios où le récepteur est mobile.

Lien NLOS La contribution NLOS se compose des réflexions à partir de différents chemins optiques en fonction de la géométrie de la pièce, de la réflectance spectrale des surfaces et éventuellement des objets. Ces réflexions arrivent au photorécepteur à un instant légèrement différé par rapport à la composante LOS, tout en étant atténuées.

Pour déterminer le type de réflexion produit par une surface, on utilise le critère de Rayleigh, qui dépend de la longueur d'onde λ , de la hauteur des irrégularités ς et de l'angle d'incidence du rayon θ sur la surface considérée [188]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \varsigma > \frac{\lambda}{8 \sin \theta} & \text{diffus} \\ \varsigma \leq \frac{\lambda}{8 \sin \theta} & \text{spéculaire} \end{array} \right\} \quad (2.20)$$

Il a été montré [189] que, en considérant le spectre optique, la plupart des revêtements intérieurs (murs, plafond, sols ...) respectent le critère de Rayleigh. Ainsi, pour la suite de cette étude, nous considérerons des réflexions de type diffus avec un ordre $m = 1$. On parle alors de surfaces Lambertiennes.

Dans le cas d'une réflexion sur une surface lambertienne, on peut définir la RI $h_{NLOS}^1(t)$ de toutes les contributions de la première réflexion sur N_R éléments réfléchissants de l'environnement :

$$h_{NLOS}^1(t) = \frac{A(m+1)}{2\pi d^2} \sum_{j=1}^{N_R} \rho_j \cos^m(\phi_{1j}) \cos(\phi_{2j}) \frac{\cos(\psi_{1j}) \cos(\psi_{2j})}{d_{1j}^2 d_{2j}^2} \Delta A \cdot \delta\left(t - \frac{d_{1j} + d_{2j}}{c}\right) \quad (2.21)$$

Où ϕ_{1j} est l'angle d'irradiance de la source, ψ_{2j} l'angle d'incidence au niveau de la surface du récepteur, ϕ_{2j} et ψ_{1j} sont respectivement les angles d'irradiance et d'incidence par rapport à l'élément de surface, et ρ_j est la réflectivité de l'élément de surface de taille ΔA .

La figure 2.20 propose une illustration de ces différents paramètres. A partir de cette équation, il est possible d'utiliser une méthode récursive afin de déterminer la contribution

apportée par une réflexion d'ordre K en utilisant les contributions précédentes [113,116]. Considérer un nombre élevé de réflexions augmente donc de manière significative la complexité du calcul.

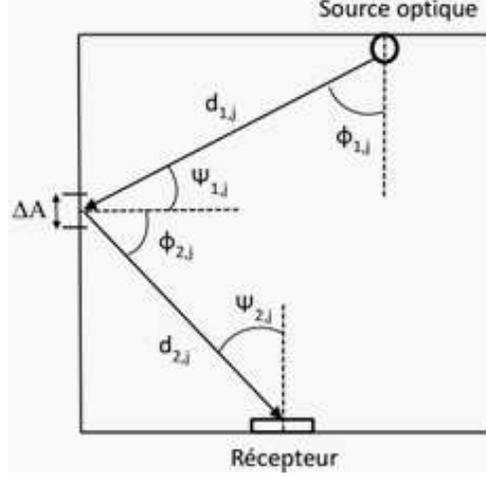


Figure. 2.20- Illustration d'un lien à une réflexion entre un émetteur et un récepteur.

Liens LOS+NLOS

En utilisant les équations (2.18) et (2.21), on peut déterminer l'expression totale de la RI pour une source. En considérant une source unique, celle-ci correspond simplement à la somme des RI issues du lien LOS et des liens NLOS après K réflexions :

$$h_{total}^1(t) = h_{LOS}(t) + h_{NLOS}^k(t) \quad (2.22)$$

Il est possible de généraliser cette équation pour un nombre de sources N :

$$h_{total}(t) = \sum_{i=1}^N h_{LOS}(t) + \sum_{i=1}^N h_{NLOS}^k(t) \quad (2.23)$$

A partir de cette équation, on peut définir le gain statique total $H_{total}(0)$ comme étant :

$$H_{total}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{total}(t) dt \quad (2.24)$$

Généralement, on utilise la valeur du gain statique pour déterminer la puissance optique moyenne reçue P_r par un récepteur à partir de la puissance moyenne P_t émise par la source :

$$P_r = H_{total}(0)P_t \quad (2.25)$$

L'ensemble des signaux ayant différents trajets et différents temps de propagation, l'intervalle d'observation de $h_{total}(t)$ pour le calcul de $H_{total}(0)$ doit être suffisamment grand pour pouvoir prendre en considération la majeure partie des contributions. De ce fait, à partir de l'étalement de la RI et selon le débit visé on peut déterminer la distorsion lié au multi-trajet pouvant conduire à de l'interférence entre symboles (IES).

Ce phénomène intervient généralement lorsque le débit D est élevé. Dans ce cas de figure, il est nécessaire d'isoler la partie $P_{R,Sig}$ liée au signal pendant le temps symbole $T_s = 1/D$ de celle liée à l'IES, nommée ici $P_{R,IES}$ [119] :

$$\left[\begin{array}{l} P_{R,Sig} = P_r (t \leq T_s) \\ P_{R,IES} = P_r (t > T_s) \end{array} \right] \quad (2.26)$$

L'impact de l'IES sur la puissance reçue sera donc majoritairement lié à la proportion du signal contenu dans $P_{R,IES}$.

Détermination de l'éclairement moyen

Comme nous l'avons vu précédemment, la fonction principale d'une LED blanche dans le cadre des VLC est de fournir un éclairage suffisant pour son environnement. En ce sens, il est nécessaire de pouvoir déterminer le niveau d'éclairage généré par une LED. Ce paramètre est appelé illuminance, et il est exprimé en lux (lx). Il est défini comme la quantité de lumière reçue par unité de surface.

Le calcul de l'illuminance est très similaire à celui du gain optique, sauf que le récepteur est représenté par l'œil humain. L'émetteur, est lui toujours composé de LED. Cependant, le rayon optique transmis est supposé constant. Celui-ci se caractérise notamment par son intensité lumineuse $I(0)$, donnée en candela.

On peut donc exprimer, en s'aidant de l'équation (2.19), l'éclairement en un point associé à un rayon lumineux incident [190] :

$$E_{LOS} = I(0) \frac{\cos^m(\phi) \cos(\psi)}{d^2} \quad (2.28)$$

On observe ici que, contrairement au gain optique, l'éclairement ne dépend pas du FOV du récepteur, car on considère que l'illumination reçue en un point peut être omnidirectionnelle.

On peut de la même manière utiliser l'équation (2.21) pour exprimer la contribution due à la première réflexion optique :

$$E_{NLOS}^{(1)} = \frac{I(0) \cos^m(\phi_1) \cos(\phi_2) \cos(\psi_1) \cos(\psi_2) \Delta A \rho_1}{\pi d_1^2 d_2^2} \quad (2.29)$$

Vu cette équation, on peut considérer que, comme pour la détermination de la RI pour plusieurs réflexions, l'éclairement obtenu après K réflexions optiques s'obtient en fonction de la valeur $E_{NLOS}^{(k)}$. De ce fait, on peut déterminer l'éclairement total en un point fixe pour une source donnée par la relation suivante :

$$E_{total} = E_{LOS} + E_{NLOS}^{(k)} \quad (2.30)$$

En théorie, comme pour le gain optique, la valeur de l'éclairement en un point est constituée d'une somme infinie de réflexions. En pratique, l'éclairement apporté par les diverses réflexions diminue significativement lorsque l'ordre de réflexion augmente. De ce fait, on a tendance à limiter le nombre de réflexions optiques prises en compte (généralement égal à 1) [190].

Les modulations dans le domaine des VLC

Il existe plusieurs techniques de modulations associées aux communications par optique sans fil. Dans le cadre des VLC, la sélection d'une modulation en particulier se fait selon différents critères :

- La fiabilité de la transmission : celle-ci doit permettre l'envoi de données pour respecter les contraintes en termes de taux d'erreur.

- Adaptation à l'effet de scintillement : pour des débits trop faibles ou des différences trop élevées entre les niveaux des symboles, l'œil humain est susceptible de percevoir un phénomène de scintillement de la lumière, ce qui peut être très désagréable.
- La technologie des sources : les contraintes d'utilisation diffèrent selon que l'on utilise une LED blanche classique ou des LED RVB.
- L'efficacité spectrale : même si les systèmes de communication par optique sans fil disposent d'une bande passante importante, celle-ci peut être limitée par différents paramètres comme la bande passante des composants d'émission/réception ou les perturbations multi-trajets des rayons optiques.
- Facteurs divers : coût, maintenance, complexité ...

Dans le premier standard IEEE 802.15.7 [191], différents types de modulations sont proposés : modulation On-Off Keying (OOK), Variable Pulse Position Modulation (VPPM) et Color Shift Keying (CSK). Cependant, de nombreux travaux ont montré l'intérêt d'utiliser des modulations multi-porteuses telles que l'Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) mais celles-ci ne sont pas encore implémentées dans les standards pour les VLC.

La Modulation OOK

La modulation binaire OOK est l'une des plus simples dans le domaine des communications, en particulier pour les systèmes IM/DD. Celle-ci n'est composée que de deux symboles (0 ou 1), chacun de durée T fixe (temps symbole).

Dans cette illustration, on considère que le symbole '0' correspond à l'absence d'émission optique pendant une durée T . Le symbole '1' correspond à l'émission d'un signal optique à la puissance $2P_t$ pendant le même temps. Ainsi, pour une émission équiprobable, la puissance moyenne émise est égale à P_t . Ce mode particulier de modulation OOK est appelé OOK-« No-Return to Zero » (NRZ) par opposition à l'OOK-RZ (Return to Zero) où le signal revient à 0 avant le temps T .

Malgré sa facilité d'utilisation, cette modulation est très sensible aux phénomènes de scintillements. En effet, si l'on ne respecte pas une certaine homogénéité dans l'apparition

des symboles, une suite trop longue de 0 pourra être perçue par l'utilisateur comme le fait que la source est éteinte pendant une brève période de temps.

Dans IEEE 802.15.7 la modulation OOK est proposée en utilisant des symboles de type Manchester au lieu de symboles NRZ. Pour un code de Manchester, un '0' est représenté par une impulsion optique suivit de l'absence de lumière. C'est l'inverse pour le symbole '1'.

Un comparatif des deux types de symboles est représenté dans la figure 2.21.

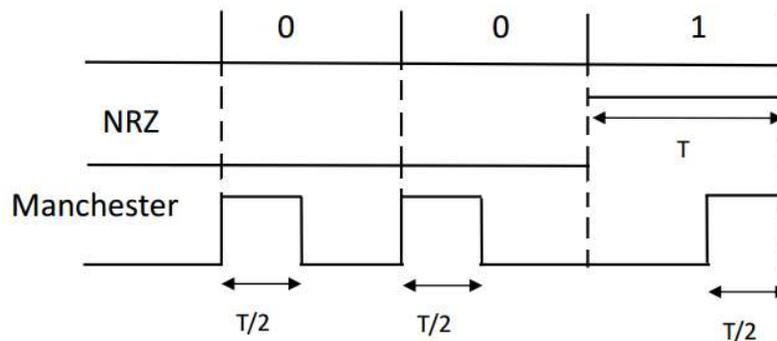


Figure. 2.21- Comparaison des codes Manchester et NRZ.

La modulation OOK + Manchester permet de résoudre les problèmes de scintillement au détriment d'une bande occupée deux fois plus grande qu'en OOK NRZ. Cette modulation est adéquate pour des applications de faible débit. Où le cas de notre travail.

Autres types de modulations existent tels que :

- La modulation VPPM est une variante de la Pulse Position Modulation (PPM) développée spécifiquement pour les VLC [192, 193].
- A l'instar de la VPPM, la modulation « Color-Shift Keying » (CSK) est spécifique aux VLC. Elle est spécialement définie pour fonctionner avec des LED RVB [194, 195].
- Pour les applications hauts débits, on se retrouve rapidement confronté aux problèmes de limitation de la bande passante des sources ainsi que de génération de l'IES.

Afin de répondre au mieux à ces problématiques, on peut utiliser une modulation de type OFDM [196-198].

2.5.3 Caractéristiques du module de Réception

Contrairement au cas des RF, la taille de l'antenne de réception en optique sans fil est beaucoup plus grande (1000 fois environ) que les longueurs d'onde. Les systèmes de communication par la lumière visible sans fil sont alors insensibles aux effets d'évanouissement multi-trajets, ce qui évite des traitements sophistiqués en réception.

Les photodiodes

La photodiode est le composant le plus classiquement utilisé pour convertir un signal optique en un signal électrique. C'est un semi-conducteur classiquement polarisé en inverse. Celui-ci convertit alors la puissance optique en courant électrique en détectant le flux de photons incident sur la surface du composant [91, 113]. Une caractéristique importante est alors la surface effective A_{eff} qui détermine la performance de la photodiode en ce qui concerne la conversion de la lumière en un courant.

La surface effective est liée à la surface physique A_{phy} et à l'angle d'incidence ψ du rayon optique par rapport à l'axe du récepteur. On exprime la surface effective comme suit :

$$A_{eff} = \begin{cases} A_{phy} \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (2.31)$$

ψ_c représente le champ de vision ou « Field of View » du récepteur, c'est-à-dire l'angle le plus élevé dans lequel le récepteur peut recevoir des rayons. En dehors du FOV, le récepteur ne reçoit rien.

Pour augmenter la performance des photorécepteurs dans les applications VLC, la surface effective de la photodiode doit idéalement être augmentée. On peut également augmenter le FOV pour agrandir l'angle d'ouverture et donc la quantité de photons accumulée mais cela se fait au détriment d'un bruit accru. La méthode classique est d'utiliser un concentrateur pour focaliser la lumière incidente sur la surface de la photodiode. Le

gain apporté par un concentrateur idéal peut s'exprimer par :

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (2.32)$$

Avec n l'indice de réfraction du concentrateur.

De plus, le rapport du courant produit par la photodiode sur la puissance incidente, nommé S en $[A/W]$, traduit la sensibilité de la photodiode. C'est un indicateur de l'efficacité de conversion, généralement fourni dans la documentation du composant en fonction de la longueur d'onde. La sensibilité S est liée à l'efficacité quantique du composant par la relation:

$$S = \eta \frac{q}{hf} \quad (2.33)$$

Avec η l'efficacité quantique du récepteur, q la charge élémentaire d'un électron, h la constante de Planck et f la fréquence du signal optique. On peut citer également les autres éléments clés d'une photodiode qui sont :

- La tension de polarisation avant saturation
- Le courant d'obscurité généré en l'absence de puissance lumineuse incidente, qui peut limiter la détection de faibles valeurs de courant,
- La vitesse, ou bande passante, liée au temps de réponse t_r (« rise time »), dépend des paramètres électriques de la photodiode (résistance, capacité de jonction) et des effets internes. La bande passante de la photodiode (généralement plus d'une 100ne de MHz) traduit la capacité de la photodiode à répondre aux variations de l'intensité lumineuse reçue et est calculée de manière approximative à partir de l'équation (2.2).

Les photodiodes en général peuvent être réalisées à partir de différents matériaux (Germanium, Silicium, Arsénure de Gallium). Pour les applications VLC, on utilise plutôt un semi-conducteur Silicium, sensible aux longueurs d'onde entre 400 et 1200 nm.

Il existe deux types de photodiodes : les photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative) ou les photodiodes à avalanche (APD). Les photodiodes PIN sont les plus couramment utilisées car plus linéaires que les APD qui ont un plus grand gain mais génèrent un bruit plus important [91, 110].

Phototransistors

Les phototransistors sont des cas particuliers de transistors bipolaires dont la base est sensible au rayonnement lumineux [199, 200]. De ce fait, la base est dépourvue de toute connexion, elle est ainsi appelée base flottante. Lorsque celle-ci n'est pas éclairée, un courant de fuite I_{CE0} parcourt le composant. Au contraire, l'éclairement de la base provoque la création d'un photocourant I_{ph} . Ce dernier est souvent appelé courant de commande. Il s'observe au niveau de la jonction collecteur-base et s'exprime par [199]:

$$I_c = \beta I_{ph} + I_{CE0} \quad (2.34)$$

Avec β le gain en courant du transistor et I_c le courant du collecteur. Pour schématiser le fonctionnement, la base est équivalente à un interrupteur qui s'active en fonction de la présence ou non de lumière. De par les fortes valeurs β , un phototransistor est souvent beaucoup plus sensible (de 40 à 100 fois) qu'une photodiode. Cependant, le courant d'obscurité généré lors de l'absence de lumière est bien plus important.

D'autre part, la base du phototransistor est bien plus épaisse que la cellule de détection d'une photodiode, ce qui augmente grandement le temps de réponse t_r du composant, réduisant ainsi sa bande passante.

Capteurs d'images

Depuis quelques années l'utilisation de capteurs d'images progresse que ce soit dans le secteur des télécommunications (téléphones portables) ou celui des transports (caméras intérieures et extérieures dans les automobiles par exemple). De nombreux travaux s'intéressent à la possibilité d'utiliser ces caméras comme récepteurs VLC, car de manière évidente cela permet de réduire le coût des systèmes en combinant plusieurs usages. Un nouveau domaine de recherche s'est ainsi développé et est discuté dans les groupes travaillant sur les futures normes VLC : Optical Camera Communications (OCC). [201] Bien que le débit soit limité (une 10^{me} de kbit/s vers Mbit/s en utilisant des techniques de diversité), il peut être suffisant pour envoyer une identification sécurisée, des informations

d'autorisation ou des données de positionnement dans un système de navigation. C'est donc un domaine riche en perspectives d'applications [201-204].

Les capteurs d'image sont en réalité constitués de matrices de photodiodes ou de phototransistors. Il existe deux catégories de technologie de capteurs: les « Charge-Coupled Device » (CCD) et les « Complementary Metal-Oxide-semiconductor » (CMOS).

Avec un capteur CCD, toute la surface du capteur est exposée en même temps et les données dans tous les pixels sont lues simultanément. Le signal issu de chaque photodiode est stocké avant d'être numérisé pour être ensuite envoyé d'un seul bloc. On parle ici de «global shutter». Pour un capteur CMOS, l'exposition et la lecture des données sont effectuées en ligne par rangée. Les signaux sont lus et traités par des décodeurs de ligne et de colonne utilisant la technique dite du « rolling shutter ». Cette technique est bien plus rapide que celle utilisée par les capteurs CCD car elle permet une meilleure actualisation des données, augmentant ainsi la rapidité du traitement de l'information.

Les LED en réception

On trouve aussi dans la littérature des exemples d'application VLC utilisant une LED comme récepteur [205, 90]. On peut ainsi créer un système bidirectionnel à condition d'utiliser les mêmes LED en émission et en réception [205].

Pour fonctionner, la LED de réception doit être polarisée en inverse. Ainsi, elle se comporte comme un composant capacitif : selon l'intensité lumineuse reçue, la charge/décharge de la LED va s'effectuer à différentes vitesses. Plus la lumière induite est forte, plus la LED se décharge rapidement. Avec un circuit de réception adapté, il est ainsi possible de dissocier les différents symboles ON/OFF reçus.

Le premier inconvénient majeur en utilisant une LED comme récepteur est que celle-ci est beaucoup moins sensible qu'une photodiode standard, impactant ainsi fortement les distances de communication. Le second est la limitation en débit : en effet, les LED étant utilisées à la fois pour recevoir et communiquer, cela impacte fortement la bande passante disponible.

De ce fait, ce type de récepteur n'est employé que dans des applications très spécifiques, comme dans le domaine du jouet par exemple [90].

Les cellules solaires

Dans le cadre de l'étude des systèmes autonomes, il a récemment été proposé d'utiliser des cellules solaires comme récepteurs [206-210]. Il est en effet possible d'utiliser la capacité de charge/décharge RL de la cellule pour à la fois récolter de l'énergie mais aussi recevoir de l'information. En se basant sur cet avantage, On a proposé un système VLC-IPS qui a été détaillé dans le prochain chapitre.

La figure 2.22 propose une illustration générale de ce fonctionnement. L'un des principaux avantages est que la cellule agit directement comme un convertisseur courant/tension proposant ainsi un signal de sortie facilement exploitable, contrairement à un système équipé d'une photodiode standard qui requiert une électronique d'amplification.

Ainsi, on peut envisager la possibilité de réaliser des systèmes autonomes permettant de récupérer de l'énergie pour recharger le dispositif portable équipé tout en recevant des informations. Il a été montré expérimentalement qu'il était possible d'atteindre des débits allant jusqu'à 7 Mbit/s en utilisant cette technologie [180].



Figure. 2.22- Illustration du potentiel des cellules solaires.

2.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la définition et le principe de fonctionnement, les notions de base associées aux technologies de communication par la lumière visible sans

fil, un état de l'art pour les différents algorithmes de positionnements basés sur la VLC. Puis, nous avons présenté une étude comparative sur les différents modèles d'émetteurs et de récepteurs en passant par les techniques de modulations associées à cette technologie. D'après cette étude, nous avons pu constater que les plus utilisés étaient les LED et les photodiodes, respectivement pour l'émission et la réception. De ce fait, les approches développées dans le prochain chapitre seront effectuées en utilisant deux types de récepteurs : photodiode et cellule solaire. Dans le prochain chapitre, nous étudierons l'impact des différents paramètres liés à l'étude de l'efficacité énergétique pour les deux modules (émetteur/récepteur).

Etude de l'efficacité

énergétique d'un système VLC-IPS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'appuie sur deux propositions pour décrire l'efficacité énergétique d'un système de positionnement indoor basé sur la communication par la lumière visible.

Dans la première partie de ce chapitre où le système proposé se constitue d'une photodiode et quatre LED (système MISO). L'évaluation de la performance de l'efficacité énergétique est reliée par l'efficacité d'illuminance au niveau du module émetteur. La technique de trilatération est utilisée pour la localisation du récepteur et les mesures du RSS sont utilisées pour l'estimation de la distance. L'illuminance dans tous les endroits de la pièce est étudié, l'analyse du rapport signal/ bruit (SNR) et la puissance reçue en tenant compte les réflexions de premier ordre du plafond, du sol et des murs pour la modélisation de canaux avec exposition directe et indirecte au rayonnement solaire sont analysés. Une équation de modélisation à partir des mesures RSS est proposée. La distribution de l'erreur de positionnement est présentée.

La récupération de l'énergie de l'environnement est devenue un grand intérêt dans les réseaux sans fil et l'autonomie d'alimentation est un autre aspect à étudier. Suite au travail

précédent, la deuxième proposition touche la partie du module récepteur du système (un récepteur autoalimenté). Au cours de cette partie du chapitre, nous avons commencé par décrire le système proposé. Ensuite, l'évaluation des courbes courant-tension (I-V) et puissance-résistance (P-R) est présentée. Puis, nous avons étudié la réponse fréquentielle et l'effet de rayonnement solaire sur le système.

3.2 Evaluation des performances d'un système VLC-IPS

3.2.1 Transmission de données sans fil par la lumière visible

Cette section comporte la conception et la réalisation d'un système de transmission de données (Li-Fi) qui s'appuie sur la transmission d'un signal analogique et un signal numérique par la lumière visible.

Application sur les signaux sonores (signal audio)

D'abord, on commence par un circuit de base pour faciliter la compréhension du fonctionnement des émetteurs et récepteurs optiques. Afin de valider le système de communication indoor, on propose une architecture d'un système de communication VLC permettant de transmettre un signal analogique (signal audio) utilisant des LED comme émetteur et une photodiode comme récepteur.

Sachant que les signaux audio sont en catégorie de basse fréquence comprise entre 20 Hz et 21 kHz. Le signal sonore est transmis à l'aide du clignotement des LED de la lumière visible. Les composants utilisés dans ce travail sont :

- **Le module de l'émetteur :**

Les éléments de base de l'émetteur sont : PC comme une source audio, des LED, résistances ou transistor (2N2222A), fiche Jack et une batterie 9v (pour l'alimentation) (figures 3.1 et 3.2).

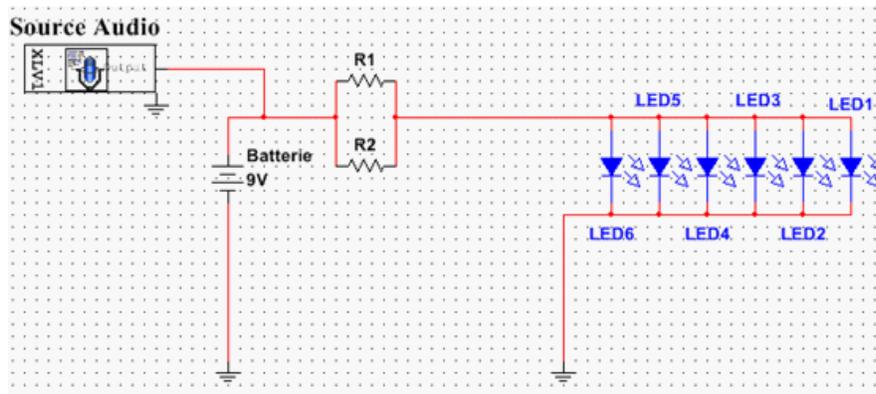


Figure.3.1- Circuit de l'émetteur.



Figure.3.2- Photo de l'émetteur utilisé.

- **Le module du récepteur :**

Le module de récepteur est composé d'un Haut-Parleur (HP), photodiode Bpw34, Amplificateur-Opérationnel (LM386N) (pour amplifier le signal reçu par la photodiode), résistances et capacités, fiche Jack et une batterie 9v comme illustré dans les figures 3.3 et 3.4.

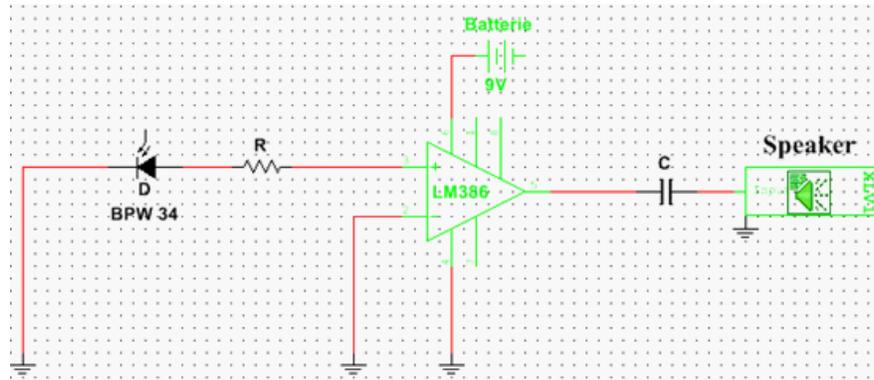


Figure. 3.3- Circuit du récepteur.

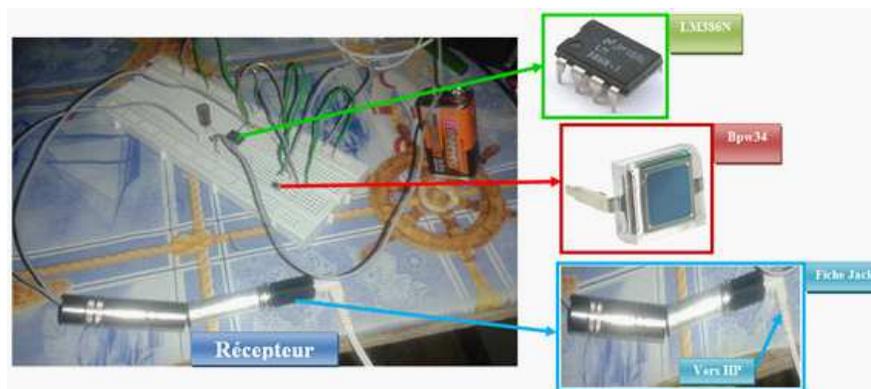


Figure. 3.4- Photo du récepteur utilisé.

Au cours de la transmission, un PC est considéré comme une source du signal audio où le signal de sortie est converti en un signal analogique par un Convertisseur Numérique-Analogique (CNA) intégré et modulé. Ce signal est transporté vers une fiche Jack connecté au niveau des LED qui sont alimentées par une batterie de 9v. Au niveau du récepteur, La composante choisi est une photodiode BPW34 de VISHAY Semi-conducteurs à une dimension 3mm x 3mm (Les photodiodes BPW34 sont sensibles aux rayonnements de la lumière visibles et IR, elles sont adaptées aux applications de détection haute vitesse), qui reçoit le signal optique et le transforme en un signal électrique (O/E) ; ce signal est amplifié par un A-OP et se dirige vers une fiche jack d'une sortie d'un HP. Dans cet essai, la distance entre émetteur-récepteur est 30 cm.

Dans le circuit décrit ci-dessus on peut utiliser un microcontrôleur (carte Arduino) connecté à un ordinateur qui est chargé de la transmission de données (le signal est envoyé au microcontrôleur qui le transmet à travers les LED). Le récepteur prend en compte les informations envoyées. Le traitement du signal s'effectue sur un autre microcontrôleur situé au niveau du récepteur. Le signal audio alors lu par les haut-parleurs de l'ordinateur, voir la figure 3.5.

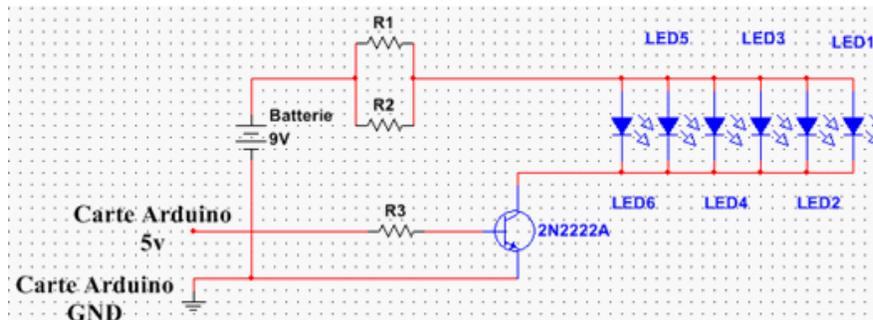


Figure. 3.5- Circuit de l'émetteur utilisant l'Arduino.

