

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



Faculté : Sciences et Technologie
Département : Electronique et Télécommunications
Laboratoire de domiciliation : Télécommunications (LT)

THÈSE

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

Domaine : Sciences et Technologie Filière : Télécommunications
Spécialité : Télécommunications

Présentée par

CHOUABIA Halim

Intitulée

Système MIMO multifonctionnel dans le concept VLC

Soutenue le : 06 /11/ 2023

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Université	
Mr BOUALLEG Ahcene	Pr.	Univ. 8 Mai 1945- Guelma	Président
Mr BABOURI Abdesselam	Pr.	Univ. 8 Mai 1945- Guelma	Encadreur
Mr ZHANG Xun	Dr.	Institut de ISEP France	Co-encadreur
Mr FEZARI Mohamed	Pr.	Univ. Badji Mokhtar Annaba	Examineur
Mr BOULSINA Fayçal	Dr.	Univ. 8 Mai 1945- Guelma	Examineur
Mr CHAABNA Ameer	Dr.	Univ. USTHB - Alger	Invité

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à exprimer ma très profonde gratitude à mon **directeur de thèse, Pr .Abdesselam Babouri** pour le suivit rigoureux et permanent du premier au dernier jour de ma thèse. Je ne pourrai jamais oublier son esprit de recherche et ses commentaires efficaces.. Il m'a été un grand plaisir de travailler et d'acquérir une précieuse expérience avec lui.*

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 pendant mon séjours à Paris ainsi à tous les membres de l'institut ISEP.*

*Je tiens également à remercier **Ameur Chaabna**, docteur à l'université de Houari Boumediene, pour son soutien moral et ses conseils techniques qu'il m'a apportés durant toutes ces années d'études.*

Mes remerciements les plus sincères sont adressés aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et de rapporter ce manuscrit.

*Merci à **ma mère**, ma famille pour l'appui moral qu'ils m'ont témoigné, à qui je souhaite une vie pleine de bonheur et de santé.*

A tous les membres de laboratoire LT de l'université 8 Mai 1945 Guelma s'adressent mes sincères remerciements.

RÉSUMÉ

Au cours des dernières années, il y a eu une explosion du nombre de gadgets et d'applications utilisant la communication sans fil, ce qui a entraîné d'importantes transformations dans le mode de vie des individus. Afin de faire face à cette augmentation de la connectivité, plusieurs techniques avancées sont prévues dans le cadre des normes 5G, tout en cherchant de réduire l'effet négatif de la consommation énergétique.

La transmission de données sans fil est omniprésente et le trafic mondial des données connaît une croissance rapide. Les ressources actuelles du spectre des radiofréquences (RF) sont de plus en plus saturées, donc le système de communication sans fil basé sur les RF ne pourra pas faire face aux exigences croissantes du trafic à l'avenir. Des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité spectrale des réseaux RF existants. Des techniques telles que la transmission et la réception multiples (MIMO) ont fait l'objet de nombreuses études approfondies. Cependant, ces techniques restent insuffisantes pour répondre à la croissance rapide du trafic de données sans fil. L'avènement de l'infrastructure d'éclairage LED représente une énorme opportunité pour le développement des communications par lumière visible (VLC). Elles utilisent les LED pour transmettre des données sans fil à haut débit, tout en maintenant leur éclairage fonctionnel.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse est d'améliorer les performances des systèmes VLC intérieurs en termes d'illuminance, de puissance reçue, de rapport signal sur bruit (SNR) et de débit, en proposant un nouvel arrangement des LED (3D). L'étude porte également sur l'effet des paramètres émetteur/récepteur sur le débit de données dans un système 4x4 MIMO-VLC. Explorant différentes techniques MIMO telles que la diversité spatiale (SD), le multiplexage spatial (SMP), la commutation SD/SMP, le multiplexage spatial adaptatif (aSMP) et le multiplexage spatial adaptatif assisté par SD (SD-aSMP).

Mots Clés : Communication par Lumière Visible, Entrées Multiples/Sorties Multiples, Diode Electroluminescente, Modulation d'intensité/Détection Directe, Débit de Données.

ABSTRACT

In recent years, there has been an explosion in the number of gadgets and applications using wireless communication, leading to significant transformations in people's lifestyles. To cope with this increased connectivity, several advanced techniques are planned within the framework of 5G standards, while also aiming to reduce the negative impact of energy consumption.

Wireless data transmission is ubiquitous, and global data traffic is experiencing rapid growth. Current resources in the radio frequency (RF) spectrum are becoming increasingly saturated, which means that RF-based wireless communication systems will not be able to meet the growing traffic demands in the future. Research is underway to enhance the spectral efficiency of existing RF networks. Techniques such as multiple-input multiple-output (MIMO) have been the subject of numerous in-depth studies. However, these techniques remain insufficient to address the rapid growth of wireless data traffic. The emergence of LED lighting infrastructure represents a significant opportunity for the development of visible light communication (VLC). It uses LEDs to transmit high-speed wireless data while maintaining their functional lighting capabilities.

In this context, the main objective of this thesis is to improve the performance of indoor VLC systems in terms of illuminance, received power, signal-to-noise ratio (SNR), and throughput by proposing a new arrangement of LEDs (3D). The study also examines the effect of transmitter/receiver parameters on data throughput in a 4x4 MIMO-VLC system. Exploring various MIMO techniques, such as spatial diversity (SD), spatial multiplexing (SMP), SD/SMP switching, adaptive spatial multiplexing (aSMP), and SD-assisted adaptive spatial multiplexing (SD-aSMP).

Keywords: Visible Light Communication, Multiple-Input Multiple-Output, Light-Emitting Diode, Intensity Modulation/Direct Detection, Data rate.

ملخص

في السنوات الأخيرة، شهد عدد الأجهزة والتطبيقات التي تستخدم الاتصالات اللاسلكية ارتفاعًا كبيرًا، مما أدى إلى تحولات هامة في نمط حياة الأفراد، للتعامل مع هذا الاتصال المتزايد، تم التخطيط للعديد من التقنيات المتقدمة في إطار معايير G5، بينما تهدف أيضًا إلى تقليل التأثير السلبي لاستهلاك الطاقة.

ينتشر نقل البيانات اللاسلكية في كل مكان وتتزايد حركة البيانات العالمية بسرعة. أصبحت الموارد الحالية في طيف الترددات الراديوية (RF) مشبعة بشكل متزايد، وبالتالي لن يكون نظام الاتصالات اللاسلكية القائم على الترددات الراديوية (RF) قادرًا على التعامل مع متطلبات الحركة المتزايدة للبيانات في المستقبل. يجري البحث لتحسين الكفاءة الطيفية لشبكات التردد الراديوي الحالية. حيث تم دراسة تقنيات مثل الإرسال والاستقبال المتعدد (MIMO) على نطاق واسع. ومع ذلك، فإن هذه التقنيات لا تزال غير كافية لمواجهة النمو السريع لحركة البيانات اللاسلكية. يمثل ظهور بنية التتوير بالثنائيات الباعثة للضوء (LED) فرصة كبيرة لتطوير اتصالات الضوء المرئي (VLC)، والتي تستخدم مصابيح LED كأجهزة إرسال بيانات لاسلكية عالية السرعة مع الحفاظ على وظيفة الإضاءة الخاصة بها.

في هذا السياق، يتمثل الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة في تحسين أداء أنظمة اتصال الضوء المرئي (VLC) الداخلية من حيث الإضاءة، القدرة المستقبلية، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) والإنتاجية من خلال اقتراح ترتيب جديد للمصابيح الباعثة للضوء (LED) وهو الترتيب ثلاثي الأبعاد (3D). تتناول الدراسة أيضًا تأثير معلمات المرسل / المستقبل على معدل البيانات في نظام 4x4 MIMO-VLC، من خلال استغلال تقنيات MIMO المختلفة، مثل التنوع المكاني (SD)، وتعدد الإرسال المكاني (SMP)، والتبديل SD / SMP، وتعدد الإرسال المكاني التكميلي (aSMP) وتعدد الإرسال المكاني التكميلي بمساعدة SD (SD-aSMP).

الكلمات المفتاحية : اتصالات الضوء المرئي، المدخلات المتعددة والمخرجات المتعددة، الصمام الثنائي الباعث للضوء، تعديل الكثافة / الكشف المباشر، معدل البيانات.