Au-delà des fonctionnalités de base décrites ci-dessus, une fonctionnalité supplémentaire peut être ajoutée pour une exploitation intensive. Un microphone relié à l'ordinateur du côté de l'émetteur. Ce microphone est utilisé pour créer un signal audio à transmettre. Le but de cet ajout est de montrer que le système est valable pour un scénario en temps réel.

Application sur les signaux textuels (code, message)

Concernant le signal numérique, deux cartes Arduino (l'une pour l'émetteur et l'autre pour le récepteur) adaptés ont été utilisés pour pouvoir les relier au deux PC avec les dispositifs d'émission et de réception, après avoir développé le programme de la partie soft de l'Arduino. Le but de ce test est de valider l'envoi d'un signal texte qui peut être un code d'identification d'une LED (ID), des coordonnées (x, y), des valeurs de RSS, un signal de commande... etc.

Les figures 3.6-3.7 montrent la conception du système de communication.



Figure. 3.6- Photo de l'émetteur utilisé.



Figure. 3.7- Photo du récepteur utilisé.

Cette partie a été réalisée dans le cadre d'un projet de fin d'étude Master (2018). Ce travail expérimental n'est pas notre objectif mais utile pour nos applications.

Les tests ont été réalisés en deux étapes, la première consiste à l'envoi d'un code texte qui a été préprogrammé. Cette séquence de code est transmise d'une manière automatique lors du lancement du programme comme présenté dans la figure 3.8.

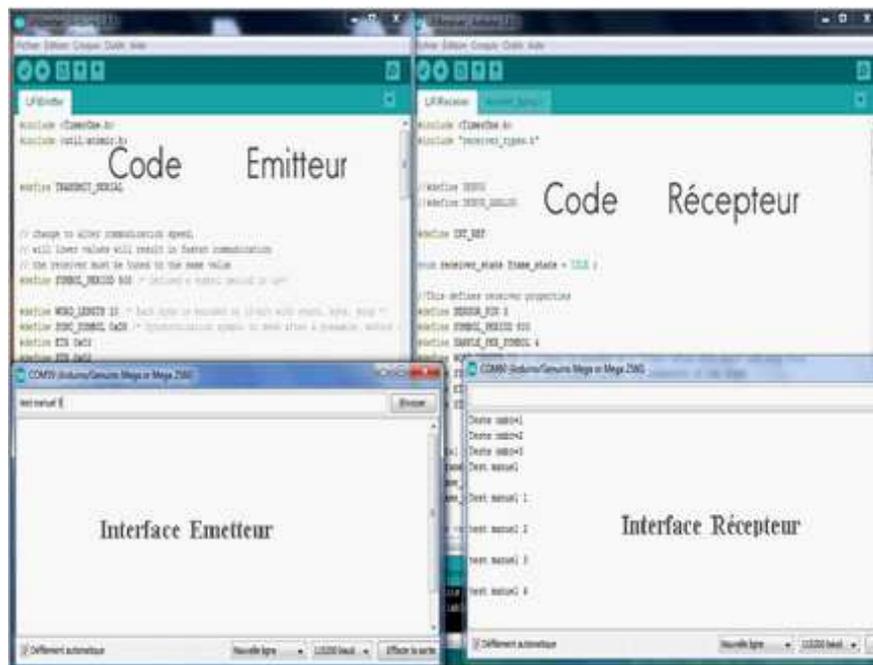


Figure. 3.9- Transmission d'une séquence en temps réel via VLC

3.2.2 Présentation du système VLC-IPS proposé

Nous proposons un système de positionnement indoor basé sur la communication par la lumière visible utilisant des LED comme émetteur et une photodiode comme récepteur. Pour réaliser ce système, il est nécessaire d'étudier les propriétés optiques de la communication émetteur-récepteur. Ainsi, on s'appuyant sur la géométrie d'illuminance, des analyses mathématiques et des simulations numériques du modèle de système sont effectuées.

L'éclairage utilisant les LED blanches n'éclaire pas seulement la pièce, il a le rôle d'un convertisseur des signaux électriques en signaux d'ondes de lumière visible. Ces signaux sont émis dans l'air. La fréquence de clignotement de l'onde lumineuse modulée est suffisamment rapide pour que l'œil humain ne puisse pas la détecter. Par conséquent, la communication optique sans fil n'empêche pas le rôle de l'éclairage. Cependant, l'énergie d'illuminance affecte les performances du système. Il convient de noter ici que ce système

de positionnement n'est pas bidirectionnel. Le problème de liaison montante (Uplink) est traité dans [25]. Dans notre étude, on limite l'application à la transmission de données par liaison descendante (Downlink) dans les communications sans fil basée sur la lumière visible.

On va discuter les performances du système dans un environnement modélisé par une pièce rectangulaire d'une longueur de 6m, une largeur de 6m et une hauteur de 4m. Nous supposons que le récepteur est placé sur un bureau. La hauteur du bureau est de 1m. On fixe l'indice de réflexion au plafond, au mur et au sol à 0,8, 0,7 et 0,15 respectivement. Les LED sont installés au plafond ainsi que la pièce est considérée vide (sans obstacles). Le modèle d'environnement est présenter dans la figure 3.10 et les paramètres de simulation sont données dans le tableau 3.1.

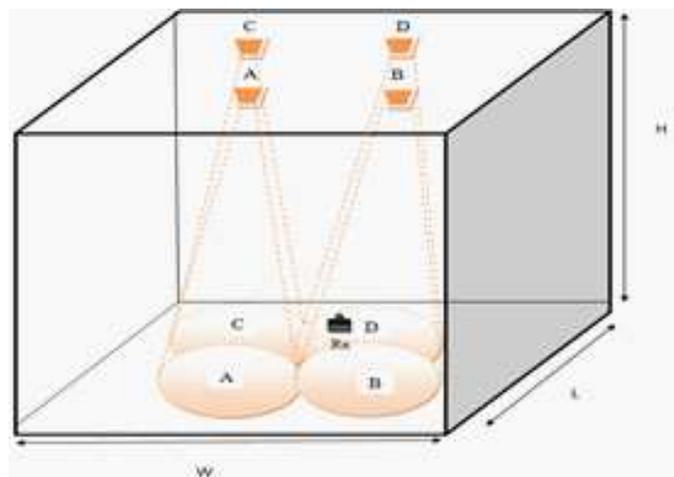


Figure.3.10- Modèle proposé.

Tableau 3.1. Paramètres de simulation.

Paramètres	Valeur
Dimensions de la pièce (L×W×H)	$6 \times 6 \times 4 \text{ m}^3$
Puissance optique constante émise par la LED P_{const}	16W
Coordonnées de chaque LED	$A(2, 2, 4)$ $B(4, 2, 4)$ $C(2, 4, 4)$ $D(4, 4, 4)$
Codes émis pour chaque LED	$A(1\ 0\ 0\ 0)$ $B(0\ 1\ 0\ 0)$ $C(0\ 0\ 1\ 0)$ $D(0\ 0\ 0\ 1)$
Indice de modulation η_{OOK}	0.125
Hauteur du récepteur	1 m
T_k	295 k
G_0	10
η	112 pf/cm ²
I_2	0.562
k	$1.38066e^{-23}$
Γ	1.5
g_m	30 ms
I_3	0.0868

Il est supposé que la source d'émission et les points réfléchis sur le mur ont un diagramme de rayonnement Lambertien [15]. Dans ce cas, les faisceaux lumineux des LED au récepteur se propagent via deux canaux principaux : le canal en visibilité directe (Line-Of-Sight LOS) et Le canal diffus en visibilité indirecte comme présenter dans la figure 3.11. Afin d'évaluer les performances du système de positionnement, le canal optique sans fil est modélisé. Le gain statique du canal LOS est donné par l'équation (2.19).

Pour la modélisation optique du signal diffus sans fil, on va suivre le même principe que celle utilisée pour le modèle de sphère [211]. Dans une pièce, sur toute la surface A_{room} une intensité I_1 émise par la première réflexion diffuse d'une source optique à faisceau large est donnée par

$$I_1 = \rho_1 \frac{P_{totalLED}}{A_{room}} \quad (3.1)$$

où ρ_1 est la réflectivité de la surface et $P_{totalLED}$ est la puissance totale de toutes les LED.

La réflectivité moyenne $\langle \rho \rangle$ est définie comme suit

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{A_{room}} \sum_i A_i \rho_i \quad (3.2)$$

où ρ_i est la réflectivité propre des murs, de plafond, de sol et les autres objets de la pièce sont pondérés par leurs zones propre A_i .

par conséquent, l'intensité totale est donnée par une série géométrique:

$$I = I_1 \sum_{j=1}^{\infty} \langle \rho \rangle^{j-1} = \frac{I_1}{1 - \langle \rho \rangle} \quad (3.3)$$

où j est le nombre de réflexions.

Ainsi, le gain du canal combiné est donné comme suit [211]:

$$H_{diff+LOS}(f) = H_{LOS}(0) + H_{diff}(f) e^{j2\pi f \Delta T} \quad (3.4)$$

où ΔT décrit le retard entre le signal LOS et le signal diffus.

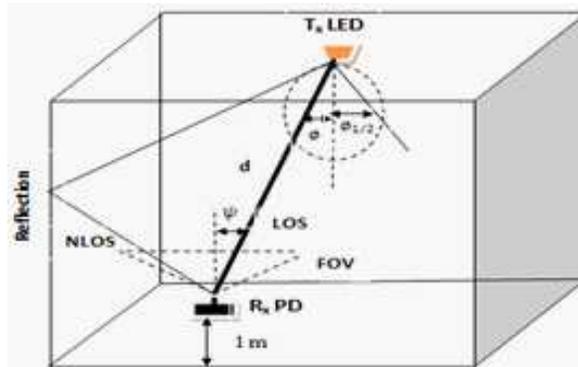


Figure. 3.11- Présentation du canal optique sans fil LOS et NLOS.

De plus, la position du récepteur est estimée en utilisant les caractéristiques de changement de signal qui dépendent de la distance et de l'angle entre l'émetteur et le récepteur [212]. Les quatre LED sont situées respectivement au $(2, 2, 4)$, $(4, 2, 4)$, $(2, 4, 4)$ et $(4, 4, 4)$. Pour les grands endroits éclairés avec un nombre important des LED, les quatre LED les plus puissants sont sélectionnés. Les LED émettent leurs identifications ID comme $[1\ 0\ 0\ 0]$, $[0\ 1\ 0\ 0]$, $[0\ 0\ 1\ 0]$ et $[0\ 0\ 0\ 1]$ sont transmis par LED_A , LED_B , LED_C , et LED_D , respectivement.

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau 3.2.

Tableau.3.2: Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
l'angle d'émission à mi-puissance	50°
Coefficient de Réflexion	0.8
Réfectivité du sol	0.15
Réfectivité du plafond	0.8
Réfectivité des murs	0.7
Champ de vision (FOV) ψ_c	70°
La zone de détection physique (A)	$1.0\ cm^2$
Gain du filtre optique $T_s(\psi)$	1.0
Indice de réfraction du concentrateur optique η_c	1.5
Efficacité optique / électrique γ	0.54(A/W)

3.3 Evaluation des performances du système proposé

3.3.1 Distribution de l'illuminance du système proposé

Maintenant on va décrire notre algorithme pour calculer l'illuminance horizontale. Bien que les réflexions contiennent des composants à la fois spéculaires et diffusifs [213, 214], et supposant que les réflecteurs sont purement diffusifs et le modèle Lambertien est idéal [214–216]. Le diagramme d'intensité de rayonnement émis par un élément différentiel

d'un réflecteur idéal est indépendant de l'angle de la lumière incidente [217]. La lumière de la source peut atteindre le point reçu après un nombre quelconque de réflexions.

Par conséquent, l'illuminance horizontale peut être écrite comme une somme infinie:

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \quad (3.5)$$

où E_n est l'illuminance horizontale de la lumière subissant exactement n réflexions.

L'illuminance horizontale du canal LOS E_0 est donné par

$$E_0 = \sum_i^{LED} \frac{I(0) \cos^m \phi_i}{d_i^2} \cos \psi_i \quad (3.6)$$

Tandis que les termes d'ordre supérieur ($n > 0$) peuvent être calculés de manière récursive

$$E_n = \int_{wall} \frac{E_{n-1}}{\pi d^2} \rho \cos \phi \cos \psi dA_{wall} \quad (3.7)$$

avec: $I(0)$ est l'intensité lumineuse au centre des LED.

La prise en compte de l'illuminance des LED est nécessaire. Généralement, l'illuminance des lampes est normalisée par l'ISO (Organisation internationale de normalisation). Selon cet ensemble de normes, un éclairage compris entre 300 et 1500 lx est requis pour les travaux de bureau [218]. Aussi, un éclairage uniforme dans le bureau est recommandé. Le taux d'uniformité d'illuminance est défini comme le rapport entre l'éclairage minimum et l'éclairage moyen. Le rapport d'uniformité supérieur à 0,7 est recommandé par l'arrangement de l'illuminance.

La distribution de l'illuminance de ce système avec un émetteur est illustrée à la figure 3.12, la valeur maximale du flux lumineux au centre (3, 3) est de 584 lx. La figure 3.13 montre la distribution de quatre émetteurs dont la valeur est comprise entre 337,1726 et 584 lx. La valeur moyenne est 460.7170 lx. À partir de cette analyse, on obtient un éclairage suffisant c.à.d. entre 300 et 1500 lx selon ISO à tous les endroits de la pièce.

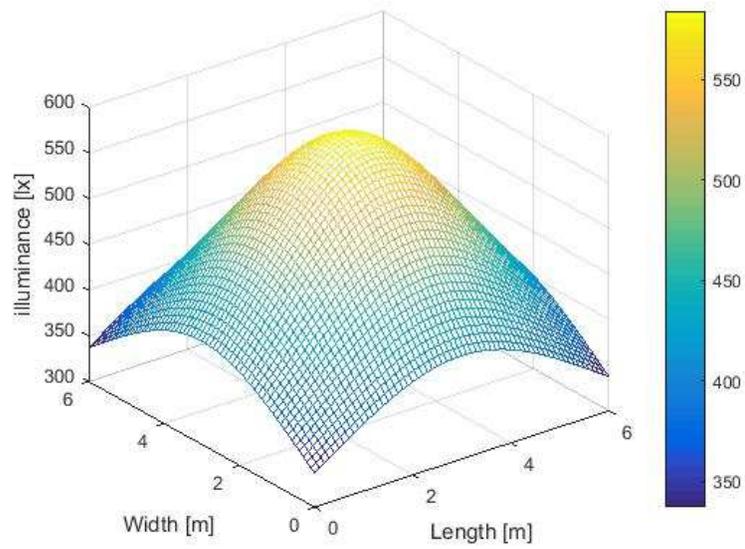


Figure. 3.12- Distribution de l'illuminance dans le cas d'un émetteur max= 584 lx.

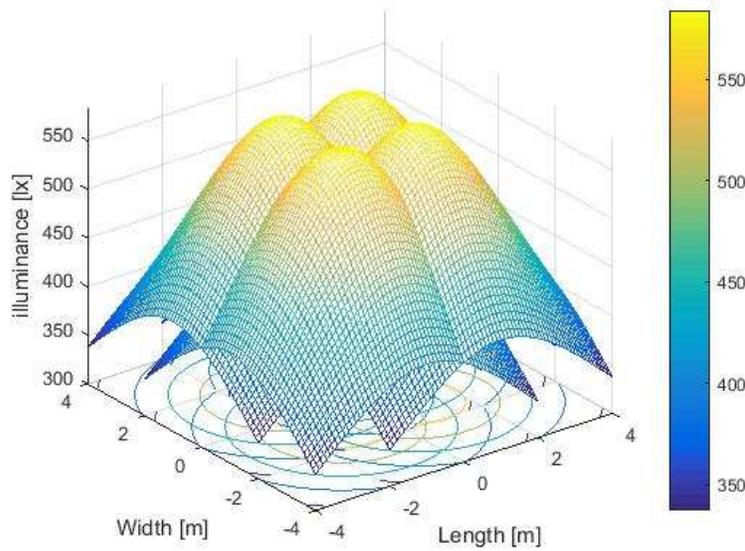


Figure. 3.13- Distribution de l'illuminance dans le cas de quatre émetteur,
(max= 584 lx, min = 337.1726 lx, moy= 460.7170 lx).

3.3.2 Évaluation de la performance de l'illuminance basée sur l'arrangement des LED dans un système VLC-IPS

Dans cette partie, on va présenter une conception typique de l'espacement entre LED en utilisant 9 LEDs (3x3) dans un autre système de positionnement indoor (IPS) basé sur la communication VLC. Les performances de la conception proposée sont étudiées et évaluées pour atteindre la distance optimale entre les différentes positions des LED et pour minimiser le chevauchement entre l'illuminance des LED. L'objectif est d'augmenter l'efficacité lumineuse dans la pièce sans augmenter le nombre de LED et de réduire la zone morte dans laquelle il est difficile de localiser l'utilisateur. La distance optimale obtenue avec la disposition proposée des LED est de 2,30 m pour un angle d'émission à mi-puissance $\phi_{1/2} = 70^\circ$ et de 1,70 m pour un angle $\phi_{1/2} = 50^\circ$. Cela aboutit à un positionnement approprié de l'utilisateur sur l'ensemble de la pièce avec une efficacité d'illuminance.

La condition ISO des valeurs d'illuminance requis est devenue insuffisante car il est nécessaire de savoir comment positionner les LED pour fournir un éclairage équivalent. Cela permet d'économiser l'énergie et de réduire les zones mortes qui ne sont pas éclairées. La conception de la disposition des LED a été déjà introduite dans d'autres travaux de recherches [137, 210, 219-221]. Dans [219], des systèmes de quatre, neuf et seize LED placés uniformément le long du plafond ont été présentés et comparés. D'après [211], les auteurs ont introduit une nouvelle approche basée sur la distribution circulaire, dans laquelle toutes les LED sont situées uniformément sur un cercle. Avec cet arrangement l'uniformité du système a été améliorée mais aux dépens d'une plus grande interférence d'inter-symboles (ISI).

Bien qu'il y a d'autre recherche réalisés concernant l'emplacement des LED et leurs arrangement, notre intérêt est d'étudier la distance entre LED et l'angle d'émission à mi-puissance pour atteindre la distance optimale permettant de couvrir la zone de localisation du récepteur et de prendre les mesures RSS nécessaires.

Le rapprochement des LED conduit à un chevauchement de l'illuminance et à l'apparition de zones mortes dans lesquelles il est difficile d'appliquer l'algorithme de positionnement

basé sur RSS et de constituer la base de données dans la phase de formation de la méthode Fingerprinting. Par conséquent, les LED doivent être placées à une distance appropriée pour fournir un éclairage avec le minimum de LED possible, en particulier dans les endroits larges. Une seule LED ne peut pas fournir un éclairage suffisant pour un environnement indoor en raison des limitations technologiques [222]. En outre, une LED à haute luminosité peut menacer la sécurité des yeux. En conséquence, la présence d'un nombre important de LED situées au plafond est une solution exigible. Le modèle proposé est illustré dans la figure 3.14. Le schéma fonctionnel du système VLC est présenté dans la figure 3.15.

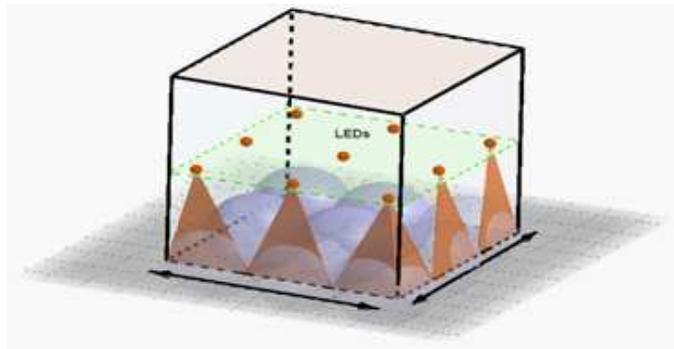


Figure.3.14- Modèle VLC à neuf LED.

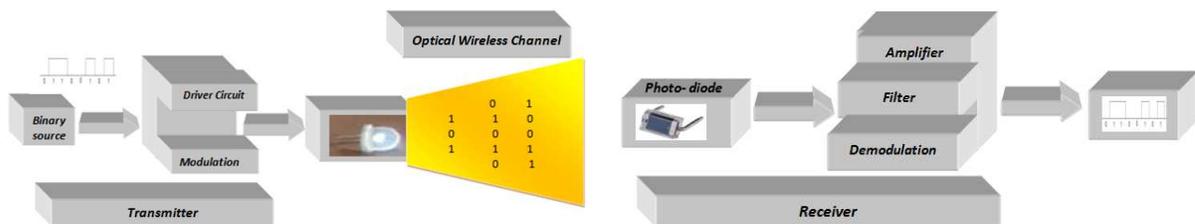


Figure.3.15- Schéma fonctionnel du système VLC.

Conception du Modèle

Pour étudier la distribution appropriée de l'illuminance du système, plusieurs configurations de conception et arrangements des LED est supposées. La différence d'espacement considérée entre les LED est illustrée par la figure 3.16.

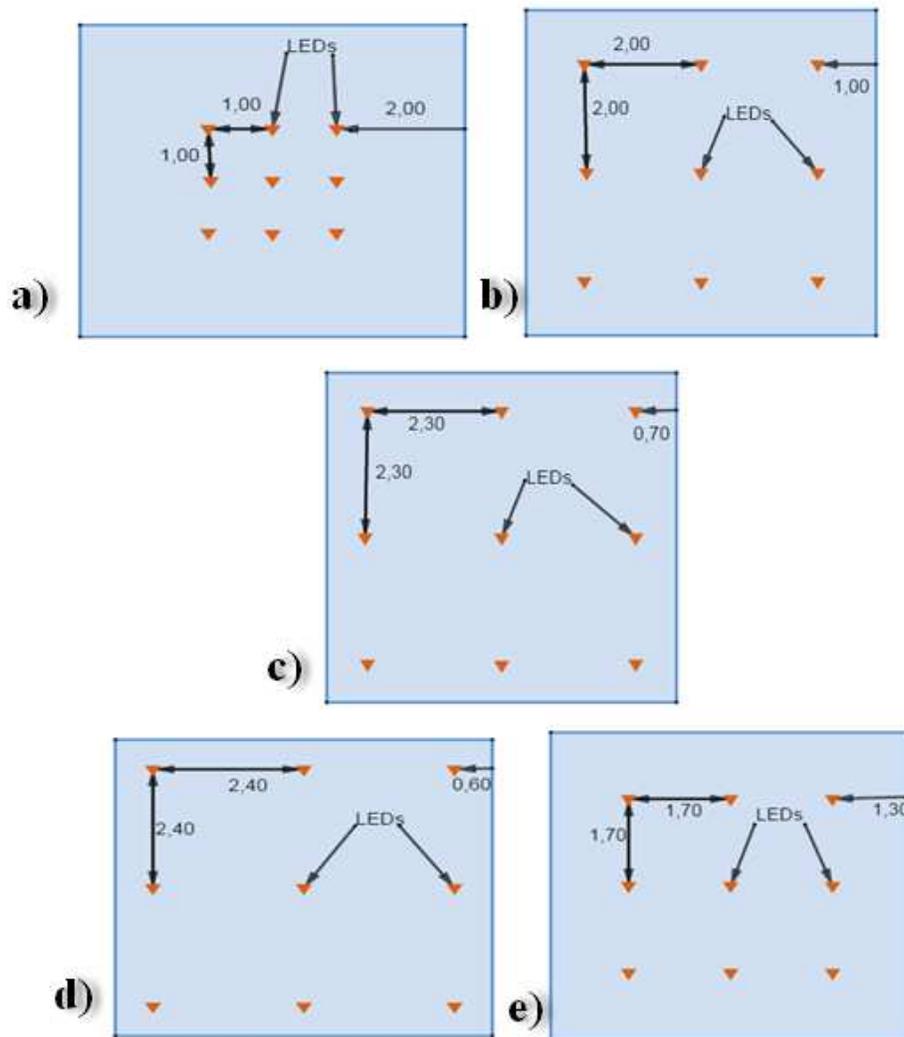


Figure.3.16- Dispositions des LED pour différentes distances :
 pour $\phi_{1/2} = 70^\circ$ (a) $D_{LED} = 1m$, (b) $D_{LED} = 2m$, (c) $D_{LED} = 2.30m$ (d) $D_{LED} = 2.40m$;
 pour $\phi_{1/2} = 50^\circ$ (e) $D_{LED} = 1.70m$.

Résultats de Simulation

Une étude primaire d'illuminance du modèle proposé est considérée pour garantir la validité ou non de la conception. Les résultats montrent que l'illuminance du modèle se situe dans une plage acceptable à la norme ISO, à savoir que la distribution de d'illuminance

minimale est 540 lx et la valeur maximale 1137 lx. Un paramètre important dans les systèmes VLC-IPS est l'angle d'émission à mi-puissance ce qui peut affecter les performances du système, car il détermine la zone de couverture de chaque LED. L'apport considéré dans cette étude est de fixer l'angle d'émission à mi-puissance et de modifier les distances entre LED. Le premier cas étudié est pour $\phi_{1/2} = 70^\circ$ où les LED sont répartis uniformément dans le plafond avec un espacement proposé $D_{LED} = (1m, 2m, 2.30m, 2.40m)$ entre deux LED adjacentes, respectivement. La distribution de l'illuminance horizontale de chaque arrangement est illustrée dans les figures 3.17-3.20, qui montrent qu'une illuminance suffisante est obtenue à tous les endroits de la pièce pour ces modèles. Selon la figure 3.17, la distance entre deux LED est $D_{LED} = 1m$, des zones appelées zones mortes sont apparues. Dans ce cas, le processus de localisation de l'utilisateur est très difficile et donne un positionnement moins précis. Si les LED sont situées au milieu ou non, il y a toujours des zones mortes. En plus, on observe un chevauchement important entre la distribution de l'illuminance des LED ce qui rend l'éclairage inutile. On aboutit à la même remarque si la distance $D_{LED} = 2m$ où un chevauchement constaté inférieur par rapport au cas précédent. Mais cette distance n'est pas suffisante dans le cas d'un grand nombre de LED car c'est un gaspillage de la lumière, comme le montre la figure 3.18. La troisième distance proposée est $D_{LED} = 2,30m$ (figure 3.19) ; c'est le cas optimum où il n'y a pas de chevauchement, pas de zone morte et la pièce est complètement éclairée. Alors, une différence de 30 cm par rapport au cas précédent constitue un avantage pour occuper la zone de couverture maximale. La dernière valeur proposée est $D_{LED} = 2,40m$ où une zone morte apparaît (figure 3.20). Cet espacement est utilisé pour une application de positionnement spécifique, en supposant que l'utilisateur a une largeur inférieure à 10 cm (exemple: Robot) ; ici le positionnement est difficile à atteindre. Par conséquent, ce cas n'est pas valable pour un système de positionnement indoor généralisé.

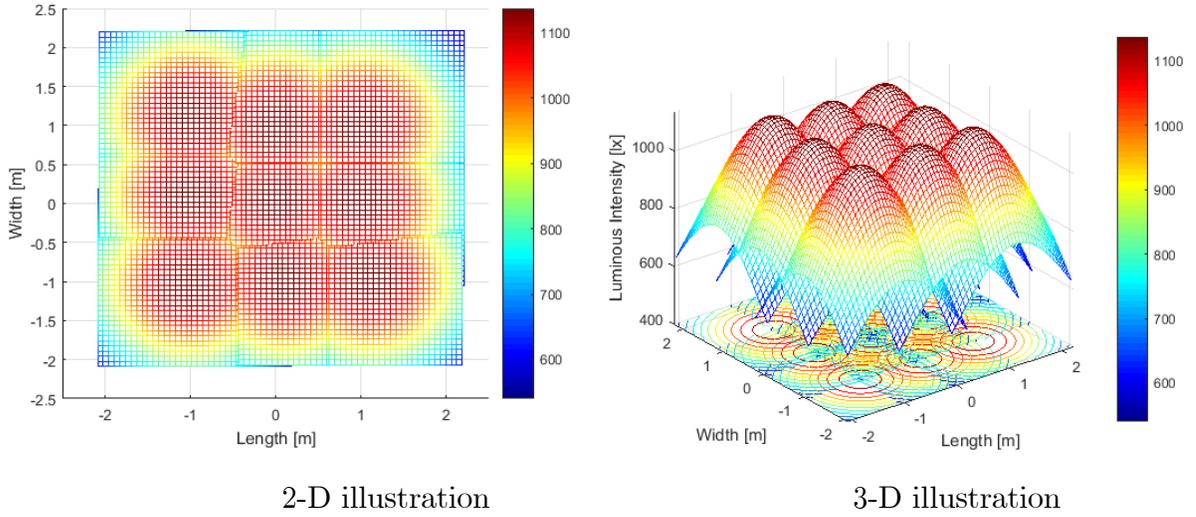


Figure. 3.17- Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 70^\circ$, $D_{LED} = 1.00m$.