Table des matières

Remerciement	i
Résumé	ii
Table des Matières	v
Liste des Figures	ix
Liste des Tableaux	xi
Liste des Acronymes	xii
Introduction Générale	1

Chapitre 1 : Introduction à la communication par lumière visible

1.1 Qu'est-ce que la communication par la lumière visible ?	5
1.2 Histoire du développement de la VLC	5
1.3 Principe de fonctionnement	8
1.4 Avantages et inconvénients	9
1.5 Domaine d'application de la VLC	11
1.6 Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi	16
1.7 Normalisation du VLC	18
1.8 Conclusion	19

Chapitre 2 : Architecture d'un system VLC

2.1 Introduction	21
2.2 Emetteur VLC	22
2.2.1 Types et structures des LEDs	22
2.2.2 Radiométrie et photométrie	26
2.3 Récepteurs VLC	27

2.3.1	Types et structures de PD	29
2.4	Canal optique sans fil en intérieur	31
2.5	Bruit dans les systèmes VLC	34
2.5.1	Bruit de courant d'obscurité	34
2.5.2	Bruit optique ambiant(Shot Noise)	35
2.5.3	Bruit Thermique	35
2.6	Techniques de modulation numérique	36
2.6.1	Techniques de modulation mono-porteuse	36
2.6.2	Modulation multi-porteuse	38
2.6.2.1	OFDM Optique	39
2.6.2.2	Modulation d'amplitude et de phase sans porteuse (CAP).....	44
2.6.3	Schémas de modulation spécifiques à VLC).....	45
2.7	Système de transmission	45
2.7.1	Système SISO	46
2.7.2	Système SIMO	46
2.7.3	Système MISO	47
2.7.4	Système MIMO	47
2.8	MIMO Optique (OMIMO)	48
2.8.1	Techniques d'égalisation numérique	52
2.8.1.1	Égaliseur de Forçage à zéro (ZF).....	52
2.8.1.2	Égaliseur de l'Erreur Quadratique Moyenne Minimum (MMSE).....	53
2.9	Techniques d'accès multiples	54
2.9.1	Schémas à accès multiple orthogonaux	54
2.9.1.1	Accès multiple par répartition temporelle (TDMA).....	54
2.9.1.2	Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA).....	55
2.9.1.3	Accès multiple par répartition en code (CDMA).....	55
2.9.1.4	Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA).....	55
2.9.1.5	Accès multiple par répartition spatiale (SDMA).....	55
2.9.1.6	Accès multiple par multiplexage en longueur d'onde (WDMA).....	56
2.9.2	Schémas à accès multiple non orthogonaux(MIMO basé sur le NOMA)	56
2.10	MIMO multi-utilisateurs	57
2.11	Comparaison des schémas à accès multiples appliqués aux systèmes VLC	57
2.12	Conclusion	58

Chapitre 3 : Etude 3D des Arrangements des LEDs pour des Applications Intérieures

3.1 Introduction	61
3.2 Évaluation des performances du système VLC sur la base de l'arrangement des LEDs	61
3.3 Exigences du système VLC	62
3.4 Configuration des Modèles des LEDs dans le system VLC Intérieur	63
3.4.1 Modélisation des systèmes VLC proposés	65
3.4.2 Le canal de transmission	65
3.5 Analyse des systèmes VLC proposée	67
3.5.1 Distribution d'illuminance horizontale	67
3.5.2 Puissance reçue	67
3.5.3 Rapport signal sur bruit (SNR)	68
3.5.4 Propagation du retard quadratique moyen (RMSDS)	68
3.5.5 Débit binaire	69
3.6 Evaluation des performances des systèmes proposés	69
3.6.1 Distribution d'illuminance horizontale	69
3.6.2 Puissance optique reçue	71
3.6.3 Performance SNR du système	73
3.6.4 Propagation du retard quadratique moyen (RMSDS)	75
3.7 Conclusion	78

Chapitre 4 : Impact des Paramètres Emetteur/Récepteur sur Le Débit de Données dans un Système de Communication par Lumière Visible MIMO (MIMO-VLC)

4.1 Introduction	80
4.2 Présentation du Système Etudié	80
4.3 Débits de Données	81
4.3.1 Diversité spatiale (SD).....	81
4.3.2 Multiplexage spatial (SMP).....	83
4.3.3 Commutation SD/SMP	85
4.3.4 Multiplexage spatial adaptatif (aSMP).....	85
4.3.5 Multiplexage spatial adaptatif assisté par la diversité spatiale (SD-aSMP).....	87
4.4 Évaluation et comparaison des performances du système	90

4.4.1 Configuration de la simulation	90
4.5 RÉSULTATS ET DISCUSSION	91
4.5.1 Effet de la distance spatiale entre les PDs	92
4.5.2 Effet de la distance spatiale entre LEDs	93
4.5.3 Effet de l'angle de demi-puissance de la LED	95
4.6 CONCLUSIONS	100
Conclusion Générale	101
Bibliographie	104
Publications et Communications	119

Liste des figures

Chapitre 1

Fig 1.1	Concept du photophone a été introduit par A. G. Bell. La lumière du soleil est réfléchi sur un modulateur, dont la sortie est transmise via un canal sans fil et reçue par un photo-collecteur Rx.....	6
Fig 1.2	Quelques grandes étapes de la recherche sur la VLC	8
Fig 1.3	Principe de fonctionnement de la LED	9
Fig 1.4	Distribution du spectre électromagnétique et spectre visible	9
Fig 1.5	Système d'éclairage intelligent compatible avec VLC	11
Fig 1.6	Déploiement de VLC dans les maisons intelligentes et dans les musées.....	12
Fig 1.7	Communication de véhicule-véhicule	13
Fig 1.8	Prototype d'un système de positionnement intérieur à base de VLC	14
Fig 1.9	Illustration du VLC dans la communication sous-marine	14
Fig 1.10	Illustration de la communication VLC à bord d'un avion et dans un hôpital	15
Fig 1.11	(a) Cellule de fabrication utilisée pour les expériences dans l'installation d'essai de robots de BMW ; et (b) la trace du mouvement du bras du robot	16

Chapitre 2

Fig 2.1	Architecture d'un system VLC: a. Emitter; b. Canal; c. Receiver	21
Fig 2.2	Principe d'une LED blanche à base de phosphore	23
Fig 2.3	Génération de lumière blanche à partir de LED rouge-vert-bleu.....	23
Fig 2.4	Sensibilité de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde du spectre visible.	27
Fig 2.5	Diagramme de la photodiode PIN	30
Fig 2.6	Modèle géométrique MIMO VLC à trajets multiples en intérieur	31
Fig 2.7	Signal optique NRZ-OOK	37
Fig 2.8	Signal optique 4-PAM	38
Fig 2.9	Signal optique 2-PPM	39
Fig 2.10	Symétrie hermitienne imposée IFFT	40
Fig 2.11	OFDM optique pour la communication par lumière visible	41
Fig 2.12	Illustration du fonctionnement du SM 4-PAM avec 4 émetteurs	52

Chapitre 3

Fig 3.1	Arrangement du premier Modèle	64
Fig 3.2	Arrangement du deuxième Modèle	64
Fig 3.3	Vue de dessus des modèles proposés : (a) - modèle 1, et (b) - modèle 2.....	64
Fig 3.4	La configuration géométrique du système	64
Fig 3.5	Distribution d'illuminance pour: (a) Modèle Khadr, (b) premier modèle proposé à D=20 cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) deuxième modèle proposé à D=20 cm	71
Fig 3.6	Puissance reçue en dBm : (a) Modèle Khadr, (b) premier modèle proposé à D=20 cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) deuxième modèle proposé à D=20 cm	72
Fig 3.7	Distribution SNR pour : (a) Modèle Khadr, (b) premier modèle proposé à D=20 cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) deuxième modèle proposé à D=20 cm	74
Fig 3.8	Distribution SNR pour : (a) Modèle Khadr 1, (b) Modèle proposé 1 à D=20 cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) Modèle proposé 2 à D=20 cm	77

Chapitre 4

Fig 4.1	Exemple de SMP pour une communication MIMO avec quatre configurations émetteur LED	84
Fig 4.2	a) Configuration géométrique et (b) Vue de dessus du système 4x4 MIMO-VLC	90
Fig 4.3	Comparaison du débit de données pour différentes techniques MIMO avec (a) : $d_{PD} = 20$ cm, (b) : $d_{PD} = 25$ cm	93
Fig 4.4	Le débit de données par rapport à la distance entre les LED	94
Fig 4.5	Comparaison du débit de données pour différentes techniques MIMO avec (a) : $d_{LED} = 3$ m, (b) : $d_{LED} = 2$ m.....	95
Fig 4.6	Variation du débit de données par rapport à l'angle de demi-puissance de la LED.....	96
Fig 4.7	Comparaison du débit de données pour différentes techniques MIMO avec (a): $\phi_{1/2} = 70^\circ$, (b): $\phi_{1/2} = 58^\circ$	97
Fig 4.8	SD Répartition du débit réalisable à: (a) $\phi_{1/2} = 70^\circ$, (b) $\phi_{1/2} = 58^\circ$	98
Fig 4.9	SMP Répartition du débit réalisable à:(a) $\phi_{1/2} = 70^\circ$, (b) $\phi_{1/2} = 58^\circ$	99

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1	Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi.....	17
Tableau 1.2	Comparaison des caractéristiques des principales normes LiFi.....	19

Chapitre 2

Tableau 2.1	Liaisons VLC basées sur des LED blanches à base de phosphore.....	25
Tableau 2.2	Liaisons VLC basées sur des LED multi-puces	25
Tableau 2.3	Liaisons VLC à base de LED organique (OLED).....	26
Tableau 2.4	Caractéristiques de performance (typiques) pour différents	29
Tableau 2.5	Différentes méthodes de modulation dans VLC	45
Tableau 2.6	Comparaison qualitative des schémas d'accès multi-utilisateurs dans VLC.....	58

Chapitre 3

Tableau 3.1	Paramètres de Simulation.....	66
Tableau 3.2	Distribution d'illuminance horizontale.....	71
Tableau 3.3	Puissance reçue pour la liaison LOS.....	73
Tableau 3.4	Les valeurs de SNR.....	75
Tableau 3.5	Les valeurs Max et Min du Débit de données et RMSDS.....	77

Chapitre 4

Tableau 4.1	Paramètres de Simulation.....	91
-------------	-------------------------------	----