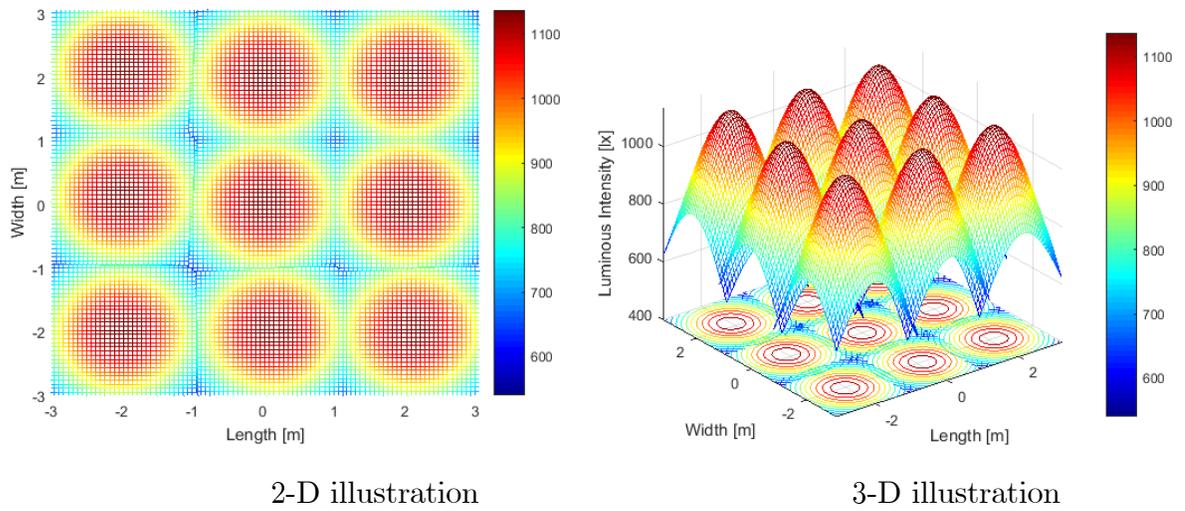


Figure. 3.18- Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 70^\circ$, $D_{LED} = 2.00m$.

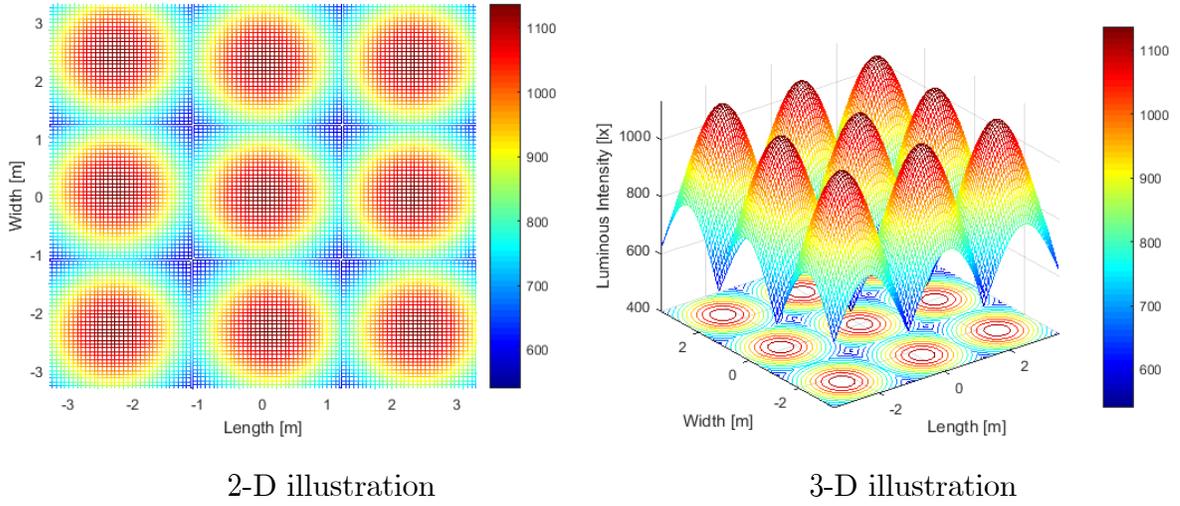


Figure. 3.19- Distribution de l'illuminance pour le cas: $\phi_{1/2} = 70^\circ$, $D_{LED} = 2.30m$.

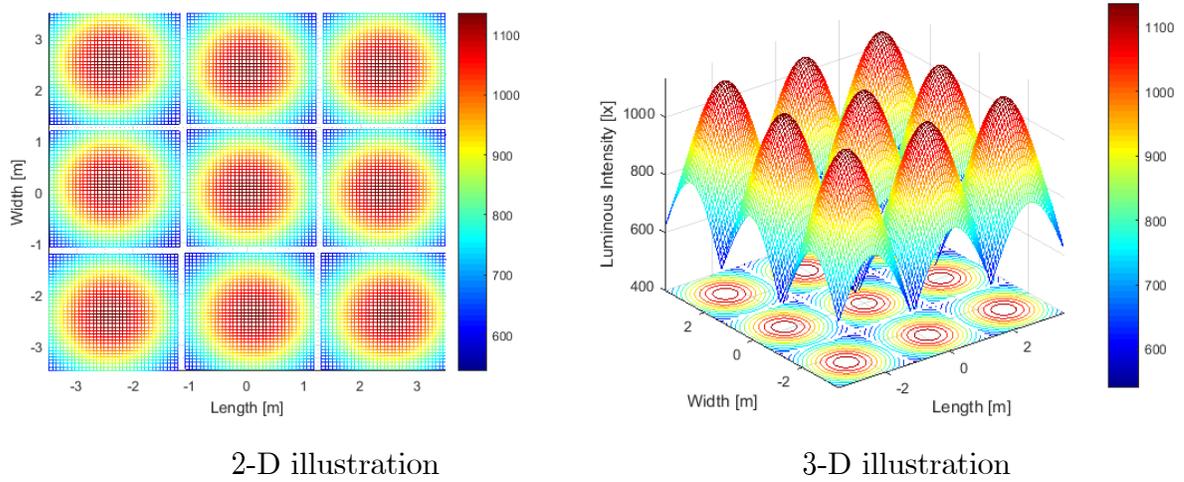


Figure. 3.20- Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 70^\circ$, $D_{LED} = 2.40m$.

En considérant le cas $\phi_{1/2} = 50^\circ$, la distance proposée entre LED est $D_{LED} = (1m, 1,70m, 2,30m)$. Le même inconvénient dans le cas de $\phi_{1/2} = 70^\circ$, un chevauchement important et une zone morte étendue sont apparus pour le cas $D_{LED} = 1m$ (figure 3.21). Le cas $D_{LED} = 1,70m$ représente la distance optimale entre chaque deux LED. On remarque qu'il n'y a pas de chevauchement avec une zone morte acceptable (quelques cm), il est valable pour un système de positionnement indoor bien précis, comme indiqué

dans la figure 3.22. Lorsqu'on considère la distance optimale pour le premier cas (c.à.d. $D_{LED} = 2,30m$), des résultats non satisfaisants ont été obtenus et représentés dans la figure 3.23 où une large zone morte est apparue.

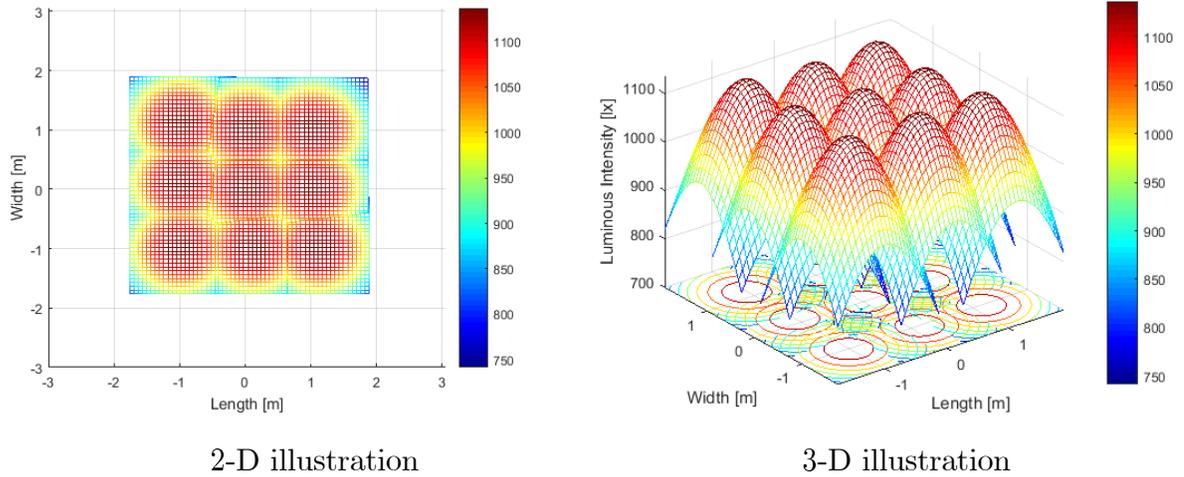


Figure. 3.21- Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 50^\circ$, $D_{LED} = 1m$.

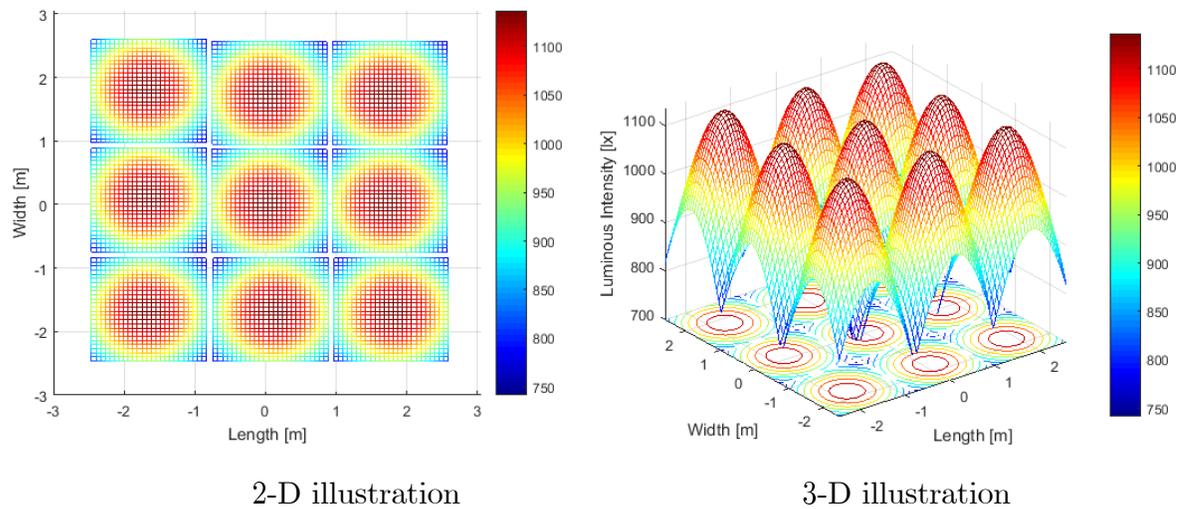


Figure. 3.22- Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 50^\circ$, $D_{LED} = 1.70m$.

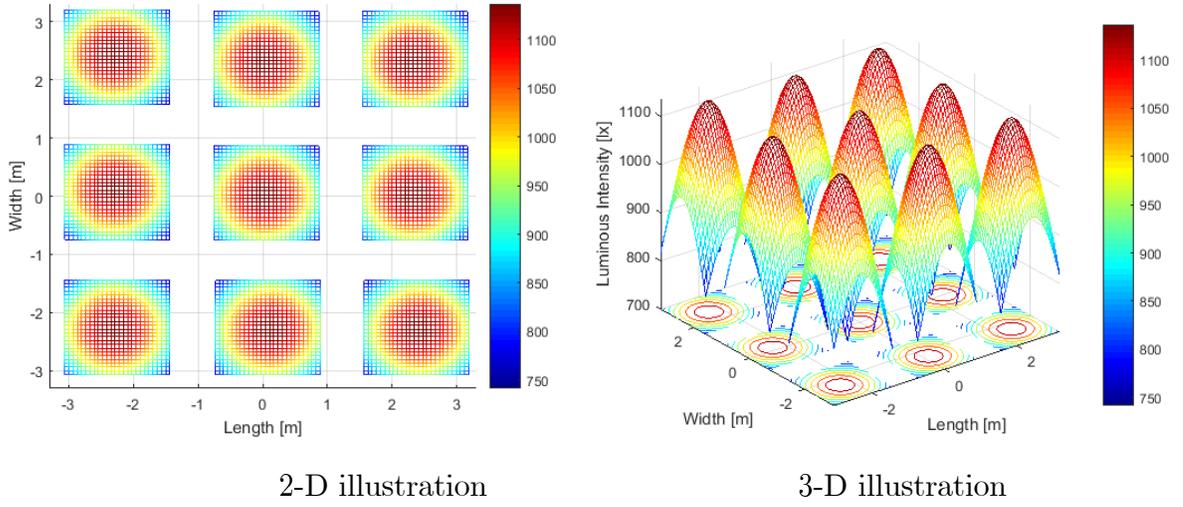


Figure. 3.23- Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 50^\circ$, $D_{LED} = 2.30m$.

Dans la partie précédente, un modèle de système VLC-IPS est étudié afin de déterminer l'importance de l'espacement optimal entre LED. La simulation de la distribution de l'illuminance de chaque cas en 2D et en 3D est effectuées. Des distances différentes pour des valeurs différentes de l'angle d'émission à mi-puissance sont considérées. En outre, le chevauchement résultant a été minimisé ; l'efficacité lumineuse à travers la pièce est augmentée sans aucune LED supplémentaire. Ces résultats sont suffisants pour une évaluation de l'efficacité énergétique du système de positionnement.

3.3.3 La puissance optique reçue

Dans une liaison optique, la puissance reçue P_r de plusieurs LED est donnée par la formule généralisée suivante:

$$P_r = \sum_{i=1}^{LEDs} P_{t_i} H^i(0) \quad (3.8)$$

où P_t est la puissance optique transmise.

Pour le cas d'une liaison LOS, La puissance optique totale des i -LED est donnée par

$$P_{rx,LOS} = \sum_{i=1}^{LEDs} P_{tx} H_{LOS}^i(0) \quad (3.9)$$

où $H_{LOS}^i(0)$ est le gain du canal LOS de i – ème LED.

Le récepteur est supposé comme une petite partie de la surface de la pièce, donc la puissance reçue P_{diff} du canal diffus dans la zone de réception A_{rx} est :

$$P_{diff} = A_{rx}I \quad (3.10)$$

La puissance totale reçue pour les deux canaux est donnée par

$$P_{rx} = (P_{LOS} + P_{diff}) * T_s(\psi) * g(\psi) \quad (3.11)$$

Les paramètres de calcul de la puissance optique reçue sont le gain du filtre optique $T_s(\psi)$ et le gain du concentrateur optique $g(\psi)$ qui sont donnés par l'équation (2.32).

Les figures 3.24 et 3.25 présentent la puissance optique reçue du système proposé à chaque position du récepteur. Dans tous les cas, la puissance optique reçue aux coins de la pièce est faible. Au centre de la pièce, la puissance reçue est élevée. Nous pouvons voir que la puissance reçue du système avec un FOV $\psi_c = 30^\circ$ (Max = -5.89dBm, Min=-6.6dBm) est faible, par rapport au système avec FOV $\psi_c = 70^\circ$ (Max = -4.96 dBm, Min=-5.67 dBm). Brièvement, la puissance reçue diminue proportionnellement à la diminution du FOV.

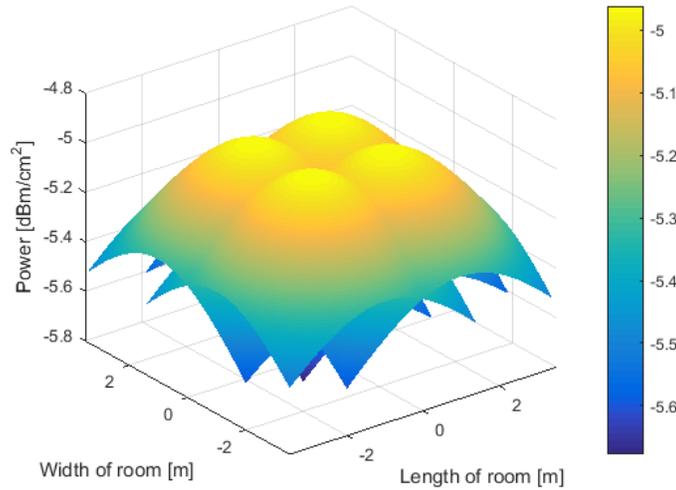


Figure. 3.24- Distribution de la puissance optique reçue (FOV=70°).

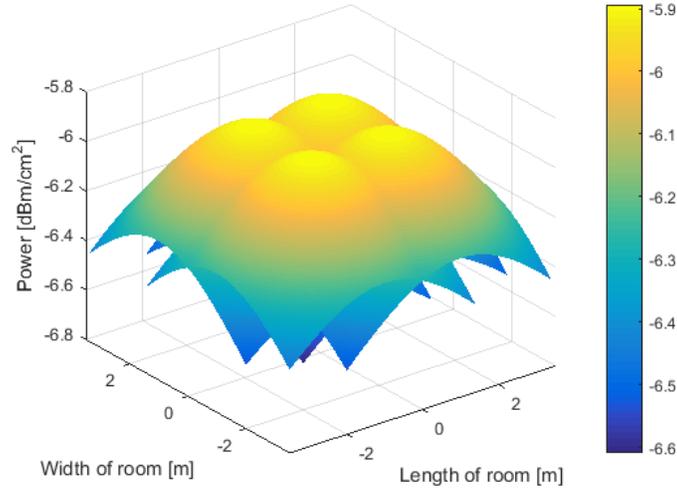


Figure. 3.25- Distribution de la puissance optique reçue (FOV=30°).

3.3.4 Performances SNR du système proposé

Le SNR est calculé pour examiner ses effets sur le système proposé et exprimé par .

$$SNR = \frac{(SP_{rx})^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2} \quad (3.12)$$

où S est la sensibilité du récepteur. La variance du bruit ambiant σ_{shot} est donnée par:

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma (SP_{rx}) B + 2qI_{bg}I_2B \quad (3.13)$$

avec q est la charge d'électron, B est la bande passante du signal d'information, I_{bg} est le photo-courant induit dû au bruit ambiant. I_2 est le facteur de la bande passante du bruit et il est défini par 0,562.

La variance du bruit thermique est donnée par

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi kT_k}{G_0} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 kT_k \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3 \quad (3.14)$$

Dans l'équation (3.16), le premier terme représente le bruit thermique de la résistance de rétroaction ; k est la constante de Boltzmann, T_k est la température absolue et G_0 est le

gain de tension en boucle ouverte, η est la capacité fixe par unité de surface. Le deuxième terme décrit le bruit thermique de la résistance du canal FET, Γ est le facteur de bruit FET « Field-Effect Transistor », g_m est la transconductance FET et $I_3 = 0,0868$.

La zone de détection physique d'une PD est de $1,0 \text{ cm}^2$. Le gain au niveau d'un filtre optique est égal à 1,0 et l'indice de réfraction d'un concentrateur optique est égal à 1,0. Le rendement de conversion O/E (optique en électricité) d'une PD est de 0,54 A/W. Les LED blanches émettent de la lumière à une longueur d'onde importante. Par conséquent, on peut utiliser une longueur d'onde souhaitée pour laquelle la réponse dans une PD est bonne. Aussi, on a choisi les valeurs de paramètre de bruit suivantes: $T_k = 298 \text{ K}$, $G_0 = 10$, $g_m = 30 \text{ mS}$, $\eta = 1,5$, $\eta = 112 \text{ pF / cm}^2$ et $I_{bg} = 5100 \text{ }\mu\text{A}$ est une valeur mesurée de l'exposition directe au soleil et $I_{bg} = 740 \text{ }\mu\text{A}$ est une valeur supposée de l'exposition indirecte au soleil (tableau 2.1) [117].

Cette partie est consacrée à l'étude de l'influence du bruit sur les performances du système. Pour cela deux approches ont été étudiées :

Premièrement, le canal est considéré entièrement LOS. Par exemple la distribution de SNR pour la LED_D est représentée dans les figures 3.26 et 3.27. On observe que les effets du bruit ambiant est prépondérant par rapport au bruit total, ce qui entraîne une diminution de 10 dB de l'exposition directe au soleil par rapport à l'exposition indirecte dans l'environnement et pour la même position. Pour les deux figures, dans le coin de la pièce, le signal transmis a un très faible SNR. Cela conduit à une erreur relativement importante dans l'estimation de la distance dans le cas où le récepteur est situé dans le coin et comme décrit précédemment les performances du système diminuent lorsque la distance est augmentée entre LED et récepteur.

Deuxièmement, on considère le canal diffus. Les figures 3.28 et 3.29 montrent que le SNR diminue d'une valeur d'environ 10 dB par rapport aux résultats obtenus précédemment. Ceci est dû à l'effet de perte de trajet. Le rapport signal/bruit dans l'exposition directe au soleil est inférieur d'environ 8 dB à l'exposition indirecte au soleil, ce qui produit un signal faible. Cela affecte la précision du système dans la détermination du positionnement.

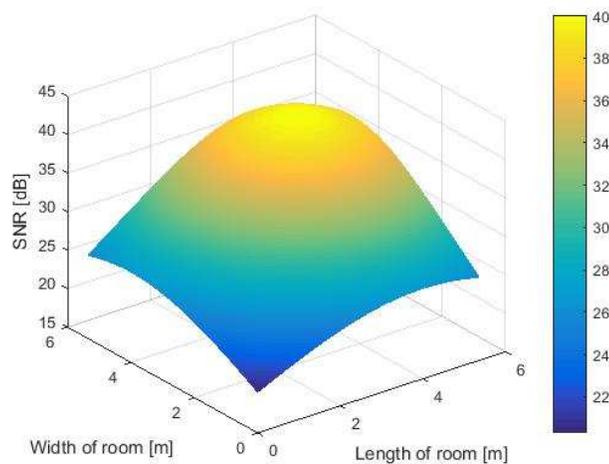


Figure. 3.26- Distribution SNR pour LED_D considérant le canal LOS (exposition directe au soleil).

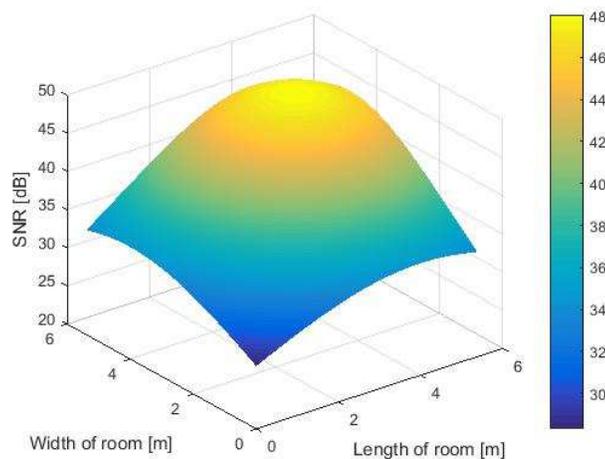


Figure. 3.27- Distribution SNR pour LED_D considérant le canal LOS (exposition indirecte au soleil).

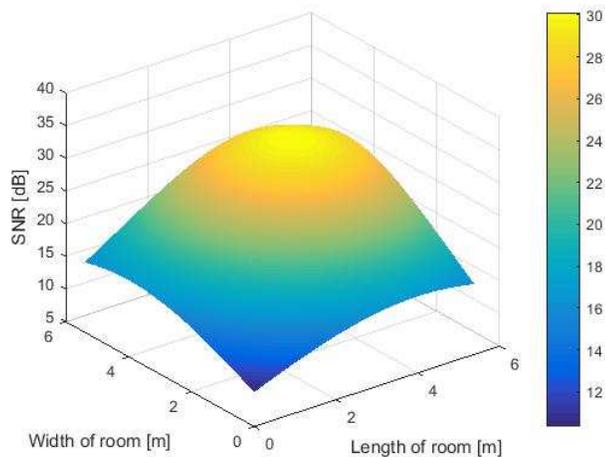


Figure. 3.28- Distribution SNR pour LED_D considérant le canal NLOS (exposition directe au soleil).

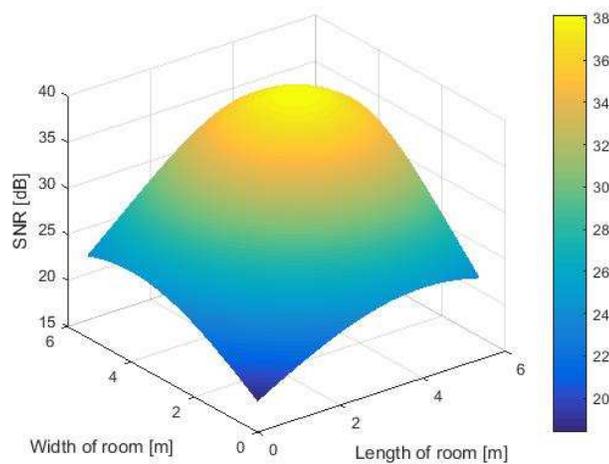


Figure. 3.29- Distribution SNR pour LED_D considérant le canal NLOS (exposition indirecte au soleil).

3.3.5 Algorithme de Positionnement

L'algorithme de positionnement est basé sur le paramètre RSS et la technique de trilatération. Étant donné que les LED fournissent un niveau de puissance constant en sortie pour des raisons d'éclairage; par conséquent, un seul signal modulé est reçu par le récepteur. D'après [223], la modulation OOK est utilisée pour minimiser le problème de scintillement et l'indice de modulation est donné par la valeur 0,125. Lorsque chaque LED émet une puissance optique proportionnelle à l'amplitude du signal électrique, la différence de puissance résultante au côté émetteur est donnée par

$$P_{totalLED} = \eta_{OOK} \cdot P_{const} \quad (3.15)$$

où η_{OOK} est l'indice de la modulation OOK. P_{const} est la puissance optique constante émise par la LED sans utiliser la modulation.

Par conséquent, la puissance du côté récepteur P_{rx} est donnée par

$$P_{rx} = H_{diff+LOS}(f) \cdot P_{totalLED} \quad (3.16)$$

d_{est} est la distance entre l'émetteur et le récepteur qui peut être estimée en mesurant P_{rx} [20] :

$$d_{est} = \sqrt{\frac{(m+1) A \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \cdot P_{totalLED}}{2\pi P_{rx}}} \quad (3.17)$$

Avec l'utilisation des propriétés géométriques et en supposant que l'axe du récepteur et de l'émetteur sont perpendiculaires au plafond, on a:

$$\cos(\psi) = \cos(\phi) = \frac{H}{d_{est}} \quad (3.18)$$

et le paramètre d_{est} est désigné par

$$d_{est} = \sqrt{d_{est-xy}^2 + H^2} \quad (3.19)$$

où d_{est-xy} est la distance horizontale estimée entre l'émetteur et le récepteur et H est la distance verticale entre le plafond et le récepteur, donc

$$d_{est-xy} = \sqrt{\frac{(m+1) A \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \cdot P_{totalLED}}{2\pi P_{rx}} - H^2} \quad (3.20)$$

Pour déterminer la position actuelle du récepteur en deux dimensions (2D) à l'aide de la technique de trilatération, il est nécessaire de collecter les signaux provenant des quatre LED. On modélise les mesures pratiques du RSS par une équation qui permet d'estimer les distances de l'utilisateur par rapport aux LED comme donnée dans [224].

$$RSS = \begin{cases} \frac{A}{d_{est}^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (3.21)$$

Où $0 \leq \psi \leq \psi_c$. À partir des équations (3.18), (3.19) et (3.21), on obtient

$$RSS = \frac{A}{d_{est-xy}^2 + H^2} \left(\frac{H}{\sqrt{d_{est-xy}^2 + H^2}} \right)^{m+1} \quad (3.22)$$

Pour simplifier l'analyse, on réécrit l'équation (3.22) comme suit

$$\frac{1}{RSS^2} = B \cdot (d_{est-xy}^2 + H^2)^p \quad (3.23)$$

Sachant que le même d_{est-xy} peut être calculé pour différents (x, y) , il est nécessaire de calculer la moyenne des différentes valeurs RSS correspondant au d_{est-xy} .

Pour le scénario de positionnement, les signaux des quatre LED et leurs valeurs RSS correspondantes peuvent être collectés par le récepteur dans différentes zones de couverture de la lumière de l'émetteur. Basant sur les mesures de RSS , les distances horizontales entre récepteur et LED peuvent être obtenues à l'aide de l'équation (3.23).

Estimation de la position

Lorsqu'il y a un petit nombre de points de référence, l'estimation la plus fiable du positionnement du récepteur est obtenue en utilisant une estimation des moindres carrés linéaire. Notez que les distances de plusieurs points de référence (coordonnées horizontales des émetteurs) sont connues. Après avoir calculé la distance horizontale estimée entre le récepteur et chacun des quatre émetteurs (A, B, C, D), un ensemble de quatre équations quadratiques est formé.

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = d_A^2 \quad (3.24)$$

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = d_B^2 \quad (3.25)$$

$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 = d_C^2 \quad (3.26)$$

$$(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 = d_D^2 \quad (3.27)$$

où $[x_A, x_B, x_C, x_D]$ et $[y_A, y_B, y_C, y_D]$ sont les coordonnées des LED dans les axes X et Y , $[d_A, d_B, d_C, d_D]$ sont les distances horizontales du récepteur aux LED, (x, y) est la position du récepteur à estimer.

Pour un nombre considérable de positions estimées, on calcule la moyenne et on fait une approximation afin de trouver les coordonnées de la position estimée du récepteur.

Pour les espaces tridimensionnels (3-D), la position du récepteur est notée (x, y, z) et les quatre équations quadratiques deviennent :

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2 = d_A^2 \quad (3.28)$$

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 = d_B^2 \quad (3.29)$$

$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 = d_C^2 \quad (3.30)$$

$$(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2 = d_D^2 \quad (3.31)$$

On s'intéresse à l'étude du positionnement pour le cas 2-D.

Différentes positions estimées

La valeur de la distance est facilement obtenue par la détection des informations RSS des données reçues arrivant et en utilisant les équations (3.24), (3.25), (3.26) et (3.27). La figure 3.30 montre les résultats de positionnement en utilisant la technique de trilatération aux coordonnées (5, 5).

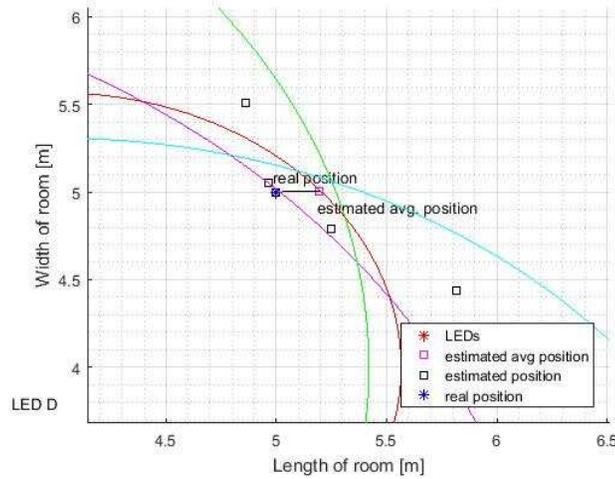


Figure. 3.30- Zoom sur les résultats obtenus -point (5,5).

En supposant que la position du récepteur est (5,5), on obtient cinq estimations de distances moyennes, d'où cinq positions estimées. En calculant leur moyenne et en prenant en considération l'angle d'orientation du récepteur, et l'approximation de x et y , on obtient les coordonnées (5.195, 5.004) qui sont considérées comme la position estimée du récepteur. Ainsi, une erreur de 19.46 *cm* (près du coin) est obtenue.

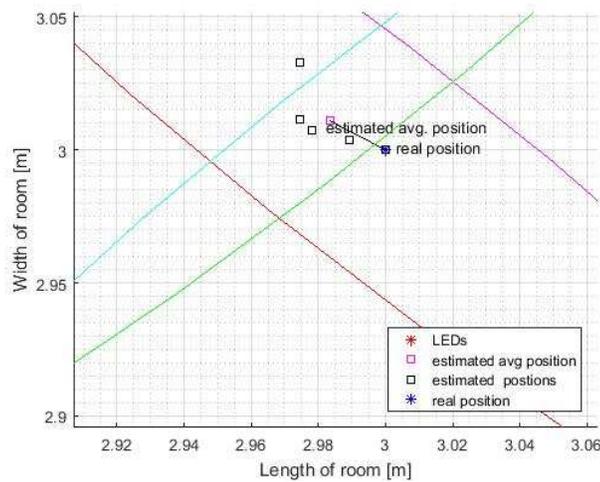


Figure. 3.31- Zoom sur les résultats obtenus -point (3, 3) (au centre).

Lorsque la position du récepteur est au point (3, 3), les coordonnées (2.983, 3.011) sont obtenues. Ce point est considéré comme la position estimée du récepteur. On trouve donc une erreur de (1.992 cm) comme on peut le voir dans la figure 3.31.

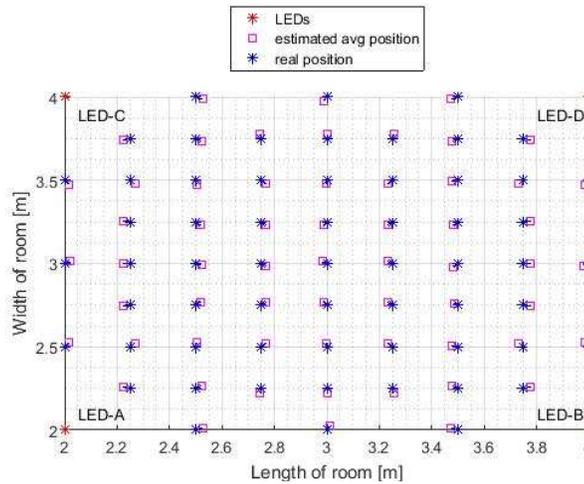


Figure. 3.32- 61 positions réelles et positions estimées.

La figure 3.32 présente 61 points sur le plan XY , où l'erreur de positionnement moyenne calculée est de 2.8 cm. L'erreur de positionnement est principalement due au faible bruit blanc gaussien additif (AWGN) considéré et augmenté surtout aux coins ; à cause de l'affaiblissement du signal de la LED dû à un taux de réflexion de 20%. Ainsi, lorsqu'on éloigne du centre ou on augmente le taux de réflexion, l'erreur de localisation augmente.

Pour déterminer la position, le choix de quatre LED éloignés des murs semble être une bonne solution en cas de besoin de large luminosité.

Les effets des murs ont un impact très important sur la précision du positionnement. En considérant le canal LOS, l'erreur est d'environ 1 cm [137] et en considérant le canal diffus (ce qui est plus proche des situations réelles), l'erreur de positionnement moyenne est d'environ 2.8 cm.

La figure 3.33 illustre la distribution d'erreur de positionnement en exposition indirecte au soleil et les résultats de la distribution d'erreur de positionnement en supposant une

exposition directe au soleil est illustré dans la figure 3.34. Comme prévu, les erreurs de positionnement sont relativement faibles dans la partie majeure de la pièce, mais deviennent beaucoup plus grandes lorsque le récepteur soit proche aux coins. De plus, l'erreur de positionnement obtenue avec une exposition indirecte au soleil (2.88 cm) est beaucoup moins importante en comparaison avec la situation d'exposition directe au soleil (9.68 cm) qui est un environnement plus bruyant. Pour comparer directement la différence entre ces deux scénarios, les histogrammes d'erreur de positionnement sont représentés dans les figures 3.35 et 3.36.

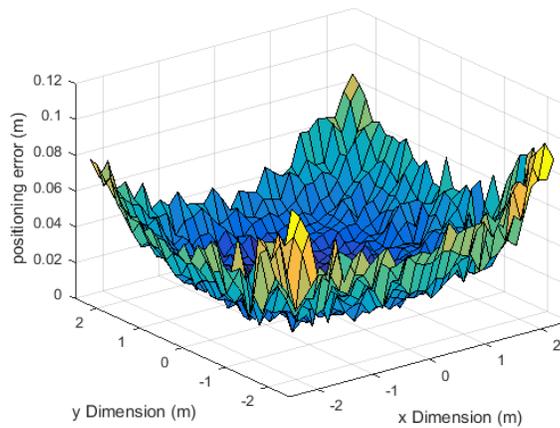


Figure. 3.33- Distribution d'erreur de positionnement (exposition indirecte au soleil).

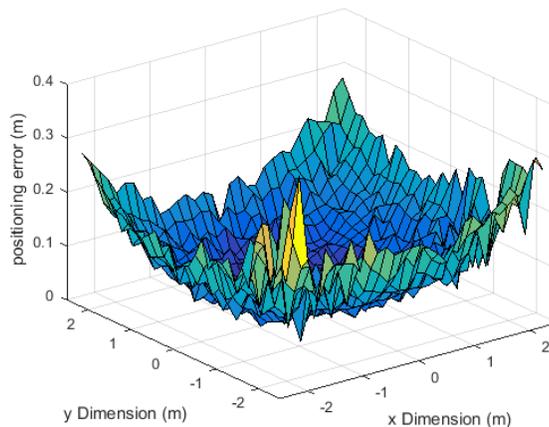


Figure. 3.34 Distribution d'erreur de positionnement (exposition directe au soleil).

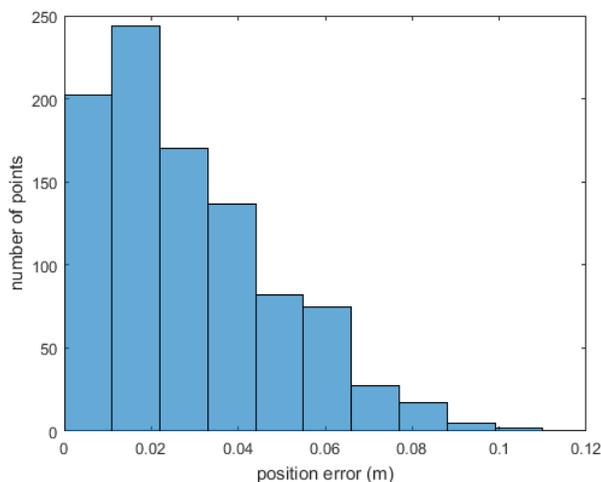


Figure. 3.35- Histogramme d'erreur de positionnement (exposition indirecte au soleil).

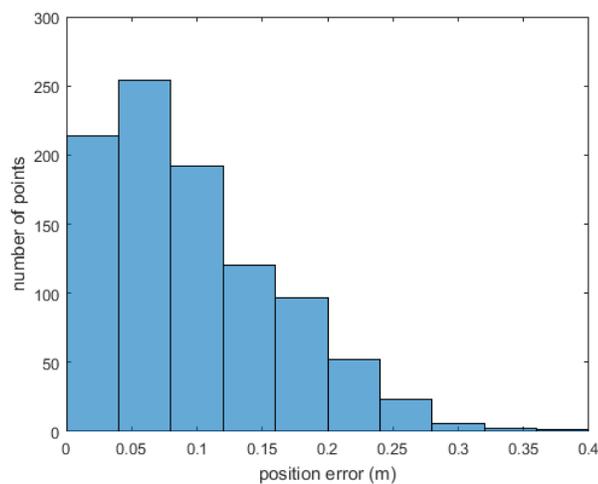


Figure. 3.36- Histogramme d'erreur de positionnement (exposition directe au soleil).

Pour évaluer plus concrètement les performances du système de positionnement, la précision représente un critère d'évaluation important.

En générale, la fonction de distribution cumulative (CDF) d'erreur de positionnement est utilisée pour évaluer la précision. La courbe de précision de ce système est obtenue et illustrée dans la figure 3.37.

Pour le cas d'une exposition directe au soleil, les résultats montrent que le taux de couverture du service est de 92%, dans ce cas le système proposé fournit une précision de 9.68 cm. Par contre, pour le cas d'une exposition indirecte avec le même taux de couverture (92%), le système fournit une précision de 2.88 cm.

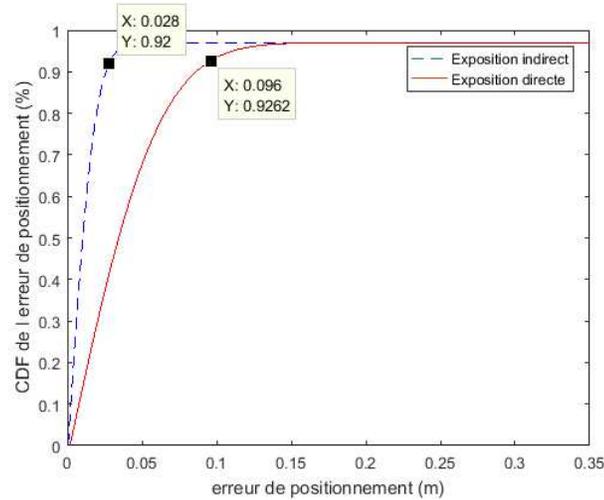


Figure. 3.37- Fonction de distribution cumulative (CDF) de l'erreur de positionnement (L'exposition directe et indirecte au soleil).

Les figures 3.38 et 3.39 représentent un banc de mesure réalisé au niveau de notre collaborateur français : Institut Supérieur d'Electronique de Paris (ISEP).



Figure. 3.38- Banc d'essais (ISEP).

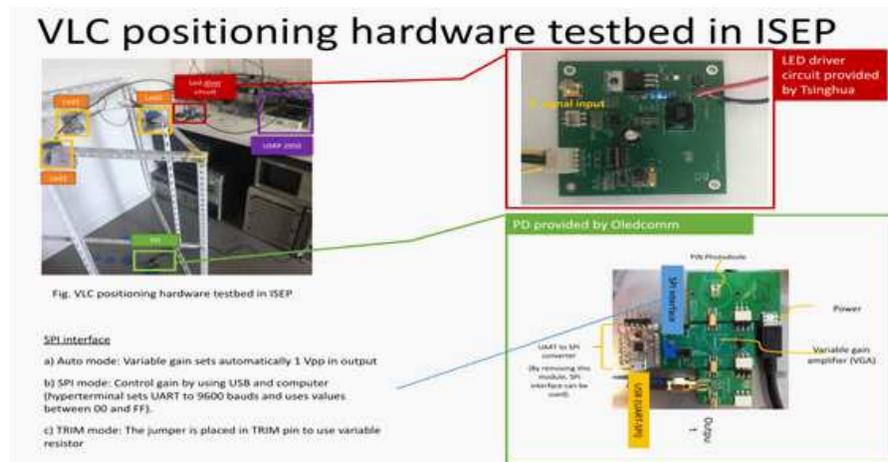


Figure. 3.39- Différents modules utilisés.

3.4 Nouveau système VLC-IPS utilisant une cellule solaire

Pour augmenter la durée de fonctionnement de récepteurs de point de vue efficacité énergétique, plusieurs approches ont été proposées. D'après [225], une taxonomie des mécanismes d'efficacité énergétique divisée en cinq composantes est présentée:

L'optimisation radio[226, 227], la réduction de données (aborder le prochain chapitre) [228], les modèles sleep/wakeup [229], le routage économique en énergie [230-232] et la récupération d'énergie qui est notre intérêt d'étude dans cette partie. La récupération d'énergie pour les systèmes sans fil a été étudiée en tant qu'option pour recharger les batteries des récepteurs sans fil sans alimentation externe. La récupération d'énergie dans l'environnement (solaire, éolien, etc.) est un domaine prometteur car il permet de travailler continuellement pendant une durée illimitée.

Parmi les propositions de récepteurs, les méthodes de récupération de l'énergie ambiante n'ont pas été utilisées largement. Le principe des propositions repose sur la récupération de RF. Par exemple, dans [233], les performances de trois dispositifs radioélectriques passifs sont analysées et comparées, et les résultats expérimentaux sont

présentés. Pour chaque proposition, une description et une caractérisation sont effectuées et certains résultats ont été discutés. Un dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique hybride est décrit dans [234] en combinaison avec un récepteur radio.

Dans cette proposition, la récupération d'énergie provient d'une source différente de la radio. Cependant, la récolte est réalisée à partir de vibrations ambiantes. La caractérisation et la discussion du système sont présentées à travers des simulations numériques. Notre travail donne naissance à un récepteur VLC qui utilise une source d'énergie plus commune, à savoir la lumière pour des fins de récolte. Il s'agit de la première étude utilisant la récupération d'énergie de la lumière dans un récepteur VLC pour un système IPS.

Dans cette section, un système de positionnement indoor (IPS) basé sur la communication par lumière visible (VLC) utilisant les cellules solaires comme récepteurs optiques est étudié. En raison des caractéristiques de la cellule solaire, le système proposé offre simultanément une communication et une récupération d'énergie pour un système de positionnement. Les courbes courant-tension (I-V), les courbes puissance-résistance (P-R) pour prouver la capacité de cette cellule à recevoir simultanément de l'énergie solaire et des signaux VLC; aussi la réponse fréquentielle de la cellule solaire sous lumière visible pour montrer la limitation de l'utilisation des fréquences plus élevées dans le système sont discutées. L'effet des interférences de rayonnement solaire sur l'efficacité du système de positionnement indoor (VLC-IPS) est également présenté. La technique de trilatération est utilisée pour estimer la position du récepteur. Les résultats obtenus montrent que le système proposé peut simultanément recevoir des données et collecter de l'énergie. Il fournit une précision de positionnement appropriée avec une erreur de position moyenne inférieure à 3 cm, ce qui est identique au résultat trouvé précédemment. Le système étudié est considéré comme une technologie respectueuse de l'environnement et prometteuse.

L'avantage d'utiliser une cellule solaire c'est qu'elle est considérée comme un récepteur VLC autoalimenté. En outre, les systèmes VLC-IPS ne nécessitent pas de signaux VLC à haute vitesse [235, 134]. La technologie mondiale des cellules solaires est rapidement

développée grâce aux efforts des chercheurs pour augmenter l'efficacité [236, 237]. Les cellules solaires sont largement utilisées dans de nombreuses applications telles que les charges de téléphone solaires, les flashes solaires et les calculatrices, etc. [238, 239]. Bien que les cellules solaires sont principalement utilisées pour exploiter l'énergie solaire [240, 241], elles jouent également un rôle important dans la réception d'un signal optique sans fil [208]. En plus d'une alimentation électrique externe inutile, elles peuvent fournir une efficacité énergétique du côté du récepteur [242].

Le système de récupération d'énergie et de détection de signaux est une nouvelle conception proposée par [243] en tant que système VLC avec récepteur de cellule solaire; également dans [244], une cellule solaire a été utilisée comme récepteur simultané pour les signaux d'énergie solaire et la communication par lumière visible (VLC), où la transmission de données a été exploitée par ces derniers travaux. Dans cette partie de travail, notre apport est l'utilisation des cellules solaires dans les systèmes de positionnement indoor. En outre, le signal optique VLC modulé est converti en signal de données électrique par l'ensemble de cellules solaires du récepteur sans l'ajout d'une alimentation externe. Ce signal électrique peut être utilisé pour remplir la batterie du récepteur. On note que les cellules solaires amorphes peuvent recevoir des données VLC et récupérer de l'énergie en même temps.

Pour localiser le récepteur, la même procédure dans la première partie du chapitre est utilisée pour estimer la distance du récepteur aux émetteurs, les informations provenant du signal reçu sont requises.

Un scénario similaire aux conditions d'éclairage réelles est résolu à l'aide de simulations MATLAB. Les résultats indiquent que la cellule solaire est capable de recevoir des données et de collecter de l'énergie en même temps. En outre, une précision de positionnement appropriée a été obtenue.

3.4.1 Description et analyse du modèle

La figure 3.40 présente le système proposé et ses composants. Du côté de l'émetteur, le système est constitué d'un modulateur pour la modulation de la LED, un module driver

pour contrôler la LED et charger de réguler le flux électrique traversant la LED, et une lumière LED. Le côté récepteur comprend une cellule solaire intérieure qui fonctionne comme un dispositif récepteur et un ensemble de modules chargés de la récupération et du décodage du signal. Comme l'alimentation du récepteur utilise uniquement l'énergie recueillie par la cellule solaire intérieure, il est nécessaire d'utiliser des composants capables de fonctionner avec la quantité d'énergie récupérée par la cellule.

Les mêmes coordonnées des LED et paramètres nécessaires utilisées sont identiques aux ceux de la première partie ; la distance supposée entre l'ensemble de cellules solaires 2×8 et la LED $15w$ est de $2m$.

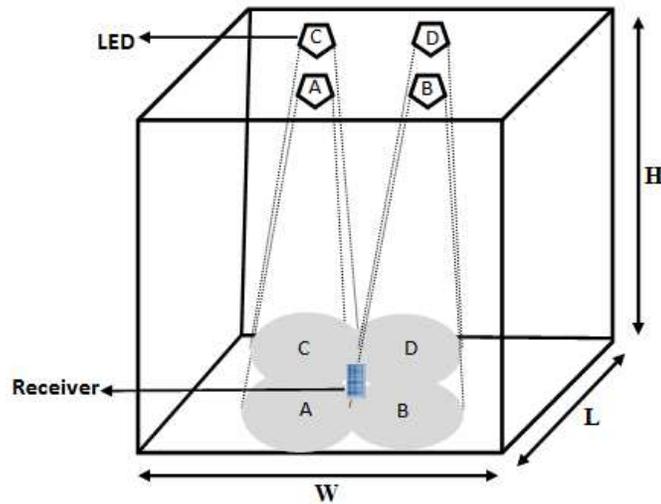


Figure. 3.40- Modèle Proposé : cas d'une cellule solaire.

Analyse du modèle

Afin d'analyser la relation entre le module d'émetteur LED et le récepteur de cellule solaire, une approximation est formulée.

Modèle du canal et de la LED

Puisque la contribution est au niveau de récepteur, la modélisation du canal et de l'émetteur est identique à celle de la première partie [Equations (2.19) et (3.9)].

Modèle de cellule solaire

Pour le récepteur, il est nécessaire de prendre en compte la quantité d'énergie collectée lors de la récupération de la lumière à l'aide de la cellule solaire. Ensuite, la prochaine étape consiste à caractériser la cellule solaire choisie. Les composants du récepteur doivent présenter une consommation d'énergie extrêmement faible, car la consommation de tous les composants travaillant ensemble ne doit pas dépasser la quantité d'énergie collectée par la cellule solaire.

Le modèle de cellule solaire dans ce système est illustré par la figure 3.41 et peut être exprimé par [245]

$$I = N_p I_p - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{N_s \alpha K T} \right] - 1 \right\} - C \frac{dV}{dt} - \frac{V + IR_s}{R_{th}} \quad (3.32)$$

où N_p est le nombre de cellules solaires en parallèle, N_s est le nombre en série, I_p est le courant lumineux, I_0 est le courant de saturation de la diode, V est la tension de sortie de la cellule solaire, I est le courant de sortie et α est une constante qui est typiquement dans l'intervalle [1; 3], en supposant que

$$K_0 = \frac{AKT}{q} \quad (3.33)$$

et comme $R_{th} \gg R_s$, (3.32) peut être décrite par

$$I = N_1 I_p - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(V + IR_s)}{N_2 K_0} \right] - 1 \right\} - C \frac{dV}{dt} \quad (3.34)$$

Tant que I_p est positivement proportionnelle à la puissance d'illuminance reçue pour la cellule solaire, donc

$$I_p = \frac{S}{1000} I_{sc} \quad (3.35)$$

Où S est la puissance d'illuminance de la cellule solaire. I_{sc} est le courant de court-circuit. Tous les paramètres sont pris en compte dans les conditions de test standard (STC). La cellule solaire fonctionne à l'état ouvert si $I = 0$, (3.34) devient

$$N_p I_p = I_0 \left[\exp \left(\frac{U_{oc}}{N_2 K_0} \right) - 1 \right] \quad (3.36)$$

donc

$$I_0 = \frac{N_p I_p}{\exp \left(\frac{U_{oc}}{N_2 K_0} \right) - 1} \quad (3.37)$$

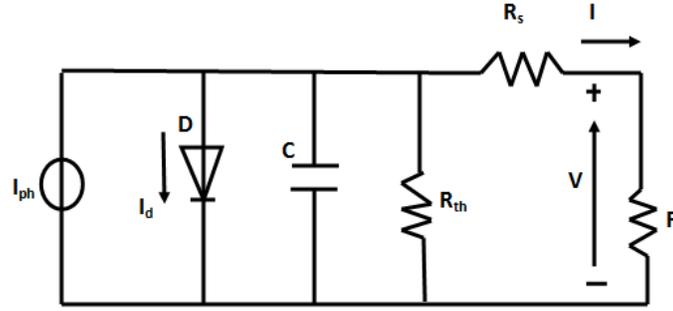


Figure. 3.41- Modèle de cellule solaire typique.

Système global

Dans le cas où $P_r = S$, les deux modèles précédents peuvent être connectés. Par conséquent, en combinant (3.34), (3.35) et (3.36), la relation finale entre U du côté de la cellule solaire et la puissance du côté de la LED peut être exprimée comme suit:

$$U = \begin{cases} P_t \frac{m+1}{2\pi d^2} \cos^m \phi \cos \psi T_s(\psi) g(\psi) \frac{1}{K_1} \left[1 - \frac{1}{K_2 R_h} \exp \left(\frac{U}{K_3} \right) \right], & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (3.38)$$

avec R_h : la résistance de charge de la cellule solaire; K_1 , K_2 et K_3 sont des constantes dépendant des paramètres N_p , N_s , I_{sc} et U_{oc} .

3.4.2 Principe de d'algorithme de positionnement

Dans cette section, la technique de trilatération pour estimer la position d'utilisateur est exploitée. En appliquant l'estimation linéaire des moindres carrés pour le positionnement en 2D, on obtient l'emplacement du récepteur [137].

Les équations modélisant l'algorithme sont données auparavant (3.17)-(3.29).

3.5 Résultats et discussion

Les paramètres de la cellule solaire AM-5308 sont choisis pour ce travail, en fonction des équations (3.34), (3.35) et (3.36). La configuration expérimentale de la réception des signaux VLC et de l'énergie solaire utilisant une cellule solaire est illustrée dans la figure 3.42. Lorsqu'une variation de l'intensité de la lumière reçue par la cellule se produit, cette variation est reflétée dans la tension fournie par la cellule. Ce phénomène est utilisé pour moduler les signaux de lumière visible avec la modulation OOK.

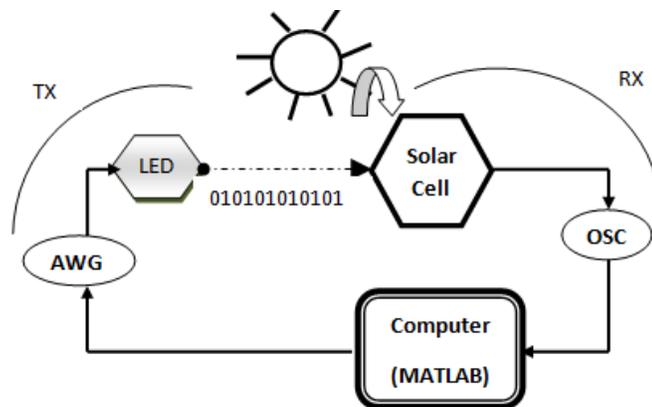


Figure. 3.42- présentation du système VLC utilisant un récepteur de cellule solaire.

Une séquence binaire pseudo aléatoire (PRBS) d'une LED est modulée par un générateur de signaux arbitraire (AWG). La source de puissance optique et la source d'interférence avec le signal VLC sont fournies par l'énergie solaire. Le signal VLC est récupéré sur l'ordinateur via un oscilloscope en temps réel (OSC). Le signal reçu est analysé à l'aide du logiciel MATLAB.

Afin d'identifier les caractéristiques et les limites de la cellule solaire intérieur choisie, des simulations ont été effectués:

1. L'identification des courbes de réponse des cellules solaires: -courbes de courant, de tension et de puissance.
2. Un test numérique permettant d'identifier la réponse des cellules solaires à différentes fréquences.

Les courbes courant - tension ($I - V$) de différents ensembles de cellules solaires sont représentées dans la figure 3.43, notant que la tension U_{oc} du circuit ouvert de l'ensemble 4×4 est égale à la moitié de l'ensemble de U_{oc} de l'ensemble 4×8 et que le courant de court-circuit I_{sc} de l'ensemble 2×8 est la moitié de valeurs I_{sc} de l'ensemble 4×8 . Les valeurs de U_{oc} de 2×8 et 4×8 sont comprises entre 3 et 3,5V, ce qui est suffisant pour charger une batterie au lithium.

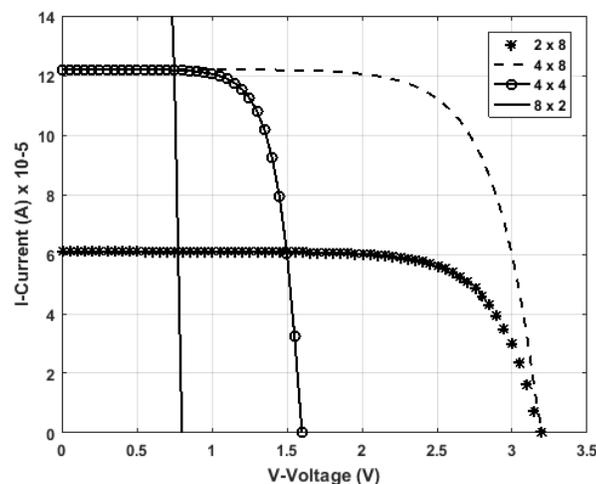


Figure. 3.43- Courbes I-V pour différents ensembles de cellules solaires.

La figure 3.44 montre les courbes courant-tension ($I - V$) de l'ensemble 2×8 sous différents illuminance 300, 500 et 1000 Lx, ce qui correspond à l'organisation internationale de normalisation (ISO) de 300 à 1500 Lx, où elle est suffisante pour le travail de bureau. [219].

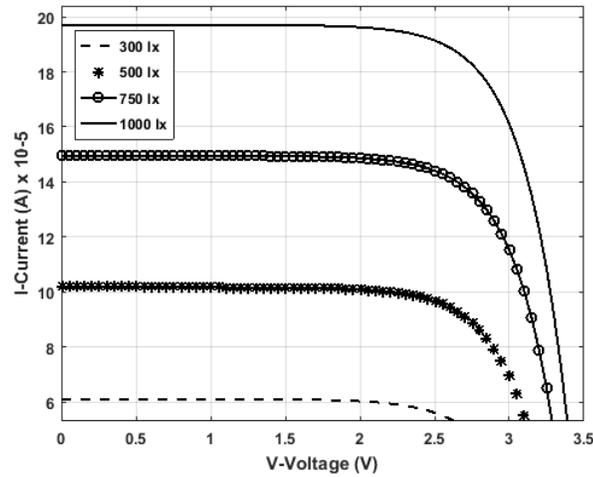


Figure. 3.44- Courbes I-V pour différents illuminance de 2x8 (T=298).

La figure 3.45 illustre les courbes Puissance-Résistance ($P-R$) des différents ensembles de cellules solaires. La résistance correspondante à la puissance de sortie de 1.4×10^{-4} W inférieure à 400 Lx est de $50 \text{ k}\Omega$. Les propriétés de puissance d'un ensemble 2×8 sous différentes valeurs d'illuminance sont simulées dans la figure 3.46.