Liste des acronymes

2D	Two-Dimensional
3D	Three-Dimensional
4G	4th Generation
5G	5th Generation
6G	6th Generation
ACO –OFDM	Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ADT	Angle Diversity Transmitter
APD	Avalanche Photodiode
aSMP	Adaptive Spatial Multiplexing
AWGN	Additive white Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
CAP	Carrierless Amplitude Phase modulation
CDMA	Code Division Multiple Access
CD-NOMA	Code Division Non-Orthogonal Multiple Access
CPS	cyber-physical systems
CSI	Channel State Information
CSK	Color Shift Keying
D2DC	Device to Device Communications
DC	Direct Current
DCO-OFDM	Direct-Current-biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DD	Direct Detection
DFE	Decision Feedback Equalizer
DMT	Discrete Multi-Tone
DSP	Power Spectral Density
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FET	Field-Effect Transistor
FFE	Feed Forward Equalizer
FFT	Fast Fourier Transform
FOV	Field Of View
GPS	Global Position System
ICI	Inter-Channel Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEM	Electromagnetic Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform IPS: Indoor Positioning Services
IM	Intensity Modulation
IM/DD	Intensity-Modulated/Direct Detection
IOT	Internet Of Things
IPS	Indoor Positioning System
IR	Infra-Red
ISI	Inter-Symbol Interference
ITU-T	Union internationale des télécommunications
LD	Laser Diode
LED	Light Emitting Diode

LI-FI	light Fidelity
LOS	Line-Of-Sight
LTE	Long-Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MMSE	Minimum Mean-Square-Error
MMSE-SIC	minimum mean square error equalizer with successive interference cancellation
M-PAM	M-ary Pulse Amplitude Modulation
M-PSK	M-ary Phase Shift Keying
M-QAM	M-ary Quadrature Amplitude Modulation
MRC	Maximum-Ratio Combining
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple Output
NLOS	Non Line-Of-Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NRZ	Non-Return to Zero
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLED	Organic Light-Emitting Diode
OMA	Orthogonal Multiple Access
OMEGA	HOME Gigabit Access
OMIMO	Optical MIMO
OOC	Optical Camera Communication
OOK	On-Off Keying
OPPM	Overlapping PPM
OQAM	offset quadrature amplitude modulation
OWC	Optical Wireless communication
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PD	Photodiode
PD-NOMA	Power Domain-NOMA
PHY	Physical layer PIN: Positive Intrinsic Negative diode
PIN	Positive Intrinsic Negative
PPM	Pulse Position Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RC	Repetition Coding
REM	Rayonnement Electromagnétique
RF	Radio Frequency
RGB	Red Green Blue
RGBY	Red Green Blue Yellow
RMS	Root Mean Square
RZ	Return to Zero
SCM	Subcarrier Multiplexing
SD	Spatial Diversity
SDMA	Space Division Multiple Access
SIMO	Single Input Multiple Output
SI PIN	Silicon PIN Photodiodes
SISO	Single Input Single Output

SM	Spatial Modulation
SMP	Spatial Multiplexing
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
UV	Ultraviolet
VLC	Visible Light Communication
VLCA	Visible Light Communications Association
VLCC	Visible Light Communications Consortium
VPPM	Variable Pulse Position Modulation
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WDMA	Wavelength Division Multiple Access
WI-FI	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAM	Wireless Personal Area Network
ZF	Zero-Forcing
ZF-SIC	Zero Forcing Equalizer with Successive Interference Cancellation

Introduction Générale

Les communications sans fil évoluent aujourd'hui à un rythme rapide, pour atteindre l'objectif de conception de la cinquième génération (5G) et au-delà (B5G) [1]. Les besoins du réseau de communication 5G sont : l'amélioration du débit mobile, la communication à très faible latence et la connectivité massive [2]. La demande d'un nombre croissant des dispositifs est un grand défi pour les technologies de communication sans fil existantes (par exemple Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, etc.) qui sont basées sur des systèmes de radiofréquence (RF) et utilisent la partie radiofréquence du spectre électromagnétique, qui est strictement surchargée et réglementée.

Les études précédentes suggèrent que la majorité du trafic de données est générée par les utilisateurs en intérieur [3]. Ainsi, le service sans fil sera plus nécessaire dans les environnements intérieurs qu'extérieurs, compte tenu de l'utilisation de la bande passante dans l'industrie à domicile. Dans les prochains jours, la demande d'accès à l'internet connaîtra une croissance exponentielle, car les deux tiers de la population mondiale seront connectés à l'internet [4]. Par conséquent, de nouvelles technologies de communication et une bande passante plus large sont nécessaires pour améliorer l'expérience de l'utilisateur et garantir la connectivité.

La communication par lumière visible (VLC) est une technologie de communication sans fil qui utilise des signaux lumineux pour transférer des données au dispositif récepteur [5]. La VLC présente une caractéristique intéressante qui permet d'utiliser la transmission en liaison descendante pour la double fonction : éclairage et communication de données. Le spectre de la lumière visible possède une large bande passante qui peut constituer une solution complémentaire pour la communication radiofréquence (RF). Le spectre de la lumière visible s'étend de 380 nm à 780 nm, ce qui correspond à un spectre de fréquences dans la gamme de 384 THz à 789 THz [6].

La faible disponibilité du spectre en RF peut poser des limites à la connectivité des appareils de l'internet des objets (IoT), où le VLC peut fournir une solution prometteuse [7].

La VLC présente de nombreux avantages, tels qu'une large bande passante non utilisée et sans licence (près de 400 THz de largeur de bande disponible), VLC n'interfère pas avec la communication RF existante. Aucune configuration supplémentaire n'est requise pour que le

système d'éclairage existant puisse être utilisé pour la communication. Le coût de mise en œuvre d'un émetteur et d'un récepteur basés sur VLC est inférieur à celui du système RF. Aucun risque pour la santé humaine, sauf l'effet de scintillement, qui peut être réduit par l'utilisation d'une fréquence de modulation supérieure à 200 Hz, une robustesse intrinsèque contre les écoutes non autorisées et une immunité aux interférences électromagnétiques. L'émetteur et le récepteur sont moins coûteux et commercialement disponibles. Et comme la taille du récepteur est petite, l'évanouissement par multi-trajets peut être atténué.

Grâce aux avantages susmentionnés, il est prévu que la VLC puisse être intégrée en tant que segment de la prochaine génération de réseaux cellulaires, afin de réaliser des réseaux de communication intérieurs très denses. La VLC ouvre la voie à une nouvelle possibilité et des nouveaux domaines d'application tels que les communications sous-marines, satellitaires et de véhicule à véhicule.

Depuis 2010, les LED remplacent de plus en plus les méthodes d'éclairage classiques telles que les ampoules à incandescence ou fluorescentes. En effet, les LED offrent de nombreux avantages tels qu'une durée de vie plus longue d'au moins 50000 heures [8, 9], une efficacité plus élevée et une taille plus petite. Selon les données de l'Agence internationale de l'énergie [10], la part des ventes de LED sur le marché mondial de l'éclairage est montée de 4 % à 46 % entre 2013 et 2019 et devrait atteindre 87 % d'ici à 2030. Une autre étude du ministère de l'énergie des États-Unis estime que les LED représenteront 86 % de toutes les installations d'éclairage d'ici 2035 [11, 12]. Cela indique une prolifération inévitable des dispositifs LED et de la technologie VLC associée.

La réalisation transparente d'un réseau optique sans fil nécessite l'utilisation d'une grande variété de formats de modulation et de techniques de transmission de données. Ceci est particulièrement important pour soutenir un grand nombre d'applications. L'une de ces méthodes consiste à utiliser plusieurs sources et détecteurs optiques au niveau de l'émetteur et du récepteur respectivement ; cette méthode est appelée transmission à entrées et sorties multiples (MIMO). Dans les systèmes MIMO, un flux de données d'entrée en série est envoyé via plusieurs sources optiques et il est collecté par un réseau de détecteurs, chacun ayant une force de signal différente en fonction de la configuration géométrique [13].

La technique MIMO dans la Communication optique sans fil (OWC) peut être utilisé pour créer des canaux de communication parallèles, en exploitant des degrés de liberté supplémentaires. L'application des techniques MIMO à l'OWC est dans une large mesure

motivée par le succès qu'elles ont rencontré dans les communications RF. Elles ont été utilisées pour améliorer la capacité et/ou la fiabilité des liaisons de communication sans fil. Par exemple, la norme de réseau sans fil IEEE 802.11n [14] et la technologie Long-Term Evolution (LTE) [15] sont conçues pour utiliser des antennes multiples afin d'augmenter le débit de données. De même, les systèmes MIMO optiques offrent la possibilité d'améliorer l'efficacité spectrale, en fournissant une capacité plus élevée sans nécessiter de puissance ou de bande passante supplémentaire [5].

Il existe un certain nombre d'approches pour mettre en œuvre la technique MIMO pour l'OWC, et chacune a ses caractéristiques, ses avantages et ses limites. Parmi les approches les plus courantes examinées dans cette thèse, on peut citer le codage par répétition (RC) (la diversité spatiale), utilisé principalement pour le gain de diversité, le multiplexage spatial (SMP), qui offre des gains de capacité, et la modulation spatiale (SM), qui offre un compromis entre la capacité et la fiabilité [16].

Cependant, cette thèse se focalise sur deux axes : le premier est une proposition de système VLC intérieur basé sur un nouvel arrangement tridimensionnelle (3-D) des LED, le second est l'amélioration du débit de données dans un système de communication par lumière visible (VLC), utilisant la technique MIMO (entrées multiples/sorties multiples).

Concernant le premier axe, un système VLC intérieur basé sur un nouvel arrangement de matrices de LED utilisant 16 LED réparties dans un espace 3D autour du plafond. Sachant que les performances des arrangements proposées sont étudiées et comparées avec d'autres différents arrangements existent dans la littérature, qui utilisent le même nombre des LED. L'objectif de cette partie est d'améliorer l'efficacité lumineuse, la puissance reçue, le débit de données et le rapport signal sur bruit (SNR) dans toute la pièce sans augmenter le nombre de LED ou la puissance transmise.