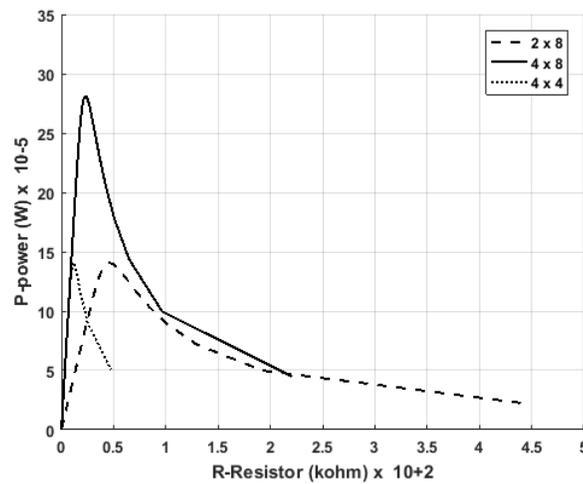


Figure. 3.45- Courbes P-R pour différents ensembles de cellules solaires.

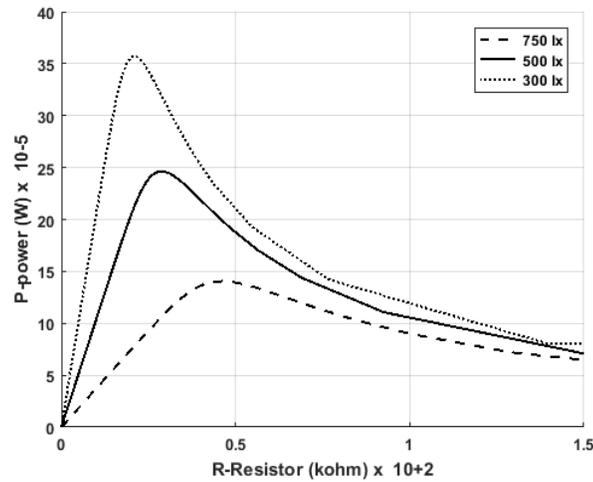


Figure. 3.46- Courbes P-R pour différentes illuminance de l'ensemble 2x8 (T=298 k).

Pour vérifier l'aptitude de la cellule solaire à fonctionner en tant que récepteur optique, la réponse fréquentielle de la cellule solaire est mesurée lorsque l'émetteur est une LED blanche.

La figure 3.47 montre que la largeur de la bande passante de la réponse fréquentielle est suffisante pour recevoir des signaux VLC à basse fréquence.

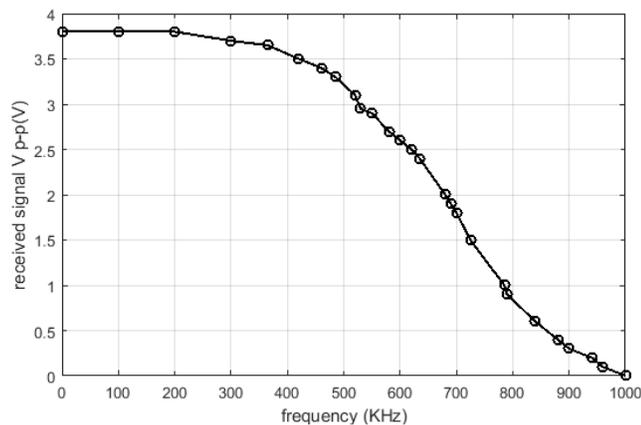


Figure. 3.47- Réponse fréquentielle.

La figure 3.48 présente l'amplitude de la tension reçue avec un récepteur de cellule solaire en fonction de rayonnement solaire. L'énergie solaire et la puissance du signal

VLC présente le niveau supérieur du signal VLC V_{high} . Le niveau inférieur du signal VLC V_{low} est uniquement produite par l'énergie solaire. V_{pp} est la tension d'amplitude pic du signal VLC. V_{high} , V_{low} et V_{pp} peuvent être exprimés par l'équation (3.39) [244].

$$\begin{cases} V_{high} = \text{rayonnement solaire} + \text{puissance signal VLC} \\ V_{low} = \text{rayonnement solaire}, & V_{pp} = V_{high} - V_{low} \end{cases} \quad (3.39)$$

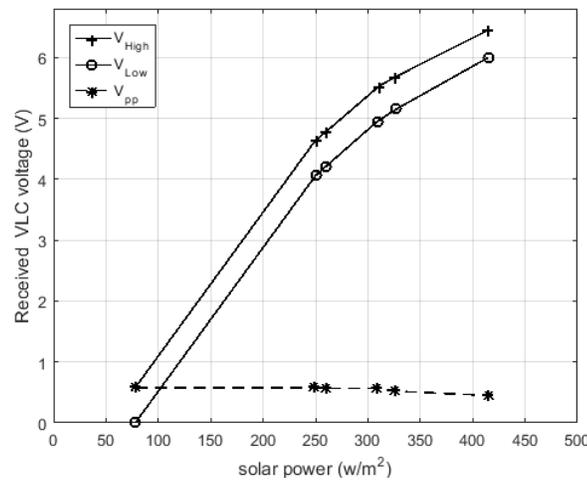


Figure. 3.48- Effet de rayonnement solaire sur le système VLC-IPS.

Comme illustré dans la figure 3.48, sauf les valeurs pour un rayonnement solaire de 400 W/m^2 lorsque le signal VLC reçu est un peu saturé, les amplitudes pic à pic du signal reçu sont presque les mêmes. Ainsi, le fonctionnement du système VLC-IPS est réalisé avec succès malgré la présence de fortes interférences d'énergie solaire. Notant que la cellule solaire ici est en face de l'émetteur et non pas au soleil. C'est pourquoi le rayonnement solaire maximal est de 400 W/m^2 .

Les résultats obtenus avec la méthode de positionnement par trilatération, les positions des LED, la position réelle et la position moyenne estimée sont illustrés dans la figure 3.49. Pour une vision plus claire, un diagramme zoomé est présenté dans la figure 3.50.

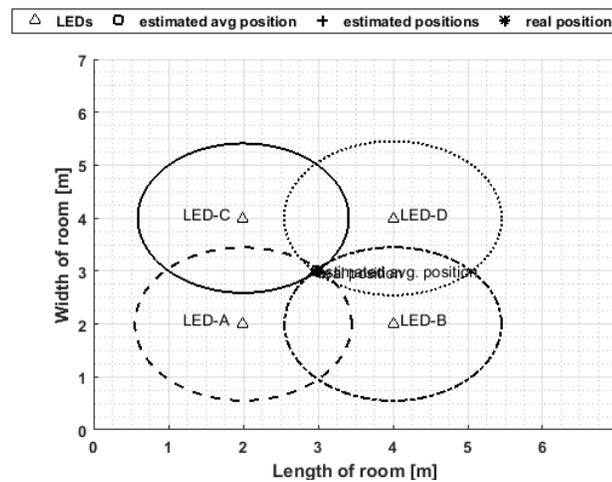


Figure. 3.49- Résultats utilisant la méthode de positionnement par trilatération.

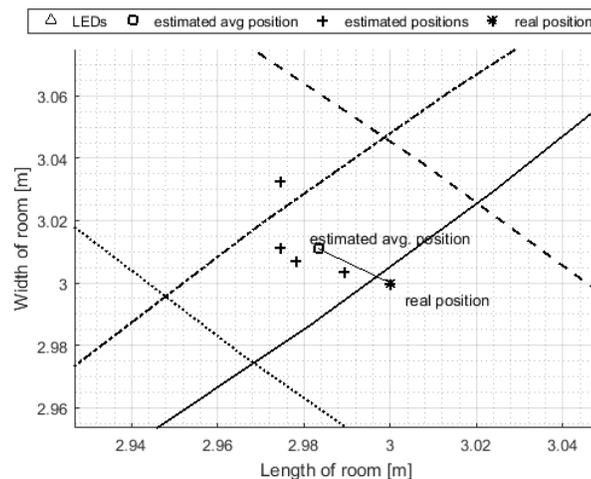


Figure. 3.50- Résultats obtenus avec la méthode de positionnement par trilatération.

3.6 Concluion

Ce chapitre présente deux contributions principales. La première est consacrée à l'étude d'un système de positionnement indoor où la simulation du modèle est réalisée en utilisant la technique de la trilatération. En utilisant MATLAB comme logiciel de simulation, la distribution de l'éclairage, l'analyse du SNR avec exposition directe et indirecte au

soleil ont été analysées et discutées. Tenant compte l'angle d'orientation du récepteur pour estimer l'emplacement, une erreur de positionnement moyenne de 2,8 cm est obtenue.

Dans la deuxième contribution nous avons proposé un nouveau système de positionnement indoor basé sur VLC utilisant une cellule solaire comme récepteur optique contrairement au système de positionnement VLC-IPS conventionnel. Comme il est bien connu, la cellule solaire est un composant passif, elle ne nécessite donc pas d'alimentation externe telle que la photodiode. De plus, la collecte d'énergie et la détection du signal VLC peuvent être effectuées simultanément. L'étude des caractéristiques des cellules solaires montre qu'elles peuvent être utilisées pour recevoir des signaux VLC. On a également démontré que l'opération VLC est réalisée avec succès. L'erreur de position moyenne estimée est presque similaire au premier cas. Notant que ces résultats de positionnement sont basés sur un taux de réflexion faible de 20%.

Nouvelle technique de positionnement indoor basée sur la communication par la lumière visible utilisant la compression spectrale

4.1 Introduction

La technique fingerprinting basée sur les mesures de RSS est considérée comme la méthode de localisation la plus répandue en raison de sa grande précision par rapport aux autres méthodes. Elle ne nécessite pas de mesures en visibilité directe des émetteurs. La localisation fingerprinting basée sur RSS comprend deux phases principales: hors ligne (formation/construction) et en ligne (estimation). La taille de la base de données requise pour les phases de formation et d'estimation augmente rapidement avec l'augmentation des zones de couverture et du nombre de LED.

Dans ce chapitre, une amélioration par rapport à la localisation de fingerprinting traditionnelle basée sur RSS est proposée en réduisant la taille de base de données simultanément pendant les deux phases de formation et d'estimation. On va présenter une nouvelle approche basée sur la compression spectrale permettant de réduire la taille de la base de données. La solution de la réduction réside dans le nouveau concept d'images RSS compressées, ce qui permet de stocker qu'une fraction des composants du domaine de transformation par une analyse fréquentielle 2D. La méthode de localisation proposée réduit le nombre total de points de référence de fingerprint dans l'espace de localisation, minimisant ainsi le temps nécessaire à la lecture des signaux lumineux visibles et le nombre de points de référence nécessaires au cours du processus de formation de la méthode fingerprinting; ce qui réduit le temps de traitement et donc une moindre consommation d'énergie. En outre, ce système a une faible complexité et il est capable de fournir des résultats comparables avec l'approche traditionnelle de fingerprinting basée sur RSS avec une erreur d'estimation de localisation similaire et une réduction importante de la taille de base de données. La plupart des travaux de recherche sur le positionnement basés sur RSS utilisent des méthodes fingerprinting et trilatération comme techniques de base pour le développement d'IPS [28]. Parmi eux, fingerprinting est largement adoptée en raison de sa précision élevée [246]. L'estimation de la position est basée sur des données pré-collectées de la zone d'utilisateur, qui sont ensuite transmises au récepteur pendant la phase d'estimation. Cependant, la construction d'une base de données étendue de points de référence pendant la phase de formation rend la fingerprinting fastidieuses et laborieuses. Pour obtenir une taille de base de données réduite et donc un transfert de données réduit de / vers l'utilisateur, des modèles de perte de trajet par propagation radio (PL) basés sur Wi-Fi ont été proposés [247-249], où cette approche nécessite seulement une fraction de la taille de la base de données par rapport à l'approche fingerprinting. Cependant, la précision de positionnement avec les modèles PL est inférieure par rapport à l'approche fingerprinting. Le problème résolu dans cette partie est le suivant : **comment atteindre les performances de la méthode fingerprinting en termes de précision avec la faible complexité des méthodes RSS?**

La nouvelle idée des images RSS compressées est introduite pour résoudre ce problème où la carte de puissance RSS construite pour chaque LED est considérée comme une "image" et analysée dans le domaine spectral, parce que ces images contiennent implicitement le bruit de mesure et d'ombre. Dans le domaine de transformation, l'utilisation d'une compression avec perte réduit non seulement la taille des informations à stocker, mais joue également un rôle de filtre passe-bas en filtrant le bruit. Le concept de compression des images RSS est basé sur la corrélation explicite entre les mesures voisines apportées par la LED. Ce processus exploite le contenu du domaine de transformation des images RSS et seule une partie des composants est stockée dans la base de données. Au cours de la phase de compression avec perte, les informations perdues sont principalement la partie bruit.

En tenant compte de cet avantage, il est possible d'obtenir des résultats très précis, similaires au cas fingerprinting traditionnel basé sur RSS. Dans l'analyse spectrale et parmi les transformations populaires, l'utilisation de la Transformée Cosinus Discrète (DCT) est proposée en raison de sa capacité à concentrer l'énergie du domaine fréquentiel dans quelques coefficients DCT. L'analyse spectrale des mesures RSS a également été étudiée pour la technologie Wi-Fi dans [213, 250], mais à l'écart des autres travaux, l'analyse spectrale dans la technologie de communication par la lumière visible est innovante. Ainsi, la corrélation spatiale des mesures RSS prises à partir de la même LED est exploitée. En choisissant le nombre de coefficients DCT stockés par image, on peut ajuster la quantité et la qualité de la compression. La localisation proposée utilise la fingerprinting basée sur l'image RSS compressée, où le RSS de l'emplacement prédéterminé et les coordonnées d'emplacement sont stockés dans la base de données en tant que RP. Ensuite, dans la phase d'estimation, l'algorithme pondéré k-plus proche voisin (Wk-NN) est utilisé pour obtenir la position estimée [251].

4.2 Présentation du système étudié

4.2.1 Modélisation du signal RSS

On propose une plate-forme de positionnement VLC simple basée sur les valeurs RSS, qui sont obtenues à partir des pics de densité spectrale de puissance (PSD) des signaux reçus. La configuration du système est illustrée dans la figure 4.1. Supposons qu'on peut transmettre M différents signaux sinusoïdaux $s_i(t)$ de fréquences différentes f_i à partir de M LED émetteurs situés à des positions $z_i = [x_i, y_i, h]^T$.

Les signaux reçus par le récepteur à une position inconnue $p = [x, y, 0]^T$ peuvent être exprimés comme suit:

$$y(t) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \beta_i s_i(t - \tau) + n(t) \quad (4.1)$$

Où α_i est l'atténuation du signal du canal optique entre la i -ème LED et le PD dans le scénario est illustré par la figure. 4.1. La réactivité β_i est le facteur de conversion du domaine optique au domaine électrique (O/E), c'est en fonction de la longueur d'onde de la lumière reçue. $n(t)$ est le bruit. Les valeurs α_i et β_i peuvent être considérées comme des constantes sur la largeur de la bande optique de la portée du signal. Pour la communication en visibilité directe, donné pour le cas d'une LED Lambertienne généralisée d'ordre m , α_i est en fonction de la surface de la photodiode S , la distance d_i entre chaque LED et le récepteur, ainsi les angles d'irradiance et d'incidence ψ et ϕ par rapport à l'émetteur et au récepteur respectivement, sont indiqués comme suit:

$$\alpha_i = \frac{(m+1)S}{2\pi d_i^2} \cos^m \phi \cos \psi \quad (4.2)$$

La temporisation $\tau_i = d_i/c$, où c est la vitesse de la lumière et la distance d_i entre les i -ème LED et le récepteur est donnée par :

$$d_i = \sqrt{h^2 + (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (4.3)$$

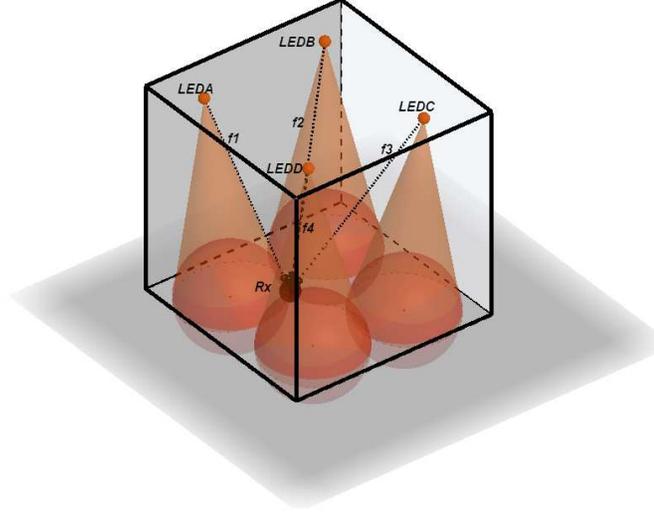


Figure. 4.1- Scénario du système étudié.

Maintenant, considérons le cas où $s_i(t)$ a une forme d'onde sinusoïdale avec une période T donnée par:

$$s_i(t) = w(t) u_i(t) = w(t) + w(t) \cos(2\pi f_i t) \quad (4.4)$$

Où $u_i(t) = 1 + \cos(2\pi f_i t)$.

La densité spectrale de puissance (PSD) du périodogramme de $y(t)$ peut être exprimée comme suit:

$$\hat{S}_{per}(w) = \frac{1}{N} |Y_N(w)|^2 \quad (4.5)$$

où N est la longueur de la FFT et $Y_N(w)$ la FFT de $y(t)$, ce qui peut être exprimé par :

$$Y_N(w) = \sum_{t=0}^{N-1} y(t)e^{-j\omega t} \quad (4.6)$$

Il est bien connu que les pics de $\widehat{S}_{per}(w)$ indiquent les puissances moyennes des signaux reçus à différentes fréquences. En conséquence, nous pouvons obtenir M valeurs RSS de chaque signal reçu en capturant les pics des emplacements de fréquences fixes dans la densité PSD estimée. C'est-à-dire que le vecteur RSS peut être donné par :

$$r = \left[\widehat{S}_{per}(f_1), \widehat{S}_{per}(f_2), \dots, \widehat{S}_{per}(f_M) \right]^T \quad (4.7)$$

où $[\cdot]^T$ est l'opérateur de transposition.

4.2.2 Construction de fingerprint RSS

Supposons qu'on peut représenter une zone de localisation par une grille de $K = q \times q$. À chaque point de la grille, un PD reçoit les signaux transmis par M LED et les combine en $y(t)$ où $(t = 1, 2, \dots, T/T \gg N)$. En se basant sur $y(t)$ reçu, on peut calculer $Q = T \setminus N$ des PSD à chaque point en utilisant les équations (4.5) et (4.6). Ensuite, les vecteurs RSS de chaque point peuvent être obtenus en utilisant (4.7). Ce processus s'appelle étude de site. La répétition de ce processus K fois permet de créer toutes les fingerprints (FPs). On notant les fingerprints du RSS finales comme R ; on peut résumer les procédures de construction de fingerprints RSS dans l'algorithme suivant:

<p>Algorithme: construction de fingerprint RSS</p> <p>Input : 1) Le nombre des points K; 2) T points de $y(t)$, $t = 1, 2, \dots, T$ de chaque point de la grille; La longueur de la FFT N à chaque point de la grille.</p> <p>Output: Les fingerprints du RSS "R".</p> <pre> 1: for $g = \{1, 2, \dots, K\}$ do 2: for $k = \{1, 2, \dots, Q\}$ do 3: Calculez la FFT de longueur N en utilisant l'équation. (6); 4: Calculez l'estimation de la densité PSD en utilisant l'équation. (5); 5: Calculez le vecteur RSS r^k en utilisant l'équation. (7); 6: end for 7: $R_g = [r^1, r^2, \dots, r^Q]$; 8: end for 9: $R = [R_1, R_2, \dots, R_K]$; 10: return R </pre>

4.3 Compression DCT de la base de données pour un système VLC-IPS

4.3.1 Compression des images RSS

La création et la compression des images RSS ont été effectuées séparément pour chaque LED. En considérant $j^{\text{ème}}$ LED, un nombre d'éléments Ω_j dans est donné en tant que $N_j^{(RSS)} = |\Omega_j|$ et contient différentes coordonnées et valeurs RSS décrites par $\{x_m, y_m, R_m\}_j$. D'abord, un processus d'interpolation et d'extrapolation est appliqué aux points bas et vide de la grille dans la zone de couverture de la LED [249]. Ensuite, l'image RSS complète résultante pour le $j^{\text{ème}}$ LED est désignée par une matrice G_j de taille $M_j \times N_j$ fournissant des valeurs RSS pour chaque coordonnée y (en colonnes) et x (en lignes) (voir (a), (b) figure 4.2). Puis, la matrice d'images DCT H_j (voir (b) figure 4.2) est obtenue en appliquant la transformation DCT au niveau de l'image RSS. Ces approches présentées ci-dessus sont comparés aux autres approches classiques basées sur RSS, qui ne peuvent présenter que la moyenne locale des valeurs RSS. La magnitude du coefficient

DC (courant continu) est généralement beaucoup plus grande que les autres coefficients DCT et l'énergie dans H_j est concentrée autour des basses fréquences. En effet, les variations RSS à l'intérieur de l'image sont considérablement inférieures au coefficient DC qui représente la moyenne de l'image RSS. Ensuite, la moyenne à la première itération de l'image RSS est définie comme suit:

$$G_j^{(0)} = G_j - u_j, \text{ où } u_j = \frac{1}{M_j N_j} \sum_{s=0}^{M_j N_j - 1} G_j(s) \quad (4.8)$$

où u_j est le coefficient DC de H_j et $G_j(s)$ l'élément $s^{\text{ème}}$ de la matrice G_j (de taille $M_j \times N_j$) avec un ordre d'index arbitraire. Chaque élément de la matrice DCT de $G_j^{(0)}$ est:

$$H_j(p_1, p_2) = w_{p_1} w_{p_2} \sum_{n_1=0}^{M_j-1} \sum_{n_2=0}^{N_j-1} G_j^{(0)}(n_1, n_2) \cos \left[\frac{\pi (2n_1 + 1) p_1}{2M_j} \right] \cos \left[\frac{\pi (2n_2 + 1) p_2}{2N_j} \right] \quad (4.9)$$

où

$$w_{p_1} = \begin{cases} 1/M_j & p_1 = 0 \\ \sqrt{2/M_j} & 1 \leq p_1 \leq M_j \end{cases} \quad w_{p_2} = \begin{cases} 1/N_j & p_2 = 0 \\ \sqrt{2/N_j} & 1 \leq p_2 \leq N_j \end{cases}$$

Avec $p_1^{\text{ème}} = 0, \dots, M_j - 1$ est l'indice de la ligne et $p_2^{\text{ème}} = 0, \dots, N_j - 1$ l'indice de la colonne. Un seul index q représentant les éléments de H_j en tant que $H_j(q)$ peut être utilisé lorsque les dimensions de la matrice sont définies. Ces éléments sont également appelés coefficients DCT. Ainsi, en ne stockant que les coefficients les plus significatifs de H_j . En choisissant de sélectionner le nombre de coefficients DCT stockés par rapport à $N_j^{(RSS)}$ afin d'assurer la compression de données souhaitable pour chaque image, le nombre de coefficients DCT stockés est donné par:

$$N_j^{(coef)} = \left[\eta N_j^{(RSS)} \right] \quad (4.10)$$

Où $0 \leq \eta \leq 1$ est un paramètre de conception définissant le rapport entre $N_j^{(coef)}$ et $N_j^{(RSS)}$. Ainsi, les $N_j^{(coef)}$ éléments de plus grande magnitude tirés de H_j notés comme $\{H_j(q_l) / l = 0, \dots, N_j^{(coef)} - 1\}$ représentent les coefficients DCT stockés, où les indices pour les éléments de plus grande magnitude sont q_l .

Finalement, en se basant sur l'ensemble réduit de coefficients DCT, l'image est reconstruite. Il est important de stocker d'abord les paramètres suivants dans la base de données de chaque image afin de les reconstruire: identité (ID_j) de l'image (où LED), coordonnées de l'image, dimensions de l'image (M_j et N_j), coefficient DC (u_j) et coefficients DCT les valeurs $H_j(q_l)$ avec leurs indices correspondants q_l tel que $l = 0, \dots, N_j^{(coef)} - 1$.

La première étape de la reconstruction des images consiste à définir la version compressée de la matrice DCT de taille $M_j \times N_j$ comme suit:

$$\widehat{H}_j(q) = \begin{cases} H_j(q_l), & \text{quand } q = q_l \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4.11)$$

Ensuite, en se basant sur la DCT inverse, la version compressée de $G_j^{(0)}$ est définie sur la ligne n_1^{th} et la colonne n_2^{th} comme suit:

$$\widehat{G}_j^{(0)}(n_1, n_2) = \sum_{p_1=0}^{M_j-1} \sum_{p_2=0}^{N_j-1} w_{p_1} w_{p_2} \widehat{H}_j(p_1, p_2) \cos \left[\frac{\pi (2n_1 + 1) p_1}{2M_j} \right] \cos \left[\frac{\pi (2n_2 + 1) p_2}{2N_j} \right] \quad (4.12)$$

Où w_{p_1} et w_{p_2} sont définis dans l'équation (4.9), et $n_1^{ème} = 0, \dots, M_j - 1$ est l'indice de la ligne et $n_2^{ème} = 0, \dots, N_j - 1$ est l'indice de la colonne. Enfin, en ajoutant la moyenne de l'image (c'est-à-dire le coefficient DC), l'image RSS compressée peut être obtenue comme suit:

$$\widehat{G}_j = \widehat{G}_j^{(0)} + u_j \quad (4.13)$$

4.3.2 Calcul de la base de données

Il est important de calculer la taille de la base de données en raison de son influence non seulement sur l'espace de stockage requis, mais également sur le taux de transfert de données et le temps nécessaire pour le processus. Le calcul de la taille de la base de données de FP par rapport à la quantité de nombres de valeur réelle requis peut être donné comme suit:

$$B_{FP} = \sum_{i=0}^{N_{FP}-1} 3 + 2N_i^{(LED)} \quad (4.14)$$

Où N_{FP} est le nombre de FP, $N_i^{(LED)}$ est le nombre de mesures de RSS dans le $i^{\text{ème}}$ FP.

Les fingerprints collectées nécessitent des informations différentes sur ses coordonnées (x, y, z) , les identités des LED et leurs valeurs RSS correspondantes.

La taille de la base de données contenant les images compressées \hat{G}_j peut être calculée comme suit:

$$B_{IM} = \sum_{j=0}^{N_{LED}-1} 7 + 2N_j^{(coef)} \quad (4.15)$$

Où N_{LED} est le nombre total des LED dans la base de données, $N_j^{(coef)}$ est le nombre de coefficients DCT stockés. L'identité, l'emplacement, les dimensions et la moyenne de l'image, les valeurs de coefficient DCT stockées et leurs indices sont nécessaires pour chaque image.

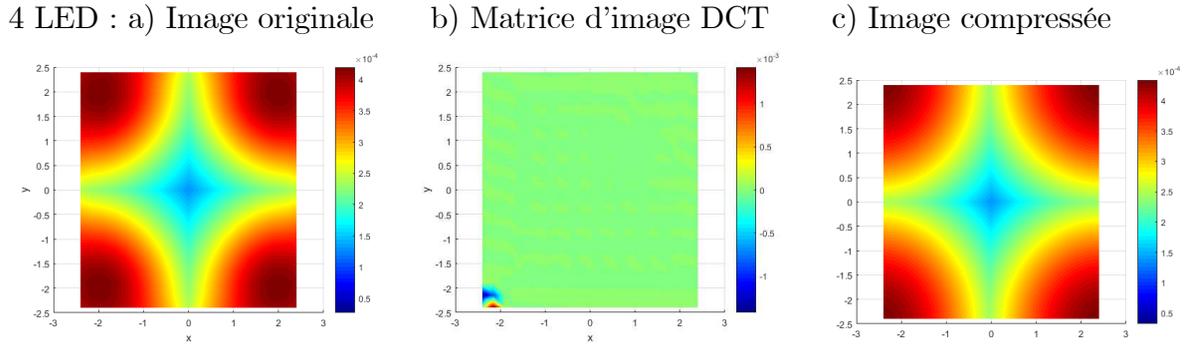


Figure. 4.2- Exemple de compression d'une image RSS cas de 4 LED (interpolée et extrapolée).

L'image originale est montrée en (a), la DCT de l'image originale (utilisée pour construire (c)) est montrée en (b), et l'image compressée correspondante est montrée en (c). On remarque que les valeurs de RSS inférieurs n'apparaissent pas dans l'image originale et comme la DCT affecte les valeurs les moins significatives, on a fait une illustration claire d'une LED.

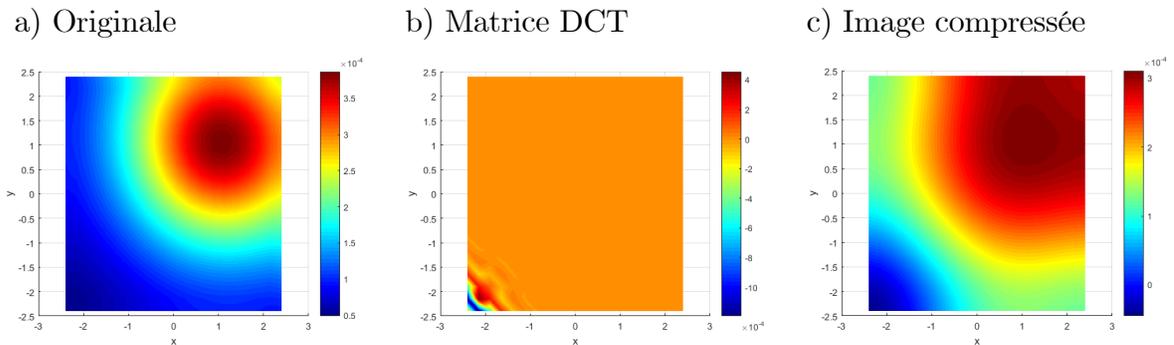


Figure. 4.3- Exemple de compression d'une image RSS cas d'une LED (1,1,3).