Le deuxième axe, consiste à étudier l'effet des paramètres de l'émetteur/récepteur sur le débit de données dans un système 4×4 MIMO-VLC dans un environnement intérieur, notamment : la distance spatiale entre les photodiodes (PD), la distance spatiale entre les LED, ainsi que l'effet de l'angle de demi-puissance de la LED.

Exploitant différentes techniques MIMO telles que la diversité spatiale (SD), le multiplexage spatial (SMP), la commutation SD/SMP, le multiplexage spatial adaptatif (aSMP) et le multiplexage spatial adaptatif assisté par SD (SD-aSMP).

Le travail réalisé est subdivisé en 4 chapitres, où :

Dans le chapitre 1, nous commençons par présenter la définition de la communication par lumière visible, suivie d'un bref historique, puis son principe de fonctionnement, nous citons ensuite quelques avantages, inconvénients et domaines d'application. Ensuite une comparaison entre le Li-Fi et le Wi-Fi est présentée, et enfin nous présentons la norme VLC.

Le chapitre 2 est consacré à l'étude de l'architecture d'un système VLC : émetteur, récepteurs, canal de transmission optique, ainsi que les différents types de bruit, les techniques de modulation numérique et d'accès multiple.

Ensuite, nous avons discuté des systèmes de transmission, et enfin des systèmes MIMO multi-utilisateurs.

Dans le chapitre 3, nous avons étudié les arrangements tridimensionnels des LED pour des applications Indoor, ou les performances du système VLC basé sur l'arrangement des LED sont évaluées, puis nous avons présenté les exigences de ce système et la conception des modèles des LED, Analysant et évaluant ensuite les performances du système proposé.

Dans le dernier chapitre, nous avons parlé sur l'effet des paramètres émetteur-récepteur sur le débit de données dans un système MIMO-VLC avec une présentation du système étudié. Après nous avons présenté le débit de données pour les diverses techniques MIMO, ainsi qu'une évaluation et comparaison des performances du système, ensuite les différents résultats de simulation sont discuté.

Enfin, mes travaux de thèse sont clôturés par une conclusion générale et quelque perspective.

Chapitre 1

Introduction à la communication par lumière visible

1.1	Qu'est-ce que la communication par la lumière visible	05
1.2	Histoire du développement de la VLC.....	05
1.3	Principe de fonctionnement	08
1.4	Avantages et inconvénients	09
1.5	Domaine d'application de la VLC	11
1.6	Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi	16
1.7	Normalisation du VLC	18
1.8	Conclusions.....	19

1.1 Qu'est-ce que la communication par la lumière visible ?

La VLC est une technique de communication optique sans fil, dans laquelle la lumière produite par une LED (diode électroluminescente) dans le spectre visible est utilisée comme un support de données grâce à l'utilisation de la modulation d'intensité (IM). Il s'agit d'un protocole qui convertit le WIFI en VLC à travers la lumière de LED. Tandis que le Wifi (Wireless Fidelity) utilise la partie radio du spectre électromagnétique (entre 2,4 et 5 GHz), la VLC tire parti de la partie optique du spectre (entre 384 et 789 THz) [17]. La technologie VLC a le potentiel de transformer n'importe quelle source lumineuse LED en une unité de diffusion de données [18- 22].

1.2 Histoire du développement de la VLC

L'histoire de la VLC remonte aux Romains, lorsque des plaques métalliques polies étaient utilisées pour réfléchir la lumière du soleil et transmettre des signaux sur une longue distance. En 1794, Claude Chappe a mis au point un système de sémaphore composé d'une série de

tours équipées de bras montés afin de transmettre des informations. À la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle, l'héliographe a été utilisé pour les communications à longue distance. Dans l'héliographe, la lumière du soleil est réfléchié à l'aide d'un miroir pour transmettre le code Morse. Les armées australienne et britannique l'ont utilisé jusqu'en 1960. Graham Bell est le plus connu pour son invention du téléphone moderne, qui utilise l'électricité pour transmettre la voix. Cependant, Bell a décrit le photophone comme l'une de ses inventions les plus importantes [23]. Le photophone utilise la voix pour vibrer le miroir, qui à son tour est utilisé pour moduler la lumière du soleil. C'est l'idée de Graham Bell qui a ouvert la voie à la communication par fibre optique. Le premier système commercial de communication par fibre optique a été lancé en 1975 et était capable de fonctionner à un débit de 45 Mbit/s. La VLC est une forme de communication optique qui fonctionne en plein air, à une distance de deux à trois mètres, au lieu un support guidé (fibre optique).

Le terme VLC a commencé de prendre la forme en 2003 pour la première fois par le laboratoire Nakagawa de l'université de Keio, au Japon [24]. En 2000, ce laboratoire fait la démonstration du premier système VLC utilisant des diodes électroluminescentes (LED), ces LED sont économes en énergie et ont rapidement remplacé l'éclairage traditionnel à incandescence.

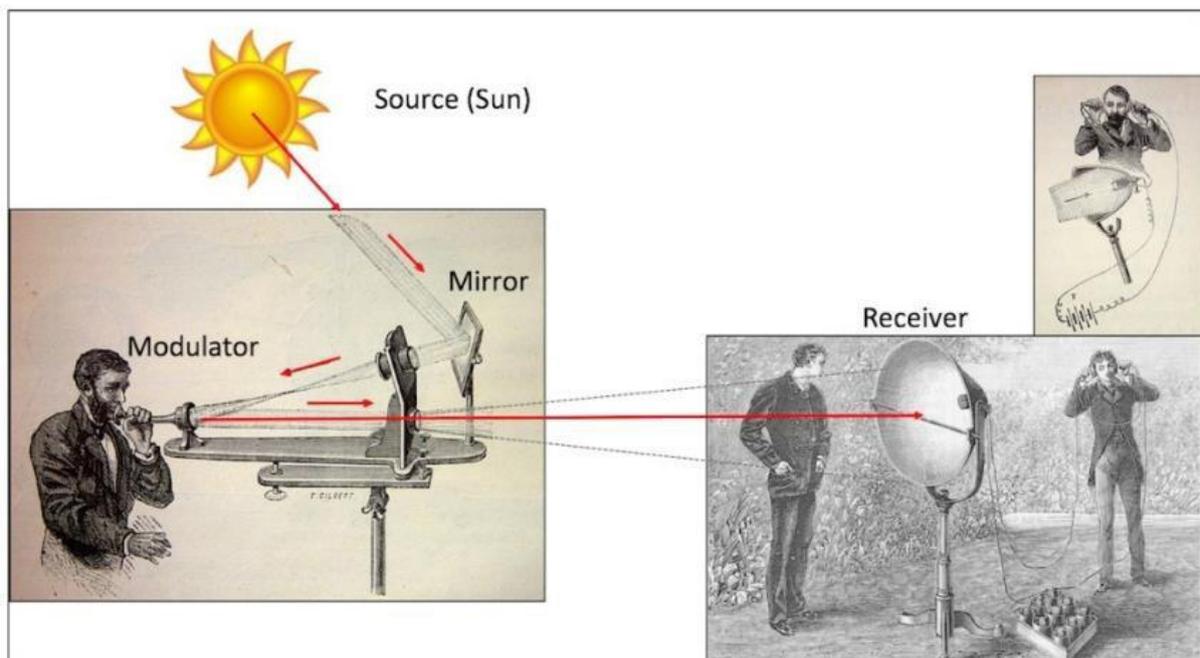


Fig. 1.1. Concept du photophone a été introduit par A. G. Bell. La lumière du soleil est réfléchié sur un modulateur, dont la sortie est transmise via un canal sans fil et reçue par un photo-collecteur Rx [25].

Le prix Nobel 2014 a été décerné à trois scientifiques, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki et Shuji Nakamura, pour leur invention de LED bleues efficaces dans les années 1980 et 1990. L'invention des LED bleues ne permet pas seulement de produire des sources de lumière blanche brillantes et économes en énergie, mais ouvre également la voie à l'idée d'utiliser les LED pour la transmission de données.

En 2009, l'Université d'Oxford a démontré avec succès une liaison de transmission VLC de 100 Mbps utilisant la modulation on-off keying (OOK) [26]. Parallèlement, la VLC utilisant la modulation par multiplexage orthogonal en fréquence (OFDM) a également attiré l'attention. En 2006, J. Armstrong et al ont inventé une modulation OFDM optique à faible consommation énergétique qui a ensuite été prise en compte pour les systèmes VLC et à fibre optique [27]. En 2008, le projet OMEGA (Home Gigabit Access Network) [28-30] a été mis en place en Europe, et visait à atteindre des débits de données de l'ordre du gigabit pour les utilisateurs domestiques, qui utilisent à la fois la VLC et les communications RF. En 2010, le projet OMEGA a démontré avec succès une liaison de transmission VLC de 513 Mbps utilisant la modulation OFDM [31].

En 2011, le terme "LiFi" a été introduit pour la première fois par le professeur Harald Haas, lors d'une conférence TED Global et a attiré l'attention du public et de l'industrie du sans-fil [32]. La même année, la norme IEEE 802.15.7 a été formalisée et a défini les mécanismes des couches physiques (PHY) et de couche d'accès au support (MAC) pour les systèmes sans fil optiques à courte portée [33]. Ces dernières années, l'utilisation de techniques de multiplexage, telles que le MIMO et le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM), pour augmenter le débit de données de transmission s'est révélée très prometteuse.

En 2013, l'Université d'Oxford a fait la démonstration d'un système VLC à 1 Gbps grâce à l'utilisation de MIMO [34].

En 2015, l'université de Fudan a démontré avec succès une transmission VLC à 8 Gbps en utilisant le WDM avec des LED RGBY [35].

En 2016, l'Université d'Oxford a encore augmenté ce débit de transmission à 10 Gbps en utilisant WDM et OFDM [36]. En 2019, l'Université d'Édimbourg a porté ce débit à 15,73 Gbps en utilisant des LED disponibles sur le marché [37]. La même année, l'université de Fudan a réussi à établir une liaison de transmission VLC sous-marine de 15 Gbps à l'aide de LED RGBYC et de WDM [38]. Avec diverses nouvelles technologies encore en cours de

développement, la communauté des chercheurs VLC vise à améliorer le débit de transmission à Tbps en utilisant des lasers sans danger pour les yeux [39-41].

Les étapes de développement de la technologie VLC sont récapitulées dans la figure 1.2.

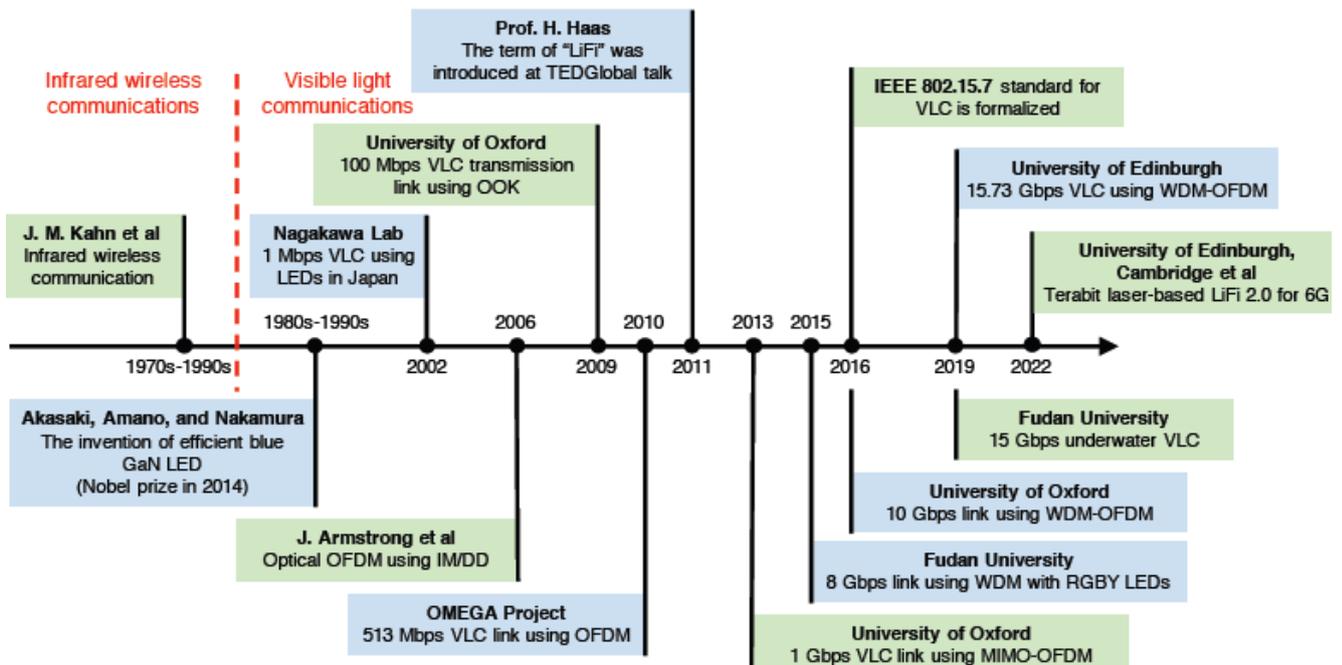


Fig. 1.2. Quelques grandes étapes de la recherche sur la VLC [42].

1.3 Principe de fonctionnement

Sachant que les LEDs sont des semi-conducteurs, elles sont capables de s'allumer et de s'éteindre avec des temps de l'ordre de nanoseconde. Des signaux clignotants lumineux et sombres à grande vitesse émis par une lampe fluorescente, ou les LED blanche sont utilisés pour transmettre des informations en créant une fréquence [43].

Si une LED est éteinte, elle envoie un bit 0, et si elle est allumée, elle envoie un bit 1, voire la fig1.3.

Les caractéristiques les plus importantes qui permettent aux LED de soutenir la communication, c'est leur capacité de passer à différentes intensités lumineuses avec une vitesse rapide qui est imperceptible par l'œil humain [5]. L'efficacité de conversion électrique-optique élevée, une longue durée de vie, un faible coût et une vitesse de fonctionnement élevée [44-47].

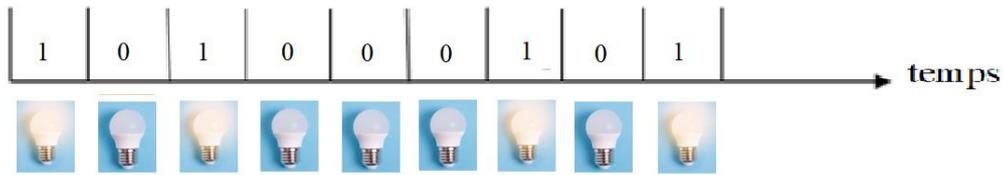


Fig. 1.3.Principe de fonctionnement de la LED.

1.4 Avantages et inconvénients

Avantages

Comme toutes autres techniques de communication, la communication VLC sans fil présente de nombreux avantages intéressants, notamment :

- **Bande passante élevée**

VLC tire pleinement parti de l'utilisation du spectre de la lumière visible qui est compris entre 384 et 789 THz, ce qui ajoute 400 THz à la bande passante disponible pour les communications sans fil.

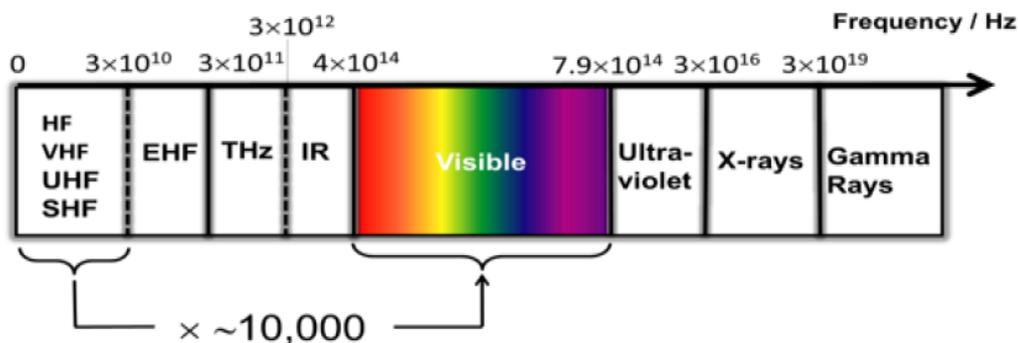


Fig 1.4. Distribution du spectre électromagnétique et spectre visible [25].

- **Sécurité sanitaire**

L'utilisation de la lumière visible en tant que support pour les données permet à VLC d'être totalement sûr pour la santé humaine. Les ondes électromagnétiques RF sont actuellement classées parmi les causes possibles de cancer chez l'homme selon l'Organisation mondiale de la santé [48].

La sécurité pour corps humain peut être l'un des atouts majeurs de VLC à être en sécurité pour la santé humaine.

- **Technologie sans restriction**

Il ne comporte aucun risque d'interférence électromagnétique, la VLC est adapté aux systèmes de communication dans des milieux restreints ou à IEM (immunité aux interférences), tels que les avions, les hôpitaux et les zones industrielle, . . . etc.

- **Sécurité de l'information**

La sécurité est une préoccupation majeure pour les communications radiofréquence, puisque les ondes radio peuvent pénétrer à travers les parois et engendrer ses pertes d'informations. Comme la lumière ne peut pas traverser les obstacles et les objets opaques, VLC peut être limité à des espaces intérieurs fermés pour assurer des liaisons de communication plus sécurisées contre les écoutes indiscrete.

- **Implémentation à faible coût**

- 1- VLC utilise la lumière visible pour la communication, qui se trouve dans une région sans licence du spectre électromagnétique. Depuis aucun frais pour une licence est implicite, le coût de mise en œuvre est considérablement réduit.
- 2- La nature omniprésente de la lumière aide la VLC de réduire le cout de la mise en œuvre de certain systèmes.
- 3- La complexité réduit : VLC utilise des émetteurs à LED et des récepteurs à photodiode, composants qui sont un peu coûteux [49].

limitations/inconvénients

Bien que cette technologie présente tous ces avantages, elle a aussi des limites/inconvénients. Les systèmes de communication optique ont des liaisons directes (LoS) qui maximisent l'efficacité énergétique et minimisent la distorsion par trajets multiples. Dans certains cas, la condition de LoS obligatoire peut être considérée en tant qu'avantage. Cependant, il existe d'autres cas où il est considéré comme un inconvénient majeur, comme si un objet interposé entre l'émetteur et le récepteur peut bloquer la communication, sauf si un autre itinéraire est disponible. La susceptibilité aux interférences est un autre inconvénient, où la VLC est susceptible d'être affecté par certains dispositifs d'éclairage tels que les sources de lumière incandescente ou fluorescente et la lumière du soleil. En outre, la portée de la transmission est également limitée.

1.5 Domaine d'application de la VLC

Les caractéristiques susmentionnées permettent une variété d'applications intérieures et extérieures du VLC. L'application la plus intéressante est l'accès à l'internet à haut débit en intérieur pour les ordinateurs et les téléphones intelligents. Généralement, les utilisateurs passent 80% de leur temps aux maisons et ou bureaux pour étudier, travailler, etc. Il serait tout simplement plus pratique d'accéder à l'internet à l'aide des lampes à LED installées au plafond, et 20% du temps dans des environnements extérieurs [50].