La figure 4.3 montre un exemple de compression d'une image RSS pour une LED où (a) représente l'image originale, (b) représente la DCT de l'image originale et enfin (c) représente l'image compressée correspondante.

4.3.3 Nouvelle technique d'estimation de position basée sur les images RSS

Considérant l'analyse précédente, les mesures RSS de la $j^{\text{ième}}$ LED à la position (x, y) peuvent être modélisées par:

$$RSS_j^{(x,y)} = \widehat{G}_j(T(x, y)) + W \quad (4.16)$$

En utilisant les informations stockées de l'emplacement de l'image et les dimensions de l'image, les coordonnées (x, y) sont mappées par $T(x, y)$ dans un indice d'image correspondant q , le bruit de mesure et l'erreur de compression d'image sont inclus dans le terme de bruit W . Où W est supposé un bruit blanc gaussien (AWGN) avec la variance σ_W^2 pour des raisons de simplicité. Cependant, dans la pratique, la distribution du bruit peut être différente de celle de Gauss. C'est pourquoi le bruit W est corrélé, car au moins l'erreur de compression est corrélée entre des emplacements proches.

Considérant des LED séparés, un utilisateur dispose d'un ensemble de mesures RSS indépendantes $(RSS_j^{(user)}, j \in \Omega_{LED})$, où Ω_{LED} est l'ensemble des indices j de LED intéressé.

4.3.4 Algorithme k-NN pour le positionnement VLC

Cette approche est basée sur les plus proches voisins pour localiser le récepteur. Dans la phase d'estimation, les distances euclidiennes d_E entre les valeurs $RSS_j^{(x,y)}$ de la phase de formation et les valeurs $RSS_j^{(user)}$ de mesurées au récepteur pendant son déplacement sont calculées comme suit:

$$d_E = \sqrt{\sum_{j=1}^l \left(RSS_j^{(user)} - RSS_j^{(x,y)} \right)^2} \quad (4.17)$$

où $RSS_j^{(user)}$ sont les valeurs RSS du récepteur obtenues lors de la phase d'estimation, $RSS_j^{(x,y)}$ sont extraites de la base de données réduite construite lors de la phase de formation, j est l'indice de la LED, N_{LED} est le nombre total de LED. En se basant sur les distances euclidiennes calculées, le récepteur est capable d'identifier ses k-NN qui ont k plus petites distances euclidiennes. Ensuite, la position du récepteur est estimée en faisant la moyenne des coordonnées de k-NN comme suit:

$$x = \frac{\sum_{j=1}^k x_j}{k}; \quad y = \frac{\sum_{j=1}^k y_j}{k} \quad (4.18)$$

Par conséquent, le poids à chaque voisin est donné par:

$$w_j = 1 - \frac{d_{Ej}}{\sum_{s=1}^k d_{Es}} \quad (4.19)$$

Alors, les coordonnées du récepteur sont calculées par:

$$x = \frac{\sum_{j=1}^k w_j x_j}{\sum_{j=1}^k w_j}; \quad y = \frac{\sum_{j=1}^k w_j y_j}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (4.20)$$

4.3.5 Configuration et Arrangement des LED

Pour confirmer la généralisation du nouveau mécanisme dans deux cas, deux configurations pour les positions des LED au plafond est supposée. Les différentes positions des LED considérées sont illustrées dans la figure. 4.4. Supposant que le nombre de LED considéré est limité à une zone de 8 LED ou moins.

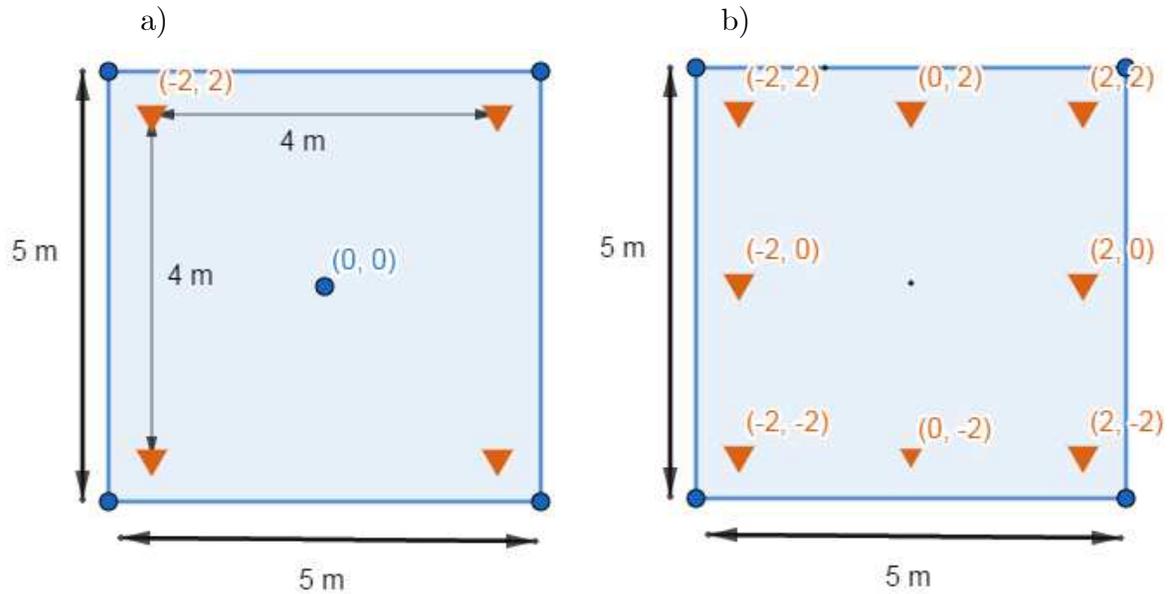


Figure. 4.4- Les dispositions de LED pour les deux cas: a) 4 LED, b) 8 LED.

4.4 Résultats et Discussions

4.4.1 Premier cas: 4 LED

La base de données est collectée à partir de 4 LED. On compare la précision de positionnement entre: la méthode fingerprinting traditionnelle basée sur RSS, l'approche basée sur l'image RSS compressée et l'approche basée sur le modèle RSS simple. Pour réaliser une comparaison équitable entre les deux premières approches, on a utilisé le même k-voisin. Les résultats sont donnés pour toute la zone d'utilisateur dans la pièce, considérant que la taille globale de la base de données est la somme de la taille de la base de données des LED.

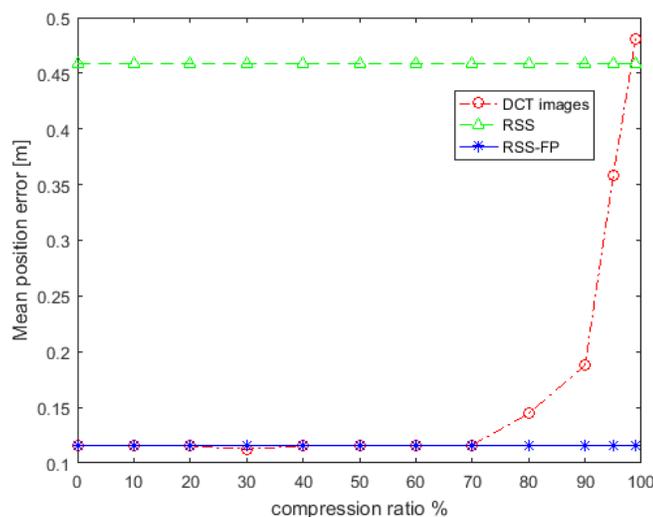


Figure. 4.5- L'erreur de positionnement moyenne en fonction du taux de compression de la base de données.

L'erreur de positionnement moyenne est donnée dans la figure 4.5 en fonction du taux de compression de la base de données ($1 - B_{IM}/B_{FP}$). A noter que les valeurs d'erreur des approches RSS et fingerprinting pour cette simulation sont respectivement 46 *cm* et 12 *cm*. L'erreur de positionnement des images DCT sature au taux de compression 75%, comme illustré dans la figure. 4.5. Cela signifie que les fingerprints d'origine sont bruités et qu'il n'est pas nécessaire de viser des images DCT trop précises. Dans la figure 4.5, différents taux de compression sont obtenus en variant le paramètre de conception η (c'est-à-dire le rapport entre le nombre de coefficients DCT stockés et le nombre de fingerprints d'origine dans chaque image). On peut constater que jusqu'à 80% du taux de compression, l'approche basée sur les images RSS permet d'obtenir des résultats comparables à l'approche fingerprinting traditionnelle basée sur les mesures RSS.

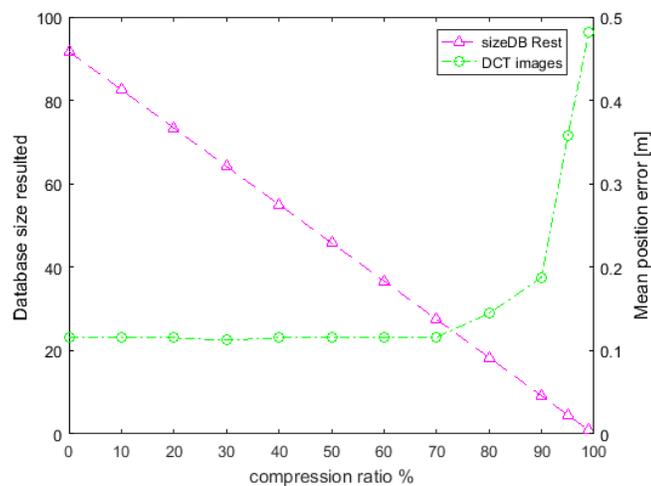
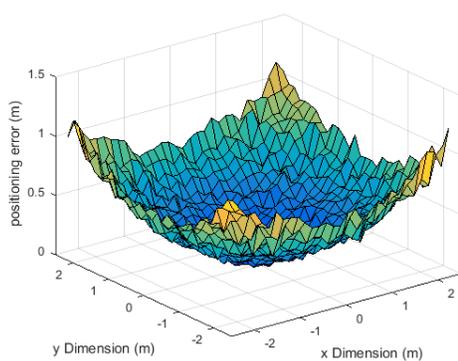


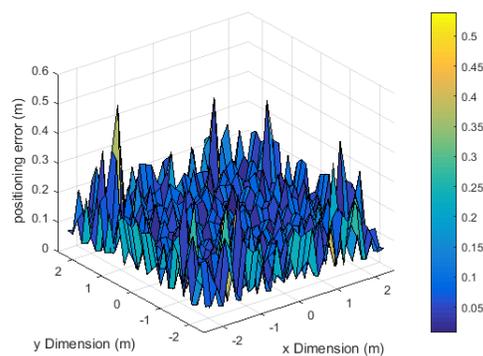
Figure. 4.6- Taille de la base de données et l'erreur de position moyenne en fonction du taux de compression.

La figure 4.6 illustre la taille de la base de données et l'erreur de position moyenne en fonction du taux de compression de la base de données. Une décroissance régulière de la base de données est observée dans l'intervalle [0%; 75%] de la valeur 91.70 dBm jusqu'au 22.92 dBm qui représente un taux de compression 75%.

a)



b)



c)

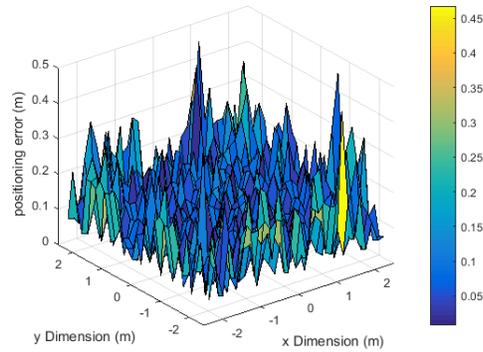
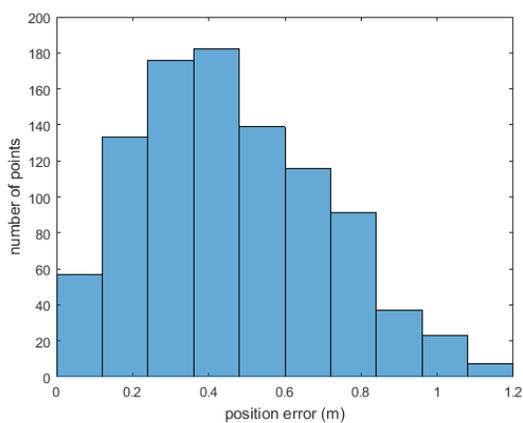


Figure. 4.7- Les erreurs de positionnement

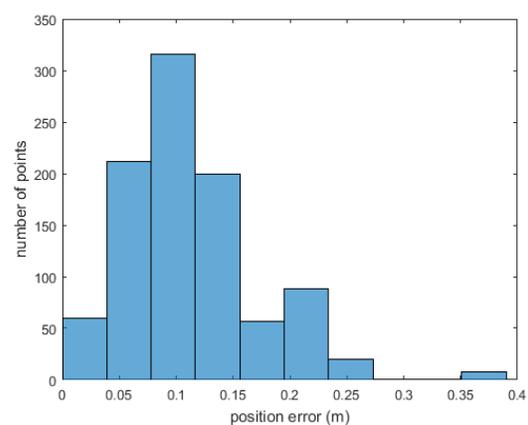
(a) RSS, (b) RSS-FP, (c) images DCT (80%).

La figure 4.7 présente la distribution des erreurs de positionnement des approches basées sur RSS, fingerprinting traditionnelle et la DCT des images pour un taux de compression de 80%. Une différence remarquable dans la valeur de l'erreur de positionnement entre l'approche basée sur RSS et l'approche fingerprinting est observée, ainsi la moyenne des erreurs de positionnement pour (b) et (c) sont similaires jusqu'au taux de compression 80%.

a)



b)



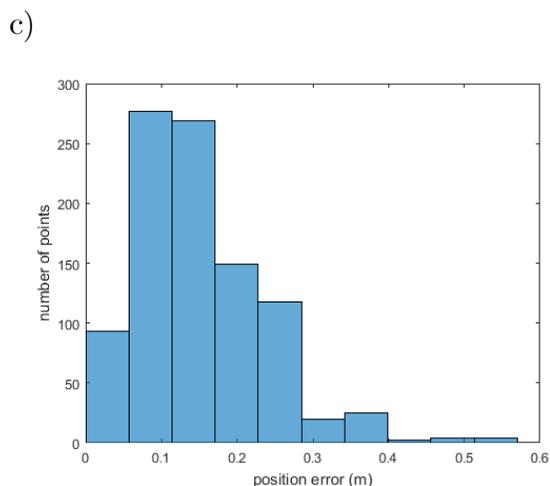


Figure. 4.8- Histogramme des erreurs de positionnement

(a) RSS, (b) RSS-FP, (c) images DCT (80%), 4 LED.

Une autre présentation des résultats à l'aide d'un histogramme est présentée dans la figure. 4.8. Où le nombre de points correspondant à l'erreur de positionnement pour l'approche image DCT est significatif, aussi on peut observer que la plupart des erreurs (540 points de 900 points estimés) sont comprises dans l'intervalle des erreurs [6 cm; 17 cm].

4.4.2 Deuxième cas: 8 LED

8 LED : a) Image originale b) Matrice d'image DCT c) Image compressée

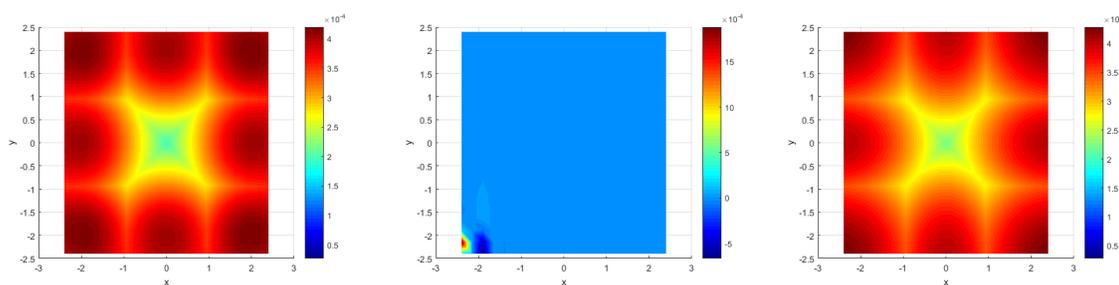


Figure. 4.9- Exemple de compression d'une image RSS cas de 8 LED (interpolée et extrapolée).

La base de données dans ce cas est collectée à partir de 8 LED, le travail effectué est similaire au premier cas, la différence est au niveau de la taille de base de données qui est plus étendue.

Un exemple de compression d'images RSS pour 8 LED est illustré dans la figure. 4.9, où l'image originale est montrée en (a), la DCT de l'image originale (utilisée pour construire (c)) est représentée dans (b), et l'image compressée correspondante est montrée en (c). Le chevauchement entre la distribution des LED empêche la clarté de la différence entre l'image originale et l'image compressée.

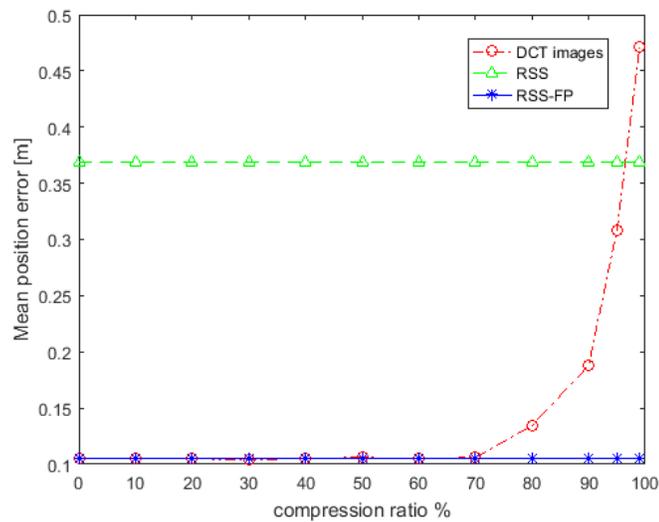


Figure. 4.10- L'erreur de positionnement moyenne en fonction du taux de compression de la base de données.

L'erreur de positionnement moyenne en fonction du taux de compression de la base de données est illustré dans la figure. 4.10. On peut voir qu'un taux de compression similaire pour le premier cas est obtenu, parce que la compression a le même principe dans l'élimination des valeurs bruitées. Notant qu'une amélioration au niveau des erreurs de positionnement est remarquée pour les différentes approches [37 cm pour les approches RSS, 10.5 cm pour fingerprinting].

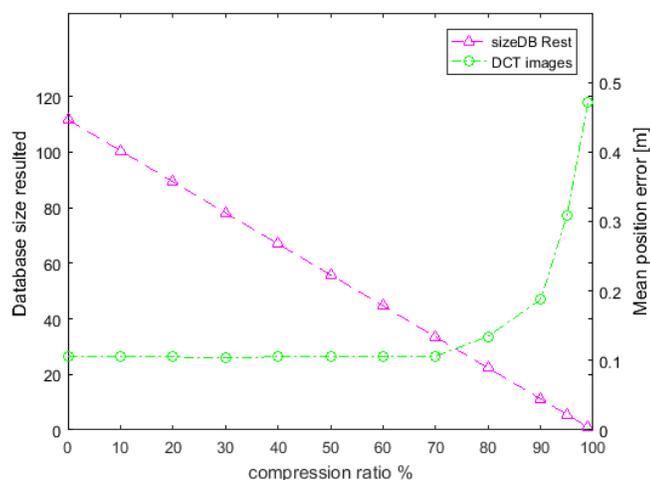
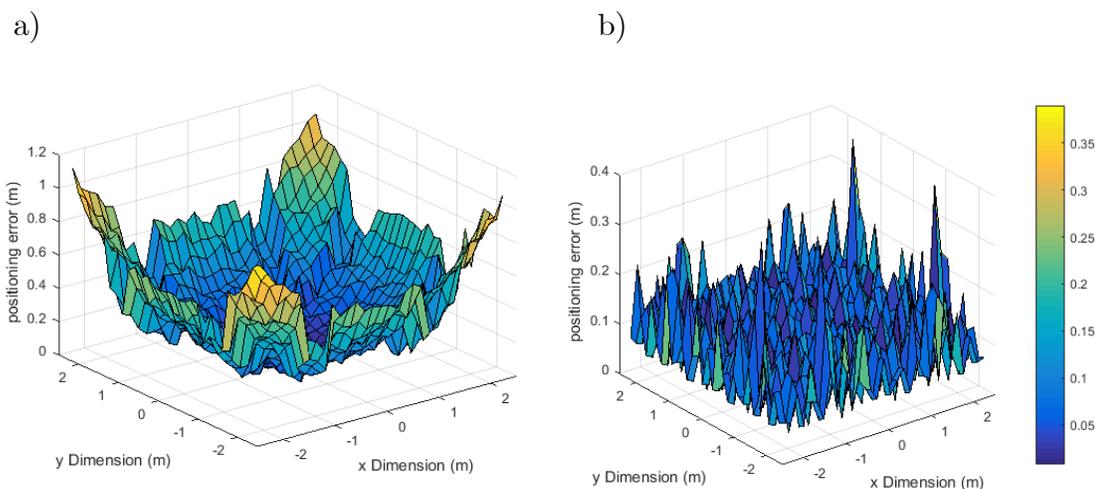


Figure. 4.11- Taille de la base de données et erreur de position moyenne en fonction du taux de compression.

La taille de la base de données et l'erreur de position moyenne en fonction du taux de compression de la base de données sont données dans la figure. 4.11. Une décroissance régulière de la base de données est observée [de 111.63 dBm à 27.90 dBm] avec une stabilité de l'erreur jusqu'au taux de compression 75% où l'erreur croit par la suite. La comparaison entre ces trois facteurs montre qu'il y a une contrainte lors de la procédure de compression qu'à chaque valeur de taux de compression il faut vérifier l'erreur de positionnement.



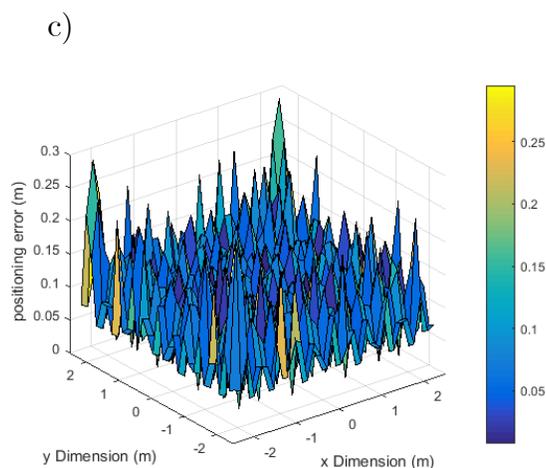
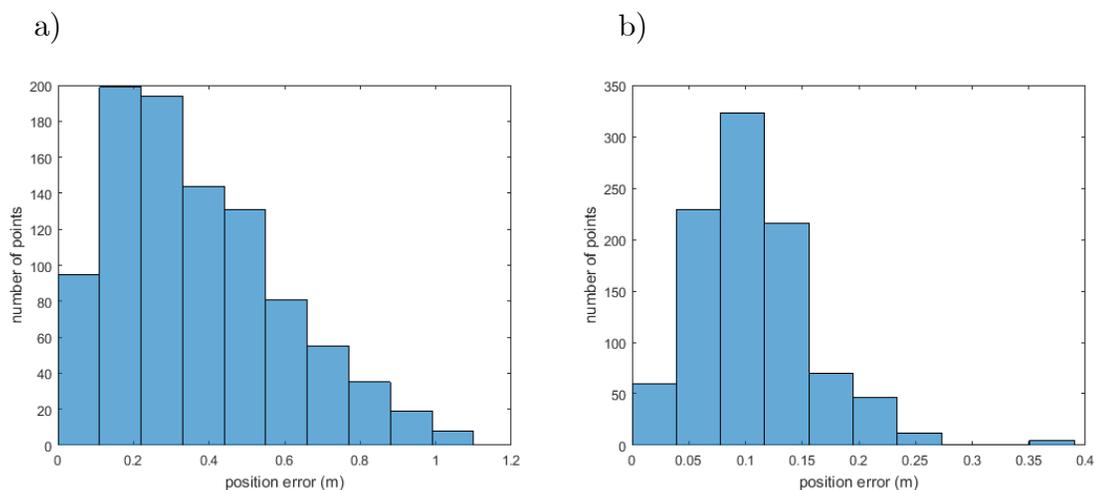


Figure. 4.12- L'erreur de positionnement
(a) RSS, (b) RSS-FP, (c) DCT images (80 %).

La figure 4.12 présente la distribution de l'erreur de positionnement pour les trois approches basées sur RSS, fingerprinting traditionnelle et la DCT des images pour un taux de compression de 80%. Les mêmes observations sont constatées pour les trois cas.



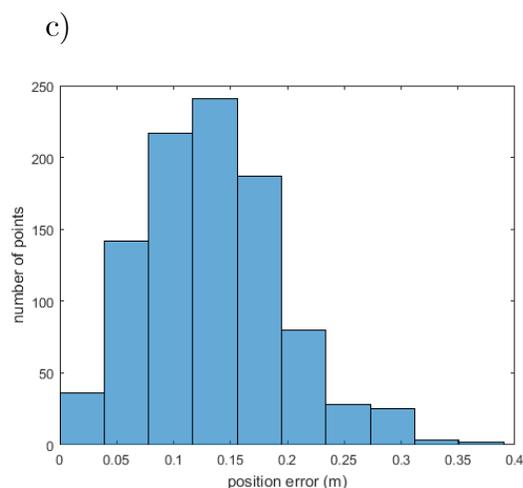


Figure. 4.13- Histogramme des erreurs de positionnement

(a) RSS, (b) RSS-FP, (c) DCT images (80 %), 8 LED

L’histogramme des erreurs de positionnement est présenté dans la figure. 4.13. Où le nombre de points qui correspond à l’erreur de positionnement pour l’approche image DCT est significatif, la majorité des erreurs (780 points de 900 points estimés) sont comprises dans l’intervalle des erreurs [4 cm; 19 cm].

4.5 Conclusion

Une nouvelle approche de l’algorithme de positionnement indoor de fingerprinting basée sur RSS a été proposée en utilisant des images RSS et une analyse spectrale compressée. Dans ce chapitre, on a montré que la taille de la base de données de la phase de formation peut être considérablement réduite en ne stockant que les coefficients les plus significatifs des images transformées par DCT. Les résultats ont montré que la méthode proposée peut atteindre les performances de l’approche de fingerprinting traditionnelle basées sur RSS avec une réduction de la taille de la base de données pouvant atteindre 75% du taux de compression.

Dans ce travail, seules les images 2D représentant les valeurs RSS d’une LED ont été prises en compte. Bien que la méthode peut être étendue aux images N-dimensionnelles

à l'aide de la DCT N-dimensionnelle, où l'ensemble de l'espace 3D à travers un ensemble de ces images 2D est pris en compte.

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce document portait sur l'application de la technologie de communication par la lumière visible sans fil dans le domaine de localisation et de positionnement au sein d'un environnement intérieur tel qu'un bâtiment, bureau... etc. Il existe aujourd'hui une demande croissante concernant l'utilisation alternative aux communications radiofréquences (sources potentielles de perturbations électromagnétiques dans les milieux sensibles). Depuis quelques années, les communications VLC apparaissent comme étant une bonne solution permettant de répondre à ce genre de problèmes.

Dans ce document, nous nous sommes focalisés sur l'utilisation de cette technologie appliquée au suivi des personnes ou des robots (statique ou mobile) au sein d'un environnement intérieur. On considère donc ici que l'utilisateur est équipé d'un module de réception permettant de communiquer par la lumière visible et un émetteur à base des LED situer au plafond ayant des coordonnées bien déterminés. Le but de l'application et de déterminer les coordonnées d'un utilisateur statique ou son trajet dans le cas où il est mobile.

Notre objectif tout au long de cette thèse est d'étudier l'impact de l'efficacité énergétique du système sur les performances globales de la technologie VLC d'une part et d'autre part la proposition d'un système de moins complexité par une réduction de la base de données collecté de l'environnement.

Nous avons débuté dans le premier chapitre par l'étude de différents critères d'évaluation d'un système de localisation indoor pour différentes technologies. Aussi, on a discuté les principes et les algorithmes utilisés dans le domaine de localisation. De plus, on a présenté un état de l'art sur les systèmes IPS abordés dans la littérature.

Dans le second chapitre, nous avons décrit le fonctionnement de la technologie de communication VLC. Cela nous a permis de sortir les différents avantages rendant cette technologie attractive. De plus, il n'y a aucune génération de perturbations électromagnétiques (cas de communication RF) car elle utilise les ondes lumineuses pour propager ou transmettre l'information surtout dans les milieux sensibles comme les hôpitaux et l'industrie... etc.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux différents types de récepteurs associés à cette technologie et on constaté que les plus répandus dans ce domaine sont les photodiodes. Nous nous sommes intéressés aux différentes applications de la technologie VLC. Puis, on a présenté un état de l'art sur la localisation.

L'efficacité énergétique du système proposé est abordée dans le troisième chapitre. Pour réaliser cette étude, nous avons considéré un environnement de référence dans la littérature. Plusieurs paramètres d'évaluations ont été étudiés pour les simulations. Nous avons commencé par étudier la modélisation de la source (LED). Nous avons ensuite vérifié que pour évaluer correctement le gain du canal VLC, il est nécessaire de prendre les deux liens (LOS+NLOS) en considération.