En raison des avantages de cette technologie, plusieurs applications sont réalisées dans divers domaines.

- **La transmission de données (LIFI)**

Li-Fi (light Fidelity) est l'une des applications les plus importantes de VLC, créée en 2011 par Harald Haas. Il transmet des données à l'aide de LED, qui se sont répandues dans les systèmes d'éclairage, de nos jours. Par conséquent, les systèmes d'éclairage offrent une infrastructure appropriée pour les systèmes Li-Fi [32]. Grâce à la capacité de commutation rapide des LED et au large spectre de la lumière visible, la transmission d'un grand nombre de données est possible à grande vitesse. Le Li-Fi est encore une technologie émergente adaptée aux courtes portées. Voir la figure 1.5.

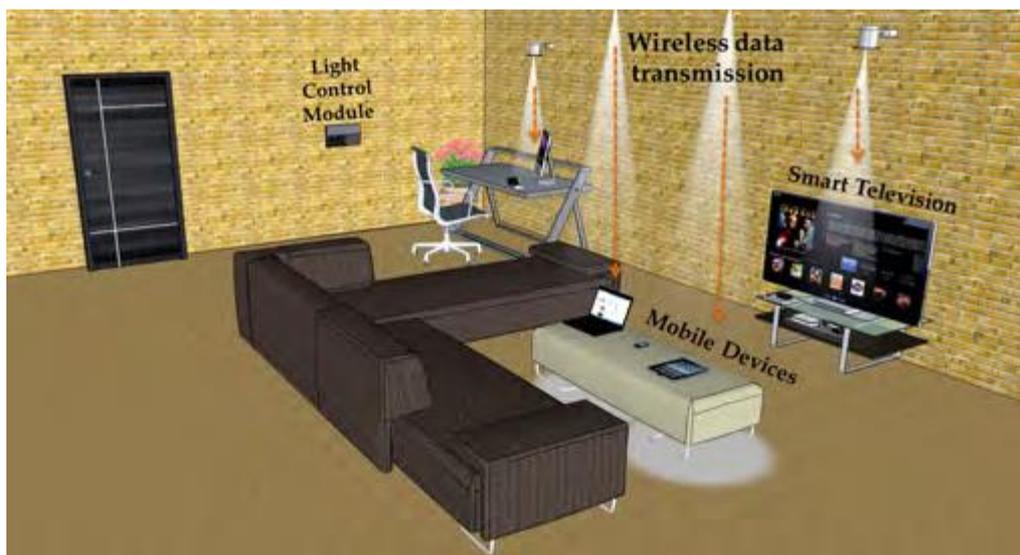


Fig 1.5. Système d'éclairage intelligent compatible avec VLC [51].

- **La Création des lieux intelligents**

La VLC pourrait potentiellement être utilisé pour développer des lieux intelligents, en prenant les musées comme exemple où des informations géo-localisées sont fournies. Les informations exposées peuvent être fournies aux Smartphones ou aux tablettes des utilisateurs à l'aide de l'éclairage intérieur (fig.16) [52].

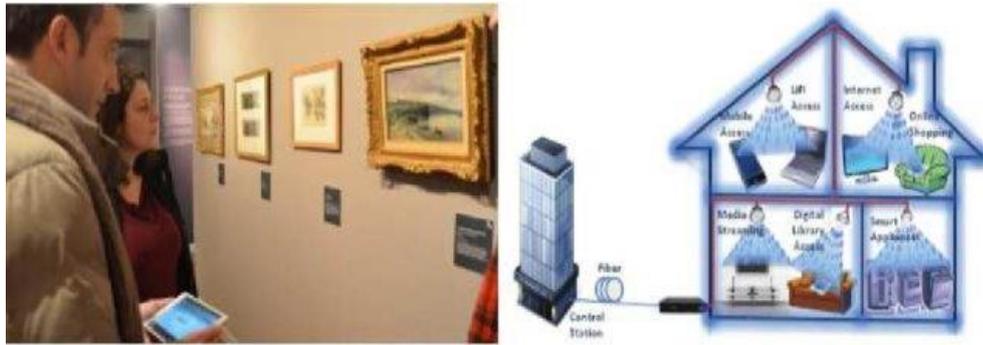


Fig 1.6. Déploiement de VLC dans les maisons intelligentes et dans les musées [43].

- **Les Systèmes de Transport Intelligent**

Dans la vie moderne, les véhicules sont devenus un atout vital pour l'homme. Outre des services de transport fiables et de qualité, les êtres humains souhaitent davantage de fonctions ad hoc.

Les fonctions les plus cruciales sont en matière de communication et de sécurité. Il s'agit notamment de l'accès à l'internet dans le véhicule, l'alerte de collision avant, les feux de freinage d'urgence, l'avertisseur de changement de voie, l'avertisseur de perte de contrôle, l'aide au déplacement en intersection, et l'avertissement de ne pas dépasser [5, 53].

On prévoit que d'ici 2025, 90 % des véhicules vendus auront la capacité de communiquer entre eux et avec l'infrastructure [54]. Compte tenu de ces exigences et de cette évolution, les véhicules généreront des débits de données plus élevés grâce au nombre de capteurs dont ils sont équipés.

Les technologies RF ne seront pas à la hauteur en raison des obstacles actuels.

Une large bande passante et une faible latence sont nécessaires pour assurer une accessibilité fiable. La technologie VLC à haut débit peut être facilement adaptée en raison de l'omniprésence des feux de signalisation des véhicules et de l'infrastructure des feux de circulation (fig.1.7).

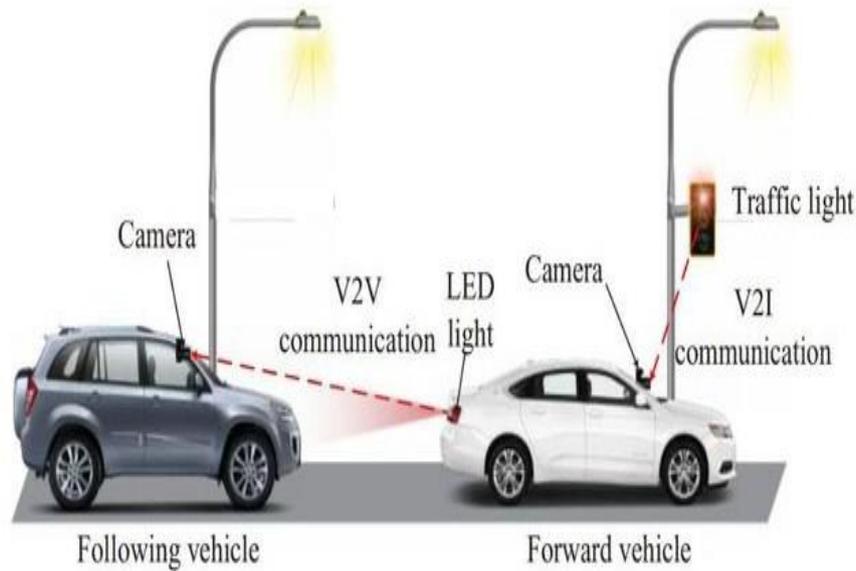


Fig 1.7. Communication de véhicule-véhicule [55].

- **Localisation et positionnement en intérieur**

La technologie du système de positionnement global (GPS) ne fonctionne pas correctement dans les environnements intérieurs, mais un système de positionnement intérieur (IPS) est crucial pour les tunnels, les mines de charbon, les supermarchés, les salles d'exposition et les hôpitaux. La VLC peut être utilisé pour les systèmes de localisation et de navigation en intérieur [56-57].

Les systèmes de positionnement basés sur la VLC sont moins sensibles à la transmission par trajets multiples, et la précision de la localisation est bien meilleure que les systèmes de positionnement intérieur basés sur la RF (Fig 1.8).

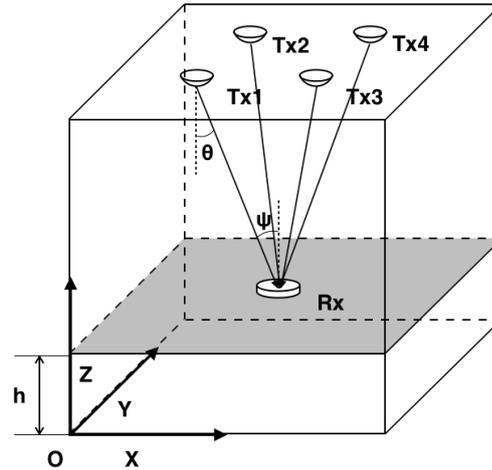


Fig1.8. Prototype d'un système de positionnement intérieur à base de VLC [52].

- **Communications sous-marines**

Les VLC ont une forte capacité de communication sous-marine, notamment pour les communications aquatiques à haut débit, de véhicule à véhicule sous-marin et de véhicule à conducteur [58]. Le signal RF est actuellement utilisé pour les communications sous-marines à longue distance. Cependant, il souffre d'un faible taux de transmission et d'une latence élevée en raison de l'eau salée de l'océan et d'une forte atténuation. Par conséquent, la VLC basé sur la diode laser LD est considéré comme un candidat approprié pour la transmission sous-marine, qui peut surmonter efficacement les limites des micro-ondes ou des ondes sonores [59] (Fig 1.9).

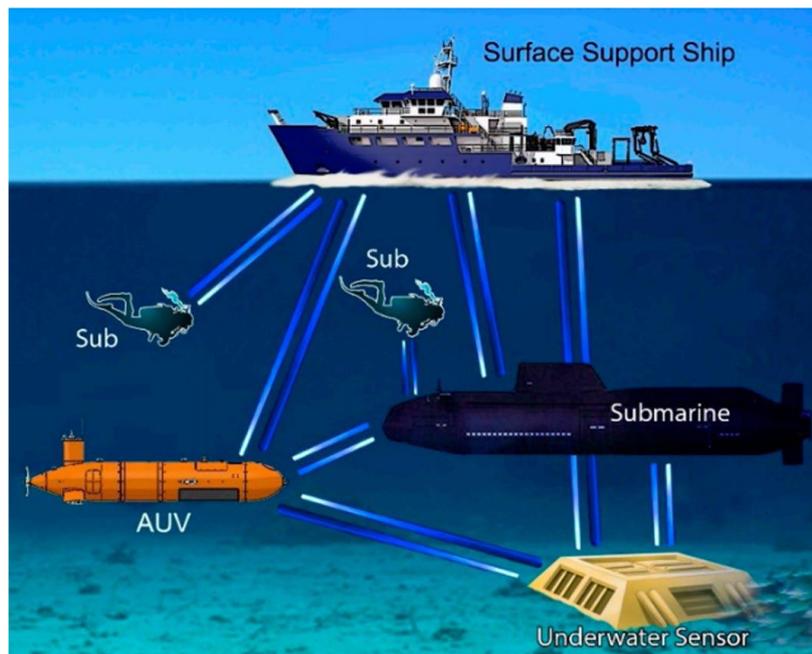


Fig 1.9. Illustration du VLC dans la communication sous-marine [60].

- **Les Zones d'interférences**

En raison de sa nature, la communication par lumière visible (VLC) peut être utilisée en toute sécurité dans des endroits où les communications RF sont restreintes, en raison du risque qu'elles posent [61], où l'utilisation des communications RF est restreinte dans les hôpitaux, les unités de soins de santé et dans les avions [62]. La VLC peut également être utilisée dans des environnements dangereux où il existe un risque d'explosion, notamment dans les usines chimiques, les plates-formes pétrolières ou les mines.

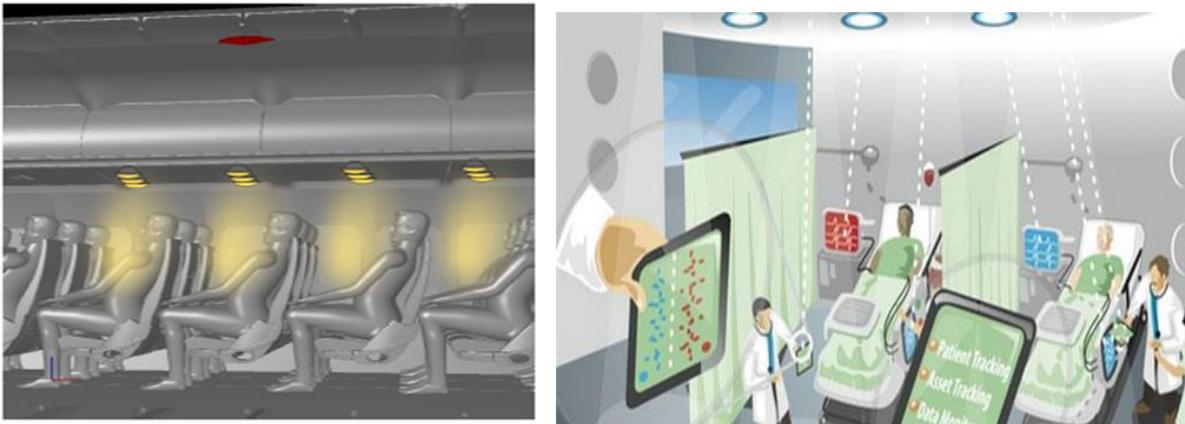


Fig 1.10. Illustration de la communication VLC à bord d'un avion et dans un hôpital [62].

- **Domaine industrielles sans fil**

La tendance en développement dans l'industrie mieux connue sous le nom de « quatrième révolution industrielle » (Industrie 4.0), envisage une augmentation substantielle de l'efficacité opérationnelle, ainsi que le développement de nouveaux produits et modèles commerciaux [63]. Plusieurs initiatives similaires ont également lieu à l'échelle mondiale, telles que «Factories of the Future», «Made in China 2025» et des travaux menés par des institutions telles que l'Institut Fraunhofer et l'Institut national des normes et de la technologie [64]. La quatrième révolution industrielle en est encore à ses débuts. Par conséquent, davantage de recherche et de développement sur la technologie VLC favoriseront son utilisation dans l'industrie. L'intégration des systèmes cyber-physiques (CPS) dans la chaîne de valeur constitue le fondement de l'industrie 4.0 [65], et permettrait l'interconnexion des processus d'approvisionnement, de fabrication, de maintenance, de livraison et de service client via internet. Cela permettra un échange de données en temps réel pour optimiser les processus de

production. L'élément clé pour y parvenir est la disponibilité d'une liaison de communication de données à haut débit, à faible latence et fiable [66].

Les technologies de communication optique sans fil (OWC), y compris VLC, peuvent être déployées dans les applications de l'industrie 4.0, car elles offrent une large bande passante en utilisant le spectre électromagnétique sans licence, faible latence, sécurité inhérente et absence d'interférences induites par RF. Dans [66], les mesures de canal d'un système VLC distribué 8 X 6 à entrées et sorties multiples (MIMO) destiné à être utilisé par des robots dans une cellule de fabrication ont été rapportées. Les résultats indiquent que la disponibilité de la liaison a été atteinte avec un rapport signal/bruit (SNR) suffisant pour la transmission LOS. Cependant, la disponibilité de la liaison a été affectée par le mouvement des bras du robot.

Un système de diversité spatiale a alors été proposé pour résoudre ce problème. Le travail de [67] présente un système VLP pour les services basés sur la localisation dans l'industrie 4.0. Les auteurs ont proposé l'utilisation d'une technique VLP spécifique qui utilise des récepteurs actifs et une infrastructure fixe à faible coût [68]. [69].

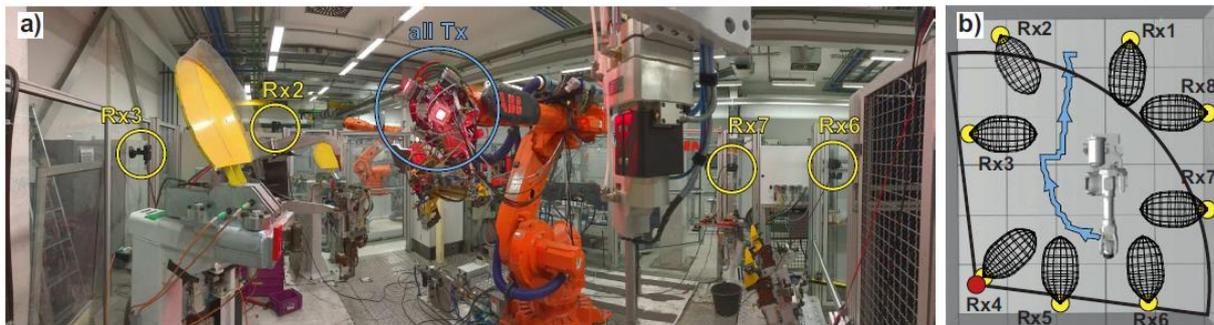


Fig 1.11. (a) Cellule de fabrication utilisée pour les expériences dans l'installation d'essai de robots de BMW ; et (b) la trace du mouvement du bras du robot étudiée dans [66].

1.6 Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi

Li-Fi est un terme technique utilisé pour la communication sans fil à haut débit dans la technologie de communication à lumière visible. Elle tient son nom de sa similitude avec le Wi-Fi, qui utilise seulement l'onde lumineuse au lieu d'ondes radio. La technologie Wi-Fi est adaptée à une large couverture sans fil dans les bâtiments. Tandis que la technologie Li-Fi est idéale dans les milieux restreints pour assurer une couverture de données sans fil à haute densité et minimiser les interférences radio. Donc, ces deux technologies sont

complémentaires. Le Li-Fi comporte plusieurs avantages, notamment la sécurité du système sans fil, la sûreté, la capacité et l'efficacité énergétique. Ils offrent un nombre important d'avantages par rapport au Wi-Fi, cependant il s'agit principalement d'une technologie complémentaire. Les caractéristiques de comparaison entre LIFI et WIFI sont récapitulées dans le tableau 1.1 [70].

Tableau 1.1 : Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi.

Propriétés	Li-Fi (Light Fidelity)	Wi-Fi (Wireless Fidelity)
Standard	IEEE 802.15.xx	IEEE 802.11.xx
Spéctre	Lumière Visible	Radio Fréquence
Interférence	Faible	Elevé
Topologie	Point à point.	Point-à-multipoints.
Bande passante	Non limitée	Limitée
Opérations	Le Li-Fi émet les données à travers la lumière de lampes LED.	Le Wi-Fi émet les données par ondes radio à travers un routeur Wi-Fi.
Densité de données	Fonctionne dans un environnement très dense.	Fonctionne dans un endroit moins dense .
Couverture	Autour de 10 mètres.	Autour de 32 mètres (WLAN 802.11b/11g),
Composants du système	Le pilote de lampe, l'ampoule LED et le photodétecteur.	Nécessite l'installation de routeurs, les appareils des utilisateurs (ordinateurs portables, etc.)
Applications	Hôpitaux, les avions, les musées, les bureaux...	Surfer sur l'internet en utilisant les points d'accès Wi-Fi.
Coût	Bas	Plus élevé
Modulation	ACO/DCO-OFDM	OFDM, Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
Débit de Données	> 10Gbps	< 1Gbps
Consommation d'énergie	Faible	Haut

1.7 Normalisation du VLC

La VLC est une technologie de communication émergente et le processus de normalisation en est encore à ses débuts. De plus, la multiplicité des normes peut être une source de confusion et entraîner des problèmes de compatibilité. Les éléments suivants donnent un aperçu de l'état d'avancement de la normalisation du VLC.