Nous avons ainsi souligné l'importance de l'efficacité de l'illuminance par détermination de la distance optimale entre LED. Cela nous a permis d'obtenir une illuminance suffisante sans l'ajout des LED supplémentaires afin de réaliser un système ayant une efficacité énergétique de la partie d'émission. L'évaluation de la performance du système a été effectué prenant en compte la puissance reçue, le rapport bruit/signal (SNR) et la fonction de distribution cumulative (CDF) du système, la technique de trilatération et le paramètre du signal reçu RSS est appliqué pour déterminer et présenter 61 points estimé et 61 points réelle. Les résultats montrent que l'erreur de positionnement moyenne est environ 3 cm. Notant que l'effet de réflexion pour les résultats de simulation est considéré faible. La seconde contribution consiste à étudié l'autonomie d'énergie du système. Le système proposé comprend également une cellule solaire en tant que dispositif récepteur du signal. Ce dernier utilise la cellule solaire pour récupérer l'énergie de la lumière visible

(auto-alimentation), ce qui permet d'économiser de l'énergie et donc de prolonger la durée de vie du dispositif connecté au récepteur et au réseau.

D'autre contribution originale a été abordé dans la dernière partie de ce manuscrit concerne la simplicité des algorithmes et des systèmes, où un nouveau mécanisme de positionnement indoor de fingerprinting basée sur RSS a été proposée en utilisant des images RSS et une analyse spectrale compressée. La taille de la base de données de la phase de formation peut être considérablement réduite en ne stockant que les coefficients les plus significatifs des images transformées par DCT. Les résultats ont montré que la méthode proposée peut atteindre les performances de l'approche de fingerprinting traditionnelle basées sur RSS avec une réduction de la taille de la base de données pouvant atteindre 75% du taux de compression.

Perspectives :

L'implémentation réelle de notre solution sera utile pour appréhender les résultats réels et les comparer avec les résultats de simulation. Un Banc d'essais réel sera également utile pour toute valorisation ou transfert de technologie vers l'industrialisation. Le système proposé peut être appliqué aux différentes applications telles que le suivi des actifs et des personnes dans les hôpitaux et les centres commerciaux...etc. À l'hôpital, le récepteur optique peut être intégré dans des dispositifs portables pour les patients et peut être installé sur les fauteuils roulants pour suivre les mouvements des patients, sans utiliser aucune alimentation externe du récepteur, ce qui peut être considéré comme un avantage principal de ce système. Le récepteur peut être intégré afin d'obtenir un système de positionnement indoor à faible coût et respectueux à l'environnement.

Dans notre travail de thèse, le récepteur étudié est à l'état statique. Dans la plupart des applications, l'objet localisé est considéré mobile (robot, personnes, etc.), il sera intéressant d'étudier des cas dynamiques, par exemple pour tracer la trajectoire du mouvement en temps réel.

Liste des figures

1.1	Prévisions des revenus de LBS mobiles, (2012-2018)	6
1.2	Prévision du marché LBS indoor à Bahreïn, entre 2014-2025	6
1.3	Limitation de GPS	7
1.4	Différentes applications des systèmes IPS	9
1.5	Classification des techniques et algorithmes de positionnement	14
1.6	La technique de positionnement par proximité	15
1.7	Positionnement utilisant la trilatération	16
1.8	La mesure TDOA utilisée pour le positionnement	19
1.9	Positionnement basé sur RSS	20
1.10	Les techniques ToA/RTOF utilisées dans le positionnement indoor	21
1.11	Technique AOA/DOA	22
1.12	Les deux phases de fingerprinting	24
1.13	Réflexion indoor	30
1.14	Géométrie de diffraction en 2D	31
1.15	Principaux types de signaux dans un environnement intérieur	34
2.1	Le spectre électromagnétique	39
2.2	Le principe de fonctionnement	40
2.3	La sécurité pour la VLC	41
2.4	Illustration des applications utilisant les VLC en milieu intérieur	43
2.5	Utilisation de la VLC pour la connexion sans fil (Li-Fi)	44
2.6	Utilisation de la VLC au musée et smarthome	44
2.7	Utilisation de la VLC dans les applications automobiles	45
2.8	Application sous-marine	45
2.9	Utilisation de la VLC dans l'hôpital et l'avion	46
2.10	Application de la localisation	47
2.11	(a) Schéma de transmission/ réception IM/DD optique sans fil. (b) Modélisation du canal	48

2.12	Calcul du gain statique du canal	50
2.13	Impact des différentes sources de bruits optiques comparé à la réponse en fréquence d'une photodiode	52
2.14	Architecture du système VLC: a) Emetteur,b) Récepteur	57
2.15	Représentation standard d'un composant LED	58
2.16	Génération d'une lumière blanche avec: (a) une LED rouge-vert-bleu, (b) une LED bleue avec phosphore	61
2.17	Evolution de la sensibilité de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde	62
2.18	Mode de propagation a) LOS,b) NLOS	63
2.19	Illustration d'un lien LOS entre un émetteur et un récepteur	64
2.20	Illustration d'un lien à une réflexion entre un émetteur et un récepteur	66
2.21	Comparaison des codes Manchester et NRZ	70
2.22	Illustration du potentiel des cellules solaires	75
3.1	Circuit de l'émetteur	79
3.2	Photo de l'émetteur utilisé	79
3.3	Circuit du récepteur	80
3.4	Photo du récepteur utilisé	80
3.5	Circuit de l'émetteur utilisant l'Arduino	81
3.6	Photo de l'émetteur utilisé	82
3.7	Photo du récepteur utilisé	82
3.8	Transmission d'une séquence préprogrammée viaVLC	83
3.9	Transmission d'une séquence en temps réel via VLC	84
3.10	Modèle de la salle	85
3.11	Présentation du canal optique sans fil LOS et NLOS	87
3.12	Distribution de l'illuminance dans le cas d'un émetteur max=584lx	90
2.13	Distribution de l'illuminance dans le cas de quatre émetteur	90
3.14	Modèle VLC à neuf LED	92
3.15	Schéma fonctionnel du système VLC	92

3.16	Dispositions des LED pour différentes distances	93
3.17	Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 70^\circ, D_{LED} = 1.00m.$	95
3.18	Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 70^\circ, D_{LED} = 2.00m.$	95
3.19	Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 70^\circ, D_{LED} = 2.30m.$	96
3.20	Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 70^\circ, D_{LED} = 2.40m.$	96
3.21	Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 50^\circ, D_{LED} = 1.00m.$	97
3.22	Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 50^\circ, D_{LED} = 1.70m.$	97
3.23	Distribution de l'illuminance pour le cas : $\phi_{1/2} = 50^\circ, D_{LED} = 2.30m.$	98
3.24	Distribution de la puissance optique reçue (FOV=70°)	99
3.25	Distribution de la puissance optique reçue (FOV=30°)	100
3.26	Distribution SNR pour LED _D considérant le canal LOS (exposition directe au soleil)	102
3.27	Distribution SNR pour LED _D considérant le canal LOS (exposition indirecte au soleil)	102
3.28	Distribution SNR pour LED _D considérant le canal NLOS (exposition directe au soleil)	103
3.29	Distribution SNR pour LED _D considérant le canal NLOS (exposition indirecte au soleil)	103
3.30	Zoom sur les résultats obtenus -point (5,5)	108
3.31	Zoom sur les résultats obtenus -point (3,3) (au centre)	108
3.32	61 positions réelles et positions estimées	109
3.33	Distribution d'erreur de positionnement (exposition indirecte au soleil)	110
3.34	Distribution d'erreur de positionnement (exposition directe au soleil)	110
3.35	Histogramme d'erreur de positionnement (exposition indirecte au soleil)	111
3.36	Histogramme d'erreur de positionnement (exposition directe au soleil)	111
3.37	Fonction de distribution cumulative (CDF) de l'erreur de positionnement	112
3.38	Banc d'essais (ISEP)	112

3.39	Différents modules utilisés	113
3.40	Modèle Proposé : cas d'une cellule solaire	116
3.41	Modèle de cellule solaire typique	118
3.42	Présentation du système VLC utilisant un récepteur de cellule solaire	119
3.43	Courbes I-V pour différents ensembles de cellules solaires	120
3.44	Courbes I-V pour différents illuminance de 2x8 (T=298)	121
3.45	Courbes P-R pour différents ensembles de cellules solaires	121
3.46	Courbes P-R pour différentes éclairages du tableau 2x8 (T=298k)	122
3.47	Réponse fréquentielle	122
3.48	Effet de rayonnement solaire sur le système VLC-IPS	123
3.49	Résultats utilisant la méthode de positionnement par trilatération	124
3.50	Résultats obtenus avec la méthode de positionnement par trilatération	124
4.1	Scénario du système étudié	130
4.2	Exemple de compression d'une image RSS cas de 4 LED	136
4.3	Exemple de compression d'une image RSS cas d'une LED (1,1,3)	136
4.4	Les dispositions de LED pour les deux cas: a) 4 LED, b) 8 LED	139
4.5	L'erreur de positionnement moyenne en fonction du taux de compression de la base de données	140
4.6	Taille de la base de données et l'erreur de position moyenne en fonction du taux de compression	141
4.7	Les erreurs de positionnement	142
4.8	Histogramme des erreurs de positionnement	143
4.9	Exemple de compression d'une image RSS cas de 8LED	143
4.10	L'erreur de positionnement moyenne en fonction du taux de compression de la base de données	144
4.11	Taille de la base de données et erreur de position moyenne en fonction du taux de compression	145
4.12	L'erreur de positionnement	146
4.13	Histogramme des erreurs de positionnement	147

Liste des tableaux

Tableau 1.1	comparaison entre les technologies des systèmes de positionnement indoor (IPS)	27
Tableau 2.1	Valeur du photocourant I_b généré en fonction de la source dans le domaine du visible	53
Tableau 2.2	récapitulatif de l'état de l'art des systèmes VLC-IPS	56
Tableau 3.1	Paramètres de simulation	86
Tableau 3.2	Paramètres de simulation	88

Liste d'abréviations

BER : Bit Error Rate

CDF : Cumulative Density Function

CSK : Color Shift Keying

DD : Direct Detection

DSP : Densité Spectrale de Puissance

FOV : Field of View

FSO : Free Space Optics

IES : Interférence Entre Symboles

IM : Intensity Modulation

IoT : Internet des objets

IR : Infrarouge

ISO : International Organization for Standardization

LED : Light Emitting Diode

LD : Laser Diodes

LOS : Line Of Sight

MIMO : Multiple Input, Multiple Output

MISO : Multiple Input, Single Output

NLOS : Non Line Of Sight

OFDM : Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OLED : Organic LED

OOK : On-Off Keying

OWC : Optical Wireless Communication

PD : Photodiode

PLC : Power Line Communication

PPM : Pulse Position Modulation

RF : Radiofréquence

RI : Réponse Impulsionnelle

RMS : Root Mean Square

RVB : Rouge Vert Bleu

SIMO : Single Input, Multiple Output

SISO : Single Input, Single Output

SNR : Signal to Noise Ratio

UV : Ultra-Violet

VLC : Visible Light Communication

VLC-IPS : système de positionnement indoor basé sur la VLC

Bibliographie

- [1] B. Jiang and X. Yao, “Location-based services and GIS in perspective,” *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 712–725, 2006.
- [2] B. Liu, W. Zhou, T. Zhu, L. Gao, T. Luan, and H. Zhou, “Silence is Golden: Enhancing Privacy of Location-Based Services by Content Broadcasting and Active Caching in Wireless Vehicular Networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
- [3] Berg Insight, “Mobile location based services,” *Encycl. Multimed. . . .*, 2014.
- [4] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gcc-indoor-location-based-services-lbs-market>.
- [5] NASA, “Global Positioning System History,” 2015. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html.
- [6] S. Ryschka, M. Murawski, and M. Bick, “Location-Based Services,” *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 58, no. 3, pp. 233–237, 2016.
- [7] R. Mautz, “Overview of current indoor positioning systems,” *Geod. Cartogr.*, vol. 35, no. 1, pp. 18–22, 2009.
- [8] M. Azizyan, R. R. Choudhury, and I. Constandache, “SurroundSense: Mobile Phone Localization via Ambience Fingerprinting,” *MobiCom '09*, pp. 261–272, 2009.

- [9] K. Ozsoy, A. Bozkurt, and I. Tekin, "2D Indoor positioning system using GPS signals," 2010 Int. Conf. Indoor Position. Indoor Navig., no. September, pp. 15–17, 2010.
- [10] P. a. Zandbergen and S. J. Barbeau, "Positional Accuracy of Assisted GPS Data from High-Sensitivity GPS-enabled Mobile Phones," *J. Navig.*, vol. 64, no. 3, pp. 381–399, 2011.
- [11] J. Liu, " Survey of Wireless Based Indoor Localization Technologies," May 2014.
- [12] J. C. Zufferey, A. Klaptocz, A. Beyeler, J. D. Nicoud, and D. Floreano, "A 10-gram Microflyer for Vision-based Indoor Navigation, presented at the Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference , pp. 3267-3272, 2006.
- [13] M. K. Mohamed, S. Patra, and A.Lanzon, "Designing simple indoor navigation system for UAVs, presented at the Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference , pp. 1223-1228, 2011.
- [14] S. P. Tarzia, P. A. Dinda, R. P. Dick, and G. Memik, "Indoor localization without infrastructure using the acoustic background spectrum, presented at the MobiSys '11: Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, applications, and services, New York, New York, USA, p. 155, 2011.
- [15] P. Tarrio, M. Cesana, M. Tagliasacchi, A. Redondi, L. Borsani, and J. R. Casar, "An energy-efficient strategy for combined RSS-PDR indoor localization, presented at the Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2011 IEEE International Conference, pp. 619-624, 2011.
- [16] J. A. B. Link, P. Smith, N. Viol, and K. Wehrle, "FootPath: Accurate map-based indoor navigation using smartphones, presented at the Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference, pp. 1-8, 2011.
- [17] H. Liu and J. Liu, " Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems ", *IEEE transactions on systems*, vol. 37, pp. 1067-1080, Novembre 2007.

- [18] K. Al Nuaimi and H. Kamel, “A Survey of Indoor Positioning Systems and Algorithms”, International conference on innovation in information technology, pp. 185-190, Mai 2011.
- [19] J. P. G.-V. e. a. Ramon F. Brena, "Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey," Hindawi, Journal of Sensors, 2017.
- [20] H. D. e. a. Hui Liu, " Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part c: applications and reviews, vol. 36, no. 7, pp. pp. 1067-1080, 2007.
- [21] R. Mautz, "Indoor Positioning Technologies," ETH Zurich, 2012.
- [22] M. J. Meyer and et al., “ Wireless enhanced 9-1-1 service making it a reality,” Bell Labs Technical Journal, 1996.
- [23] K. Kaemarungsi, “Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting Technique, PhD thesis, University of Pittsburgh, 2005.
- [24] Mousa, Farag, “Secure visible light communication systems based on the position of the user. Doctoral thesis, Northumbria University. 2017
- [25] T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, “Bi-directional Visible-Light Communication using Corner Cube Modulator,” The 3rd IASTED International Conference on Wireless and Optical Communication, pp. 598–603, 2003.
- [26] M. Ficco, F. Palmieri and A. Castiglione, “ Hybrid Indoor and Outdoor Location Services for New-Generation Mobile Terminals, ”, Article in personal and Ubiquitous Computing, pp. 1-16, Février 2014.
- [27] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, “A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks,” IEEE communications surveys & tutorials, vol. 11, pp. 13-32, 2009.

-
- [28] Hassan, N. U. L., Naeem, A., Adeel Pasha, M., Jadoon, T., & Yuen, C. H, “Indoor Positioning Using Visible LED Lights: A Survey. *ACM Computing Surveys*, 48(2), 20, 2015.
- [29] J. Hightower and G. Borriello, “Location Sensing Techniques,” *Computer Science and Engineering* , pp. 1-8, Juillet 2001.
- [30] K. Pahlavan and X. Li and J-P. Mäkelä, “Indoor Geolocation Science and Technology,” *IEEE Communications Magazine* , pp. 112-118, Février 2002.
- [31] M. Kanaan and K. Pahlavan, “A comparison of wireless geolocation algorithms in the indoor environment,” in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf*, vol. 1, pp.177–182, 2004.
- [32] B.T. Fang , “simple solutions for hyperbolic and related position fixed, *IEEE transaction on aerospace and electronic system*, vol. 26, No. 5,pp. 748-753, Septembre 1990.
- [33] C. Drane, M. Macnaughtan, and C. Scott, “Positioning GSM telephones,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36,no.4, pp.46–54,59, 1998.
- [34] D.J.Torrieri, “statistical theory of passive location systems,” , p 1-48, Mai 1983.
- [35] X. Li, K. Pahlavan, M. Latva-aho and M. Ylianttila, “ Comparison of Indoor Geolocation Methods in DSSS and OFDM Wireless LAN Systems,” *IEEE*, pp. 3015-3020, 2000
- [36] J. Zhou, K.M.-K. Chu, and J.K.-Y. Ng, “Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model,” in *Proc. 19th Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl*,pp.559–564, Mar 2005.
- [37] A. Teuber, B. Eissfeller and T. Pany,“ A Two-Stage Fuzzy Logic Approach for Wireless LAN Indoor Positioning, ”, in *Proc. IEEE /ION Position Location Navigat*,vol.4,pp.730–738, 2006.

-
- [38] M. Kossel, H. R. Benedickter, R. Peter and W. Bachtold, "Microwave backscatter modulation systems," *IEEE MTT-S Dig.*, vol.3, pp.1427–1430, Juin 2000.
- [39] A. Gunther and C. Hoene, "Measuring round trip times to determine the distance between WLAN nodes," in *Proc. Netw. 2005.*, Waterloo, ON, Canada, pp. 768–779, Mai 2005.
- [40] D. Barry, V. Veen and K.M. Buckley, "Beamforming : a versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP magazine*, pp. 4-24, Avril 1988.
- [41] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, "Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting", *Proc. 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous '04)*, Boston, USA, ,pp.14-23, Aout 2004.
- [42] P. Kontkanen, P. Myllymäki, T. Roos, H. Tirri, K. Valtonen, and H. Wetzig, "Topics in probabilistic location estimation in wireless networks," in *Proc. 15th IEEE Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun.*, Barcelona, Spain, , vol. 2, pp. 1052–1056. Sep 2004.
- [43] Y. Gwon, R. Jain, and T. Kawahara, "Robust indoor location estimation of stationary and mobile users," in *Proc. IEEE INFOCOM*, ,vol. 2, pp. 1032–1043, Mar 2004.
- [44] D. Pandya, "A Hierarchical Location Tracking System Project Report" Master's degree thesis, Department of Computing, Imperial College, London, UK , Juin 2002.
- [45] C. L. Wu, L. C. Fu, and F. L. Lian, "WLAN location determination in e-home via support vector classification," in *Proc. IEEE Int. Conf. Netw., Sens. Control*, ,vol.2 pp.1026–1031. Mars 2004
- [46] M. Brunato and R. Battiti, "Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless LANs," *Comput. Netw.*, vol.47, pp.825–845, 2005.

- [47] GALLAGHER, T., LI, B., DEMPSTER, A., and RIZOS, C, "A sector-based campus-wide indoor positioning system". In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. pp. 1–8, 2010.
- [48] W SCHULCZ, R., VARGA, G., and TOTH, L, "Indoor location services and context-sensitive applications in wireless networks". In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. pp. 1–10. 2010.
- [49] XIANG, Z., SONG, S., CHEN, J., WANG, H., HUANG, J., and GAO, X, "A wireless LAN-based indoor positioning technology". *IBM Journal of Research and Development*, 617–626. 2004.
- [50] KWON, J., DUNDAR, B., AND VARAIYA, P, "Hybrid algorithm for indoor positioning using wireless LAN". In *Proceedings of Vehicular Technology Conference*. Vol. 7. pp. 4625–4629. 2004.
- [51] V. Otsason, A. Varshavsky, A. LaMarca, and E. de Lara, "Accurate GSM Indoor Localization, *UbiComp 2005*, vol. 3660, no. 9, pp. 141-158, 2005.
- [52] K. OZSOY, A. B. AND TEKIN, I, "Indoor positioning based on Global Positioning System signals". *Microwave and Optical Technology Letters* 55, 5 (May), 1091–1097. 2013.
- [53] M. PETROVELLO, G.-I. J, "GNSS Solutions: Repeaters, Pseudolites, and Indoor positioning. *Inside GNSS*, 18–21. 2009.
- [54] DI FLORA, C., FICCO, M., RUSSO, S., AND VECCHIO, V, "Indoor and outdoor location based services for portable wireless devices. In *Proceedings of Distributed Computing Systems Workshops, 25th IEEE International Conference*. pp. 244–250. 2005.
- [55] BANIUKEVIC, A., SABONIS, D., JENSEN, C. S., AND LU, H, "Improving Wi-Fi based indoor positioning using Bluetooth Add-Ons. In *Proceedings of Mobile Data Management, IEEE*. Vol. 1. IEEE, pp. 246–255. 2011.

- [56] VANDIKAS, K., K ATRANIDOU, A., K RIARA, L., BALTZAKIS, H., PAPAKONSTANTINO, T., AND PA-PADOPOULI, M, “Empirical-based analysis of a cooperative location-sensing system. In Proceedings of the 1st International Conference on Autonomic Computing and Communication Systems. pp. 1–11. 2007.
- [57] WANG, Y., YANG, X., Z HAO, Y., L IU, Y., AND CUTHBERT, L, “Bluetooth positioning using RSSI and tri-angulation methods. In Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), IEEE. pp. 837–842. 2013.
- [58] ANASTASI, G., BANDELLONI, R., C ONTI, M., D ELMASTRO, F., G REGORI, E., AND MAINETTO, G, “Experimenting an indoor Bluetooth-based positioning service. In Proceedings of Distributed Computing Systems Workshops. pp. 480–483. 2003.
- [59] HU, X., C HENG, L., AND ZHANG, G, “A ZigBee-based localization algorithm for indoor environments. In Proceedings of Computer Science and Network Technology (ICCSNT). Vol. 3. pp. 1776–1781. 2011.
- [60] FERNANDEZ, S., G UALDA, D., G ARCIA, J., G ARCIA, J., U RENA, J., AND GUTIERREZ, R, “Indoor location system based on ZigBee devices and metric description graphs. In Proceedings of Intelligent Signal Processing (WISP). pp. 1–5. 2011.
- [61] CHUNG, J., D ONAHOE, M., S CHMANDT, C., K IM, I.-J., R AZAVAI, P., AND WISEMAN, M, “Indoor Location Sensing using Geo-Magnetism. In Proceedings of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. pp. 141–154. 2011.
- [62] GHOLAMI, M., S TROM, E., S OTTILE, F., D ARDARI, D., C ONTI, A., G EZICI, S., R YDSTROM, M., AND SPIR-ITO, M, “Static positioning using UWB range measurements. In Proceedings of Future Network and Mobile Summit. pp. 1–10. 2010.

-
- [63] INGRAM, S., H ARMER, D., AND QUINLAN, M, “Ultra Wide Band indoor positioning systems and their use in emergencies. In Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. pp. 706–715. 2004.
- [64] WALDMANN, B., W EIGEL, R., E BELT, R., AND VOSSIEK, M, “An Ultra Wide Band local positioning system for highly complex indoor environments. In Proceedings of Localization and GNSS (ICL-GNSS). pp. 1–5. 2012.
- [65] HOLM, S, “Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength. In Proceedings of Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). pp. 1–6. 2012.
- [66] MANDAL, A., L OPES, C., G IVARGIS, T., H AGHIGHAT, A., J URDAK, R., AND BALDI, P, “Beep: 3D indoor positioning using audible sound. In Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference, IEEE. pp. 348–353. 2005.
- [67] PENG, C., S HEN, G., Z HANG, Y., L I, Y., AND TAN, K, “Beep: A High Accuracy Acoustic Ranging System using COTS Mobile Devices. In Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. SenSys '07. ACM, New York, NY, USA, pp. 1–14. 2007.
- [68] PRIYANTHA, N. B., C HAKRABORTY, A., AND BALAKRISHNAN, H, “The Cricket Location-support System. In Proceedings of the ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. MobiCom '00. ACM, New York, NY, USA, pp. 32–43. 2000.
- [69] WERB, J. AND LANZL, C, “Designing a positioning system for finding things and people indoors. Spectrum, IEEE 35, 9 (Sep), pp. 71–78. 1998.
- [70] SAAD, S. AND NAKAD, Z, “A standalone RFID indoor positioning system using passive tags. Industrial Electronics, IEEE 58, 5 (May), pp. 1961–1970. 2011.

- [71] SCHOENEGGER, C., WERNLE, M. E., AND STADLMANN, B, “Analysis of an UHF RFID system for interior position sensing. In Proceedings of RFID Systems and Technologies (RFID SysTech). pp. 1–5. 2008.
- [72] VEGNI, A. AND BIAGI, M, “An indoor localization algorithm in a small-cell LED-based lighting system. In Proceedings of Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). pp. 1–7. 2012.
- [73] HIJIKATA, S., TERABAYASHI, K., AND UMEDA, K, “A simple indoor self-localization system using infrared LEDs. In Proceedings of Networked Sensing Systems (INSS). pp. 1–7. 2009.
- [74] NANDAKUMAR, R., CHINTALAPUDI, K. K., AND PADMANABHAN, V. N, “Centaur: Locating Devices in an Office Environment. In Proceedings of the ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Mobicom ’12. ACM, New York, NY, USA, pp. 281–292. 2012.
- [75] YANG, S.-H., JUNG, E.-M., AND HAN, S.-K, “Indoor location estimation based on LED visible light communication using multiple optical receivers. Communications Letters, IEEE 17, 9 (Sept.), pp. 1834–1837. 2013.
- [76] H. R. Anderson, “Fixed Broadband Wireless System Design, John Wiley, Urbana, Chicago, and London, 1 edition, Feb. 2003.
- [77] R.J. Luebbers, “Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss,” IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. AP-32, no. 1, pp. 70-76, Jan. 1984.
- [78] M. A. Youssef, A. Agrawala, and A. U. Shankar, “WLAN location determination via clustering and probability distributions,” in Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom’03), vol. 2, pp. 23-26, Mar. 2003.

-
- [79] J. D. Parsons, "Mobile Radio Propagation Channel, John Wiley, Chichester, U.K., edition 2, Feb. 2000.
- [80] K. Alexopoulos, S. Makris, V. Xanthakis, K. Sipsas, A. Liapis, and G. Chrysolouris, "Towards a role-centric and context-aware information distribution system for manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 25, no. C, pp. 377–384, 2014.
- [81] M. A. Dhuieb, F. Laroche, and A. Bernard, "Context-awareness: A Key Enabler for Ubiquitous Access to Manufacturing Knowledge," *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 484–489, 2016.
- [82] P. Lin, Q. Li, Q. Fan, and X. Gao, "Real-time monitoring system for workers' behaviour analysis on a large-dam construction site," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2013, 2013.
- [83] P. Lin, Q. Li, Q. Fan, X. Gao, and S. Hu, "A real-time location-based services system using WiFi fingerprinting algorithm for safety risk assessment of workers in tunnels," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014.
- [84] U. R. Cing, "Outsourcing 0," no. February, 1998.
- [85] P. Stephan and I. Heck, "Using spatial context information for the optimization of manufacturing processes in an exemplary maintenance scenario," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 10, no. PART 1, pp. 228–233, 2010.
- [86] Weizhi, Zhang, "Indoor Optical Positioning System". Doctoral thesis, The Pennsylvania State university . 2014.
- [87] Cisco, " Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013- 2018," Whitepaper, February 2014.
- [88] C. X. Wang et al., "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, February 2014.

-
- [89] D. K. Borah, A. C. Boucouvalas, C. C. Davis, S. Hranilovic, and K. Yiannopoulos, "A review of communication-oriented optical wireless systems," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 1, p. 91, Mar. 2012.
- [90] S. Schmid, G. Corbellini, S. Mangold, T. R. Gross, "LED-to-LED Visible Light Communication Networks", 2012 IEEE Globecom Workshops, Anaheim, CA, pp. 1264-1268, 2012.
- [91] A. C. Boucouvalas, P. Chatzimisios, Z. Ghassemlooy, M. Uysal and K. Yiannopoulos, "Standards for indoor Optical Wireless Communications," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 24-31, March 2015.
- [92] M.V. Bhalerao, S. S. Sonavane, and V. Kumar, "A Survey of Wireless Communication Using Visible Light," *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 5, no.2, pp. 188-197 ,2013.
- [93] A. Belle et al., "Development of IEEE802.15.7 based ITS services using low cost embedded systems", in *Proc.13thInternational Conference -ITS Telecommunications (ITST)*, vol. 5-7, pp. 419-425, 2013.
- [94] S.S.Torkestani," Contribution à l'étude d'un réseau de communications optiques sans fils indoor -application à la télésurveillance en milieu hospitalier", thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2012.
- [95] Clement Le Bas. *Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil. Optique / photonique*. Université de Limoges, 2017.
- [96] Zunnian Liu et al., "Design and achievement of the visible light Audio communication system," 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, pp. 1770-1773, 2016.
- [97] Lih Chieh Png and Kiat Seng Yeo "Foundations of Visible Light Communication Circuits" February 28, 2016.

-
- [98] B. Hussain, X. Li, F. Che, C. Patrick Yue and L. Wu, "Visible Light Communication System Design and Link Budget Analysis," in *Journal of Light wave Technology*, vol. 33, no. 24, pp. 5201-5209, 2015.
- [99] J. Duan, A. Shi and Y. Liu, "A practical indoor visible light communication system," 2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP), Manchester, pp. 1170-1175, 2014.
- [100] B. Fahs, A. J. Chowdhury and M. M. Hella, "A 12-m 2.5-Gb/s Lighting Compatible Integrated Receiver for OOK Visible Light Communication Links," in *Journal of Light wave Technology*, vol. 34, no. 16, pp. 3768-3775, 2016.
- [101] Yuan Zhuang, Luchi Hua, Longning Qi, Jun Yang, Pan Cao, Yue Cao, Yongpeng Wu, John Thompson and Harald Haas, " A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights", *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 20, no. 3, 2018.
- [102] Dang Quang Hien and Myungsik Yoo, "Handover in outdoor Visible Light Communication system," 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, pp. 67-69, 2017.
- [103] Alin Cailean. Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (VLC/LiFi). Application au domaine automobile.. Optique / photonique. Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, 2014.
- [104] C. M. Ho et al., "A 10m/10Gbit/s underwater wireless laser transmission system," 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Los Angeles, CA, pp. 1-3, 2017.
- [105] Wenbo Ding, Fang Yang, Hui Yang, Jintao Wang, Xiaofei Wang, Xun Zhang, Jian Song, "A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications", *Computers in Industry*, Volume 68, pp. 170-178, 2015.
- [106] W. A. Cahyadi, T. I. Jeong, Y. H. Kim, Y. H. Chung and T. Adiono, "Patient monitoring using Visible Light uplink data transmission," 2015 International Symposium

- on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Nusa Dua, pp. 431-434, 2015.
- [107] H. Lv, L. Feng, A. Yang, P. Guo, H. Huang and S. Chen, "High Accuracy VLC Indoor Positioning System With Differential Detection," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1-13, June 2017.
- [108] S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Three-Dimensional Visible Light Indoor Localization Using AOA and RSS With Multiple Optical Receivers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 14, pp. 2480–2485, Jul 2014.
- [109] <http://www.lighting.philips.com/main/systems/themes/led-based-indoor-positioning>.
- [110] J. R. Barry. *Wireless Infrared Communications*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [111] Z. Ghassemlooy. *Indoor optical wireless communications systems – part i : Review*. School of Engineering, Northumbria University, Newcastle upon Tyne, UK, 2003.
- [112] J. B. Carruthers and P. Kannan. Iterative site-based modeling for wireless infrared channels. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50(5), pp. 759–765, May 2002.
- [113] Joseph M. Kahn and John R. Barry. *Wireless infrared communications*. *Proceedings of the IEEE*, 85(2), pp. 265–298, 1997.
- [114] F. R. Gfeller, U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474–1486, 1979.
- [115] *Ethernet Over Light*, Philip Mark, McGill University, 2011.
- [116] H. Elgala, R. Mesleh, and H. has, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, no. 9, pp. 56-62, 2011.

- [117] A.J. Moreira, Rui T. Valadas and A.M. de Oliveira Duarte, “Optical interference produced by artificial light”, *Wireless Networks* 3, 131–140, 1997.
- [118] Cui K, Chen G, Xu Z & Roberts RD (2010) Line-of-sight visible light communication system design and demonstration. In: *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 7th International Symposium on, pp. 621–625, 2010.
- [119] Z. Ghassemloy, W. Popoola, S. Rajbhandari, *Optical wireless communications, system and channel modeling with MATLAB®*, ISBN 978-1-4398-5188-3, CRC Press, 2012.
- [120] Jean Armstrong, Y Ahmet Sekercioglu, and Adrian Neild. Visible light positioning: a roadmap for international standardization. *IEEE Communications Magazine*, 51(12), pp. 68–73, 2013.
- [121] P. Lou, H. Zhang, X. Zhang, M. Yao, and Z. Xu, “Fundamental analysis for indoor visible light positioning system,” in *Proc. 1st IEEE Int. Conf. Commun. China Workshops (ICCC)*, Beijing, China, pp. 59–63, 2012.
- [122] Wenjun Gu, Mohammadreza A Kashani, and Mohsen Kavehrad. Multipath reflections analysis on indoor visible light positioning system. preprint arXiv: pp. 1504.01192, 2015.
- [123] Hyun-Seung Kim, Deok-Rae Kim, Se-Hoon Yang, Yong-Hwan Son, and Sang-Kook Han. An indoor visible light communication positioning system using a rf carrier allocation technique. *Journal of Lightwave Technology*, 31(1), pp. 134–144, 2013.
- [124] S-H Yang, E-M Jeong, D-R Kim, H-S Kim, Y-H Son, and S-K Han. Indoor three-dimensional location estimation based on led visible light communication. *Electronics Letters*, 49(1):54–56, 2013.

- [125] E-M Jeong, S-H Yang, H-S Kim, and S-K Han. Tilted receiver angle error compensated indoor positioning system based on visible light communication. *Electronics Letters*, 49(14), pp. 890–892, 2013.
- [126] Se-Hoon Yang and Sang-Kook Han. VLC based indoor positioning using single-Tx and rotatable single-Rx. In *2014 12th International Conference on Optical Internet 2014 (COIN)*, 2014.
- [127] Sari Yamaguchi, Vuong V Mai, Truong C Thang, and Anh T Pham. Design and performance evaluation of vlc indoor positioning system using optical orthogonal codes. In *2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, pp. 54–59. 2014.
- [128] Pan Hu, Liqun Li, Chunyi Peng, Guobin Shen, and Feng Zhao. Pharos: Enable physical analytics through visible light based indoor localization. In *Proceedings of the Twelfth ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, p. 5. ACM, 2013.
- [129] Liqun Li, Pan Hu, Chunyi Peng, Guobin Shen, and Feng Zhao. Epsilon: A visible light based positioning system. In *11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 14)*, pp. 331–343, 2014.
- [130] Keon Young Yi, Dae Young Kim, and Kwang Moo Yi. Development of a localization system based on vlc technique for an indoor environment. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 10, pp. 436–442, 2015.
- [131] Xueli Zhang, Jingyuan Duan, Yuegang Fu, and Ancun Shi. Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on received signal strength indicator. *Journal of Light wave Technology*, 32(21), pp. 3578–3584, 2014.
- [132] Wu Liu, Chao Yang, Yiqin Chen, Qi Yang, and Dawei Zhang. An indoor positioning system based on cross-correlation in visible light communication. In *Asia Communications and Photonics Conference*, pages AW3G–4. Optical Society of America, 2014.

- [133] Soo-Yong Jung, Chang-Kuk Choi, Sang Hu Heo, Seong Ro Lee, and Chang-Soo Park. Received signal strength ratio based optical wireless indoor localization using light emitting diodes for illumination. In 2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2013.
- [134] Soo-Yong Jung, Seong Ro Lee, and Chang-Soo Park. Indoor location awareness based on received signal strength ratio and time division multiplexing using light-emitting diode light. *Optical Engineering*, 53(1):016106–016106, 2014.
- [135] Mohammadreza Aminikashani, Wenjun Gu, and Mohsen Kavehrad. Indoor positioning in high speed ofdm visible light communications. arXiv preprint arXiv:1505.01811, 2015.
- [136] Steven De Lausnay, Lieven De Strycker, Jean-Pierre Goemaere, Nobby Stevens, and Bart Nauwelaers. Optical cdma codes for an indoor localization system using vlc. In 2014 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications (IWOW), pages 50–54. IEEE, 2014.
- [137] W. Zhang, M. I. S. Chowdhury, and M. Kavehrad, “Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications,” *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 4, 2014, Art. no. 045105.
- [138] S.-H. Yang, D.-R. Kim, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, “Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 55, no. 6, pp. 1385–1389, 2013.
- [139] B. Xie et al., “LIPS: A light intensity–based positioning system for indoor environments,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 12, no. 4, pp. 1–27, 2016.
- [140] Z. Li, A. Yang, H. Lv, L. Feng, and W. Song, “Fusion of visible light indoor positioning and inertial navigation based on particle filter,” *IEEE Photon. J.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–13, Oct. 2017.

- [141] Thomas Q Wang, Y Ahmet Sekercioglu, Adrian Neild, and Jean Armstrong. Position accuracy of time-of-arrival based ranging using visible light with application in indoor localization systems. *Journal of Light wave Technology*, 31(20), pp. 3302–3308, 2013.
- [142] Yoon Hyun Kim, In Hwan Park, and Jin Young Kim. Novel location awareness technique for indoor lbs based on visible light communication. *Advanced Science and Technology Letters*, 3, pp. 75–80, 2012.
- [143] Young Hoon Choi, In Hwan Park, Yoon Hyun Kim, and Jin Young Kim. Novel lbs technique based on visible light communications. In *2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 576–577, 2012.
- [144] Trong-Hop Do, Junho Hwang, and Myungsik Yoo. Tdoa based indoor visible light positioning systems. In *2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 456–458, 2013.
- [145] Richard Roberts, Praveen Gopalakrishnan, and Somya Rathi. Visible light positioning: automotive use case. In *2010 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pp. 309–314. 2010.
- [146] Soo-Yong Jung, Swook Hann, and Chang-Soo Park. Tdoa-based optical wireless indoor localization using led ceiling lamps. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57(4), pp. 1592–1597, 2011.
- [147] JHY Nah, Rajendran Parthiban, and Mohamed Hisham Jaward. Visible light communications localization using tdoa-based coherent heterodyne detection. In *2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP)*, pp. 247–249. 2013.
- [148] Bo Bai, Gang Chen, Zhengyuan Xu, and Yangyu Fan. Visible light positioning based on led traffic light and photodiode. In *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1–5, 2011.

- [149] U. Nadeem, N. U. Hassan, M. A. Pasha, and C. Yuen, "Highly accurate 3D wireless indoor positioning system using white LED lights," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 11, pp. 828–830, 2014.
- [150] A. Taparugssanagorn, S. Siwamogsatham, and C. Pomalaza-Raez, "A hexagonal coverage LED-ID indoor positioning based on TDOA with extended Kalman filter," in *Proc. IEEE 37th Annu. Comput. Softw. Appl. Conf. (COMPSAC)*, Kyoto, Japan, pp. 742–747, 2013.
- [151] G. Campo Jimenez, J. Martin Perandones, and F.J. Lopez Hernandez. A VLC-based beacon location system for mobile applications. 2013.
- [152] Madoka Nakajima and Shinichiro Haruyama. Indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication and compensated geomagnetic sensing. In *2012 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp. 524–529, 2012.
- [153] Chinnapat Sertthin, Takeo Fujii, Osamu Takyu, Yohtaro Umeda, and Tomoaki Ohtsuki. On physical layer simulation model for 6-axis sensor assisted vlc based positioning system. In *2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, pp. 1–5, 2011.
- [154] Chinnapat Sertthin, Tomoaki Ohtsuki, and Masao Nakagawa. 6-axis sensor assisted low complexity high accuracy-visible light communication based indoor positioning system. *IEICE transactions on communications*, 93(11), pp. 2879–2891, 2010.
- [155] Chinnapat Sertthin, Emiko Tsuji, Masao Nakagawa, Shigeru Ku wano, and Kazuji Watanabe. A switching estimated receiver position scheme for visible light based indoor positioning system. In *4th International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 2009. ISWPC 2009*, pp. 1–5, 2009.
- [156] Michael T Taylor and Steve Hranilovic. Angular diversity approach to indoor positioning using visible light. In *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1093–1098, 2013.

- [157] Masaki Yoshino, Shinichiro Haruyama, and Masao Nakagawa. High-accuracy positioning system using visible led lights and image sensor. In 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 439-442, 2008.
- [158] Yohei Nakazawa, Hideo Makino, Kentaro Nishimori, Daisuke Wak atsuki, and Hideki Komagata. Indoor positioning using a high-speed, fish-eye lens-equipped camera in visible light communication. In 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-8, 2013.
- [159] Toshiya Tanaka and Shinichiro Haruyama. New position detection method using image sensor and visible light leds. In 2009 2nd International Conference on Machine Vision, ICMV 2009, 2009.
- [160] Ye-Sheng Kuo, Pat Pannuto, Ko-Jen Hsiao, and Prabal Dutta. Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light. In Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking, pp. 447-458. ACM, 2014.
- [161] Zhice Yang, Zeyu Wang, Jiansong Zhang, Chenyu Huang, and Qian Zhang. Wearables can afford: Light-weight indoor positioning with visible light. In Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, pp 317-330. ACM, 2015.
- [162] Mohammad Shaifur Rahman, Md Mejbaul Haque, and Ki-Doo Kim. High precision indoor positioning using lighting led and image sensor. In 201114th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), pp. 309-314, 2011.
- [163] Byung Yeon Kim, Jung-Sik Cho, Youngil Park, and Ki-Doo Kim. Implementation of indoor positioning using led and dual pc cameras. In 2012 Fourth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), pp. 476-477, 2012.
- [164] Mauro Biagi, Stefano Pergoloni, and Anna Maria Vegni. Last: A framework to localize, access, schedule, and transmit in indoor vlc systems. *Journal of Lightwave Technology*, 33(9):1872-1887, 2015.

-
- [165] Ngoc-Tan Nguyen, Nam-Hoang Nguyen, Van-Hung Nguyen, Keattisak Sripimanwat, and Anan Suebsomran. Improvement of the vlc localization method using the extended kalman filter. In TENCON 2014-2014 IEEE Region 10 Conference, pp. 1–6, 2014.
- [166] Divya Ganti, Weizhi Zhang, and Mohsen Kavehrad. Vlc-based indoor positioning system with tracking capability using kalman and particle filters. In 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 476–477, 2014.
- [167] Hirokazu Nishikata, Hideo Makino, Kentaro Nishimori, Takayuki Kaneda, Xiaohan Liu, Makoto Kobayashi, and Daisuke Wakatsuki. Basis research of indoor positioning method using visible light communication and dead reckoning. In Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Guimaraes, Portugal, pp. 21–23, 2011.
- [168] Dongfang Zheng, Kaiyun Cui, Bo Bai, Gang Chen, and Jay A Farrell. Indoor localization based on leds. In 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), pp. 573–578, 2011.
- [169] Dongfang Zheng, Rathavut Vanitsthian, Gang Chen, and Jay A Farrell. Led-based initialization and navigation. In 2013 American Control Conference, pp. 6199–6205, 2013.
- [170] Dongfang Zheng. Joint visible light communication and navigation via leds, doctoral dissertation, university of california, riverside. 2014, retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/2s11034b>.
- [171] Dongfang Zheng, Gang Chen, and Jay A Farrell. Navigation using linear photo detector arrays. In 2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), pp. 533–538, 2013.
- [172] Muhammad Yasir, Siu-Wai Ho, and Badri N Vellambi. Indoor positioning system using visible light and accelerometer. *Journal of Lightwave Technology*, 32(19), pp. 3306–3316, 2014.

- [173] Muhammad Yasir, Siu-Wai Ho, and Badri N Vellambi. Indoor position tracking using multiple optical receivers. *Journal of Lightwave Technology*, 34(4), pp. 1166–1176, 2016.
- [174] Ahmed Arafa, Sumant Dalmiya, Richard Klukas, and Jonathan F Holzman. Angle-of-arrival reception for optical wireless location technology. *Optics express*, 23(6), pp. 7755–7766, 2015.
- [175] Y. S. Erogluy, I. Guvency, N. Palay, and M. Yukselz, “AOA-based localization and tracking in multi-element VLC systems,” in *Proc. IEEE 16th Annu. Wireless Microw. Technol. Conf. (WAMICON)*, Cocoa Beach, FL, USA, pp. 1–5, 2015.
- [176] G. B. Prince and T. D. C. Little, “A two phase hybrid RSS/AoA algorithm for indoor device localization using visible light,” in *Proc. IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, pp. 3347–3352, 2012.
- [177] J. Herrnsdorf, M. J. Strain, E. Gu, R. K. Henderson, and M. D. Dawson, “Positioning and space-division multiple access enabled by structured illumination with light-emitting diodes,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 35, no. 12, pp. 2339–2345, 2017.
- [178] J. Vongkulbhisal, B. Chantaramolee, Y. Zhao, and W. S. Mohammed, “A fingerprinting-based indoor localization system using intensity modulation of light emitting diodes,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 54, no. 5, pp. 1218–1227, 2012.
- [179] U. Nadeem, N. U. Hassan, M. A. Pasha, and C. Yuen, “Indoor positioning system designs using visible LED lights: Performance comparison of TDM and FDM protocols,” *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 1, pp. 72–74, 2015.
- [180] G. Kail, P. Maechler, N. Preyss, and A. Burg, “Robust asynchronous indoor localization using LED lighting,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. (ICASSP)*, Florence, Italy, pp. 1866–1870, 2014.
- [181] Z. Luo, W. Zhang, and G. Zhou, “Improved spring model-based collaborative indoor visible light positioning,” *Opt. Rev.*, vol. 23, no. 3, pp. 479–486, 2016.

-
- [182] Y. Hou, S. Xiao, H. Zheng, and W. Hu, "Multiple access scheme based on block encoding time division multiplexing in an indoor positioning system using visible light," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 5, pp. 489–495, May 2015.
- [183] A-MCĂILEAN, "Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field", thèse dirigé par Luc Chassagne, Valentin Popa et Barthélemy Cagneau, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Décembre 2014.
- [184] https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/popular_physicsprize2014.pdf
- [185] D. Andrienko, "Modeling of organic light emitting diodes: From molecular to device properties," 2017 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), Copenhagen, Denmark, pp. 101-102, 2017.
- [186] Y. P. Wang, S. L. Tsai, S. W. Wu, C. H. Chang and H. H. Chang, "Efficient blue, green, and red transparent organic light-emitting diodes," 2017 24th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD), Kyoto, Japan, pp. 100-102, 2017.
- [187] Z. Ghassemlooy, H. L. Minh, P. Haigh, and A. Burton, "Development of Visible Light Communications: Emerging Technology and Integration Aspects," in *Optics and Photonics Taiwan International Conference (OPTIC) 2012*, pp. 1, 2012.
- [188] B.T. Phond, "Illumination for computer generated pictures", *Communications of the ACM*, Vol. 18, no. 6, pp. 31-317, 1975.
- [189] S. Dimitrov and H. Haas, "Information Rate of OFDM-Based Optical Wireless Communication Systems With Nonlinear Distortion," *J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 6, pp. 918-929, 2013.

- [190] A. T. Hussein and J. M. H. Elmirghani, "Mobile Multi-Gigabit Visible Light Communication System in Realistic Indoor Environment," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 15, pp. 3293-3307, 2015.
- [191] B. Hussain et al., "A fully integrated IEEE 802.15.7 visible light communication transmitter with on-chip 8-W 85% efficiency boost LED driver," 2015 Symposium on VLSI Circuits (VLSI Circuits), Kyoto, pp. C216-C217, 2015.
- [192] A Novel Architecture for Efficient Implementation of Dimmable VPPM in VLC Lightings.
- [193] K. Lee and H. Park, "Modulations for Visible Light Communications With Dimming Control," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 16, pp. 1136-1138, 2011.
- [194] R. Singh, T. O'Farrell and J. P. R. David, "An Enhanced Color Shift Keying Modulation Scheme for High-Speed Wireless Visible Light Communications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 14, pp. 2582-2592, 2014.
- [195] E. Monteiro and S. Hranilovic, "Design and Implementation of Color-Shift Keying for Visible Light Communications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 10, pp. 2053-2060, May15, 2014.
- [196] X. Li, R. Mardling, and J. Armstrong, "Channel Capacity of IM/DD Optical Communication Systems and of ACO-OFDM," in *Proc. IEEE International Conference on Communications, Glasgow, (ICC). Scotland*, pp. 2128- 2133, 2007.
- [197] S. Hussin, K. Puntsri, and R. Noe, "Performance analysis of optical OFDM systems," in *Proc. 3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, Budapest, (ICUMT). Hungary*, 2011.
- [198] Rui Hou, Yawen Chen, Jigang Wu, Haibo Zhang, "A Brief Survey of Optical Wireless Communication" *Proceedings of the 13th Australasian Symposium on Parallel*

-
- and Distributed Computing (AusPDC 2015), Sydney, Australia, pp. 27-30 January 2015.
- [199] S. Komiyama et al, "A single-photon detector in the far-infrared range", *Nature* 403 pp.405-407, 2000.
- [200] M. W. Geis et al., "CMOS-Compatible All-Si High-Speed Waveguide Photodiodes With High Responsivity in Near-Infrared Communication Band," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 3, pp. 152-154, Feb.1, 2007.
- [201] N. Saha, M. S. Ifthekhar, N. T. Le and Y. M. Jang, "Survey on optical camera communications: challenges and opportunities," in *IET Optoelectronics*, vol. 9, no. 5, pp. 172-183, 2015.
- [202] Y. Imai, T. Ebihara and K. Mizutani, "High-speed visible light communication with image sensor of the low frame rate and polygon mirror," 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Tokyo, pp. 434-438, 2014.
- [203] H. Aoyama and M. Oshima, "Visible light communication using a conventional image sensor," 2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, pp. 103-108, 2015.
- [204] T. Nguyen, A. Islam, T. Hossan and Y. M. Jang, "Current Status and Performance Analysis of Optical Camera Communication Technologies for 5G Networks," in *IEEE Access*, vol. 5, no. , pp. 4574-4594, 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2681110
- [205] P. Dietz, W. Yerazunis, and D. Leigh. Very low-cost sensing and communication using bidirectional leds. In *UbiComp 2003: Ubiquitous Computing*, pp. 175-191. Springer, 2003.
- [206] B. Malik and X. Zhang, "Solar panel receiver system implementation for visible light communication," 2015 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), Cairo, pp. 502-503, 2015.

- [207] B. Moline, V. Olivier, C. Le Jallé, «Démonstration d'une plateforme hybride combinant une fonction de récupération d'énergie pour les communications optiques sans fil », 207, Université De Limoges, France
- [208] Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv and H. Haas, "Towards self -powered solar panel receiver for optical wireless communication," 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, NSW, pp. 3348-3353, 2014.
- [209] A. Chaabna, A. Babouri, Ch. Huang, and X. Zhang, "Visible Light Communication System for Indoor Positioning Using Solar Cell as Receiver," International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEOE), vol. 8, no. 2 , pp. 47-60, 2019.
- [210] A. Chaabna, A. Babouri, and X.Zhang, "An Indoor Positioning System Based on Visible Light Communication Using a Solar Cell as Receiver," Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems: Smart Sustainable Energy Systems, Springer, pp. 43-49, 2018.
- [211] V. Jungnickel, V. Pohl, S. Nonning and C. Von Helmolt, "A Physical Model of the Wireless Infrared Communication Channel," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20 No.3, pp. 631-640, 2002.
- [212] S.H. Yang, D.R Kim, H.S. Kim, Y.H. Son, and S.K. Han, "Indoor positioning system based on visible light using location code," In Proceedings of Communications and Electronics (ICCE), pp. 360–363, 2012.
- [213] Z. Minghua, Z. Shensheng, C. Jian and M. Haibin, "A Novel Indoor Localization Method Based on Received Signal Strength using Discrete Fourier Transform, " In Proc. First Int. Conf. Commun. and Networking, pp.1-5, 2006.
- [214] X. S. Guo, L. Chu, B. Li, B. Xu, Q. Wan, and Y. Shen, "A robust vector matching localization approach based on multiple channels SSD fingerprinting of zigbee networks," Prog. Electro magn. Res., vol. 144, no. 1, pp. 133–140, 2014.

-
- [215] A. S. Glassner, "An Introduction to Ray Tracing," Academic Press, San Diego, 1989.
- [216] A. Satoh, E. Ogawa, "Fundamental Characteristics of In-House Infrared Propagation and Environmental Noise," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 205–208, 1986.
- [217] J. M. Kahn, W. J. Krause, J. B. Carruthers, "Experimental Characterization of Non-Directed Indoor Infrared Channels," IEEE Transactions on Communications, vol. 43, pp. 1613–1623, 1995.
- [218] D. Hash, J. Hillery, J. White, "IR RoomNet: Model and Measurement," IBM Communication ITL Conference, 1986.
- [219] L. Wang, CH. Wang, X. Chi, L. Zhao and X. Dong, "Optimizing SNR for indoor visible light communication via selecting communicating LEDs," Optics communications, Elsevier, 387, pp. 174-181, 2017.
- [220] D. O'Brien et al, "Indoor Visible Light Communications: challenges and prospects," Proceeding of SPIE Vol. 7091 709106, 2008.
- [221] M. Karppinen, K. Kataja, J.T. Makinen, S. Juuso, H.J. Rajaniemi, P. Paakkonen, J. Turunen, J.T. Rantala, and P. Karioja, "Wireless infrared data links: ray-trace simulations of diffuse channels and demonstration of diffractive element for multibeam transmitters," Optical Engineering, 41(4) , pp. 899-910, 2002.
- [222] A.L. Pak, A. Rastegarnia, A. Khalil and Md. K. Islam, "A Distributed Target Localization Algorithm for Mobile Adaptive Networks," ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, , Vol.14, No.02, pp. 47–56, August 2016.
- [223] G. Archenhold, "Health and safety of artificial lighting," Mondo Arc 63 , pp. 111–118, 2011.

- [224] Z. Guo¹, Z. Jia, W. Xia, Y. Zhang and L. Shen, “Indoor Localization System for Mobile Target Tracking based on Visible Light Communication,” IEEE, pp. 1–5, 2017.
- [225] T. Rault, A. Bouabdallah and Y. Challal. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Computer Networks* 67, pp. 104-122, 2014.
- [226] F.M. Costa, H. Ochiai, A comparison of modulations for energy optimization, in: *Wireless Sensor Network Links*, IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 1–5, 2010.
- [227] X. Chu, H. Sethu, Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless ad hoc networks, in: *IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, USA, pp. 262–270, 2012.
- [228] R. Rajagopalan, P.K. Varshney, Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey, *Electrical Engineering and Computer Science*, paper 22, 2006.
- [229] R. Carrano, D. Passos, L. Magalhaes, C. Albuquerque. Survey and taxonomy of duty cycling mechanisms in wireless sensor networks. *IEEE Communications*. 2014.
- [230] D. Kumar, T.C. Aseri, R. Patel. EEHC: energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks. *Computer Communications*. 2009.
- [231] H. Li, Y. Liu, W. Chen, W. Jia, B. Li, J. Xiong. COCA: constructing optimal clustering architecture to maximize sensor network lifetime,” *Computer Communications*. 2013.
- [232] A. Liu, J. Ren, X. Li, Z. Chen, X.S. Shen, Design principles and improvement of cost function based energy aware routing algorithms for wireless sensor networks,” *Computer Networks*. 2012.
- [233] L. Chen, S. Cool, H. Ba, W. Heinzelman, I. Demirkol, U. Muncuk, K. Chowdhury and S. Basagni. “Range Extension of Passive Wake-up Radio Systems through En-

- ergy Harvesting,” IEEE ICC 2013 - Ad-hoc and Sensor Networking Symposium. 2013.
- [234] M. Magno, N. Jackson, A. Mathewson, L. Benini and E. Popovici. “Combination of hybrid energy harvesters with MEMS piezoelectric and nano-Watt radio wake up to extend lifetime of system for wireless sensor nodes,” ARCS 2013.
- [235] Fraas, L., & Partain, L. “Solar Cells and Their Applications (2nd ed.),” New Jersey: Wiley, 2010.
- [236] Zhou, Z., Kavehrad, M., & Deng, P. “Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications,” *Optical Engineering*, 51(8), 1-6. 2012
- [237] Abbott, J. D. “Keeping the energy debate clean: How do we supply the world’s energy needs?,” *Proceedings of the IEEE*, 98(1), pp. 42-66, 2010.
- [238] McEvoy, A., Castaner, L., & Markvart, T. “Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation (2nd ed.),” Oxford: Elsevier, 2013.
- [239] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. “Solar cell efficiency tables (version 42),” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(5), pp. 827-837, 2013.
- [240] Danesh, M., & Long, J. R. “An autonomous wireless sensor node incorporating a solar cell antenna for energy harvesting,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59(12), pp. 3546-3555, 2011.
- [241] Lee, H. W., Kim, J. S., & Lee, B. K. “Photovoltaic solar cell application for e-book,” In *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS '10)*, pp. 648-651, 2010.
- [242] Liu, Y., Chen, H. Y., Liang, K., Hsu, C. W., Chow, C. W., & Yeh, C. H. “Visible light communication using receivers of camera image sensor and solar cell,” *IEEE Photonics Journal*, 8(1), 2016.

-
- [243] Wang, Z., Tsonev, D., Videv, S., & Haas, H. "On the design of a solar-panel receiver for optical wireless communications with simultaneous energy harvesting," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(8), pp. 1612-1623, 2015.
- [244] Kim, S. M., Won, J. S., & Nahm, S. H. "Simultaneous reception of solar power and visible light communication using a solar cell," *Optical Engineering*, 53(4), ID046103, 2014.
- [245] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., & Voulgaris, N. C. ,"Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16(1), pp. 46-54, 2001.
- [246] S. Subedi and J-Y Pyun, " Practical Fingerprinting Localization for Indoor Positioning System by Using Beacons", *Hindawi, J. Sens*, Article ID 9742170, pp.1-16, 2017.
- [247] T. Roos, P. Myllymaki, H. Tirri, P. Misikangas and J. Sievanen, "A probabilistic approach to WLAN user location estimation," *Int. J. Wireless Inform. Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 155-163, July, 2002.
- [248] H. Nurminen, J. Talvitie, S. Ali-Loytty, P. Muller, E.S. Lohan, R. Piché and M. Renfors, "Statistical path loss parameter estimation and positioning using RSS measurements in indoor wireless networks, " *In Proc. 2012 Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Sydney, pp. 1-9, 2012.
- [249] J. Talvitie, M. Renfors, and E.S. Lohan, "Distance-based Interpolation and Extrapolation Methods for RSS-based Localization with Indoor Wireless Signals, " *IEEE Trans Veh. Technol.*,vol.64, no.4, pp.1340-1353, April, 2015.
- [250] F. Shih-Hau, L. Tsung-Nan and L. Pochiang, "Location Fingerprinting In A Decorrelated Space," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* vol.20, no.5, pp.685-691, May, 2008.

- [251] N. Tuan, T. The Son, and H. Le Minh, “Weighted k-Nearest Neighbor Model for Indoor VLC Positioning,” *IET Communications*, vol. 11, ISS. 6, pp. 864–871, May, 2017.