La norme 802.15.7 d'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), achevée en 2011, révisée en 2018 et baptisée "Short-Range Optical Wireless Communications" [71], définit les couches physiques (PHY) et de couche d'accès au support (MAC) pour les communications VLC et les communications avec les caméras optiques. Trois modes différents de fonctionnement point à point sont proposés en fonction du scénario d'application prévu (intérieur ou extérieur), avec des débits de données variables allant de quelques kbps à des dizaines de Mbps. Les schémas de modulation recommandés sont la modulation on-off (OOK), la modulation de position d'impulsion variable (VPPM) et la modulation par décalage de couleur (CSK). En outre, les réglementations en matière de sécurité oculaire sont respectées et des caractéristiques d'éclairage telles que : la prise en charge de la gradation et des techniques d'atténuation du scintillement sont fournies.

D'autres normes établies peuvent être citées, comme la norme ITU-T G.9991, achevée en 2019 par l'Union internationale des télécommunications, qui fournit également des recommandations concernant les couches PHY et MAC, basées sur le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) pour les émetteurs-récepteurs d'intérieur basés sur la technologie VLC [72]. En outre, le groupe de travail IEEE 802.15.13, connu sous le nom de "Multi-Gigabit/s Optical Wireless Communications", travaille à l'obtention de débits de données allant jusqu'à 10 Gbps à des distances allant jusqu'à 200 mètres, en mettant l'accent sur les applications industrielles [73]. Enfin, l'un des processus de normalisation les plus prometteurs, qui devrait faire avancer la mise en œuvre de VLC dans un large éventail de cas d'utilisation est le groupe de travail IEEE 802.11.bb.

Lancé en 2018, ce dernier travaille sur un amendement à la norme IEEE 802.11 (Wi-Fi) bien connue, dans lequel une nouvelle couche PHY sera spécifiée, ainsi que quelques ajustements à la couche MAC déjà existante [74]. Le débit minimum réalisable pour une liaison unique est de 10 Mbps, tandis que le débit maximal visé est de l'ordre du Gbps, avec des techniques de modulation basées sur l'utilisation de l'OFDM.

Remarque : "Li-Fi (Light-Fidelity)" et "VLC" sont deux terminologies souvent employées pour désigner la même technologie. Cependant, elles diffèrent légèrement dans la mesure où

VLC définit tout système utilisant le support lumineux pour transmettre des informations, alors que Li-Fi est un terme inventé par Harald HAAS en 2011 visant à désigner un protocole sans fil entièrement en réseau utilisant la lumière visible [75]. Néanmoins, le terme "VLC" est couramment adopté dans le processus de normalisation et dans la littérature scientifique, comme le montre le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Comparaison des caractéristiques des principales normes LiFi.

Standard	IEEE 802.11bb	IEEE 802.15.13	ITU G.vlc
Cible principale	Grand marché	Industrie, entreprise	Réseau interne
Débit de données maximal (Gbps)	5	10	2
Gamme de longueurs d'onde (nm)	800-1000	190-10,000	190-5000
Multi-utilisateur	Oui	Oui	Oui
Handover	Oui	Oui	Non
Date d'achèvement	2021	juillet 2020	mars 2019
Chipsets	Non	Non	Oui

1.8 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté un peu d'histoire sur la communication par la lumière visible, puis une introduction aux systèmes à base de la technologie VLC. La communication VLC est une nouvelle technologie qui permet de surmonter les limitations de la communication radio fréquence (RF).

Nous avons présentés également le principe de fonctionnement de cette technique ainsi que les avantages, les inconvénients (limitations) et ses différentes applications dans divers domaines. Ensuite, nous avons présenté une étude comparative entre LIFI qui utilise la partie optique des spectres électromagnétique et WIFI qui utilise la partie radio de même spectre. Une initiation à la norme IEEE 802.15.7, la norme du Li-Fi a été mentionnée, qui permet une communication à haut débit allant jusqu'à 96 Mb/s par la modulation rapide des sources optiques lumineuses.

2.9.1.2	Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA).....	55
2.9.1.3	Accès multiple par répartition en code (CDMA).....	55
2.9.1.4	Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA).....	55
2.9.1.5	Accès multiple par répartition spatiale (SDMA)	55
2.9.1.6	Accès multiple par multiplexage en longueur d'onde (WDMA)	56
2.9.2	Schémas à accès multiple non orthogonaux (MIMO basé sur le NOMA).....	56
2.10	MIMO Multi-utilisateurs	57
2.11	Comparaison entre les techniques d'accès dans la VLC	57
2.12	Conclusions	58

2.1 Introduction

L'architecture du système de transmission VLC de bout en bout est représentée sur la figure 2.1. Il se compose de trois parties principales : un émetteur (T_x) qui module la lumière générée par la LED, un récepteur (R_x) basé sur un élément photosensible destiné pour l'extraction du signal modulé par la lumière, et un canal de propagation pour lequel la visibilité directe est obligatoire. Les caractéristiques de ces éléments ont un impact significatif sur le système VLC. Dans ce qui suit, nous expliquons chaque partie individuelle, en soulignant ses composants inhérents et ses fonctions principales [76-77].

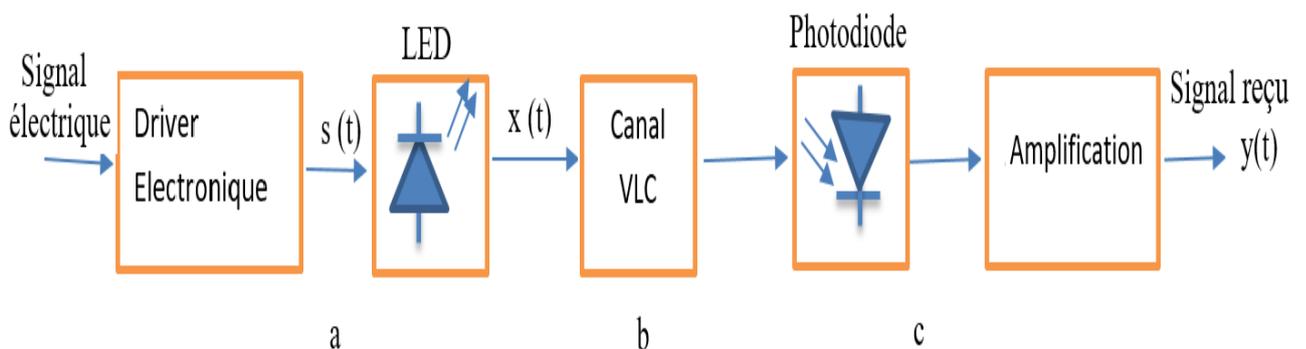


Fig 2.1. Architecture d'un system VLC: a. Emitter; b. Canal; c. Receiver.

2.2 Emetteur VLC

Classiquement, des lampes à incandescence, à vapeur de mercure, aux halogénures métalliques, au sodium haute pression, au sodium basse pression, fluorescentes, fluorescentes compactes et à induction ont été utilisées pour l'éclairage. En comparaison, les LED ont une durée de vie plus longue d'au moins 50 000 heures [78], une efficacité lumineuse supérieure d'environ 100 lumens/watt [79], une large gamme de couleurs, un indice de rendu des couleurs plus élevé et un temps de commutation plus rapide. En plus de l'éclairage, les LED offrent la possibilité supplémentaire d'encoder des données sur les porteurs de lumière à très grande vitesse. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études de recherche ont été menées dans VLC en utilisant des LED visibles comme émetteurs (Tx) et PD (PD à avalanche (APD) et PD positifs-intrinsèques-négatifs (PIN)) comme Rx. [80]. Les applications de VLC peuvent aller des systèmes intérieurs tels que la fidélité à la lumière (Li-Fi), les communications d'appareil à appareil (D2DC) et la localisation aux systèmes extérieurs tels que les communications de voiture à voiture.

2.2.1 Types et structures des LEDs

Il existe différents types des LED qui sont des candidats possibles pour la VLC.

- **LED blanche**

Le type de LED le plus couramment utilisé pour l'éclairage général est la LED blanche, qui se compose d'une puce LED bleue recouverte d'un phosphore jaune qui absorbe une partie des photons bleus et réémet des photons jaunes, comme décrit dans la figure 2.2. Les photons jaunes se combinent aux photons bleus directement émis pour produire de la lumière blanche. Cependant, en raison du temps de relaxation lent du phosphore, la largeur de bande de modulation est limitée à quelques MHz.

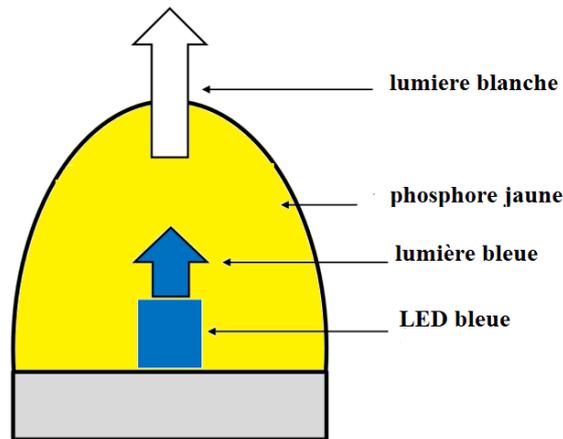


Fig 2.2. Principe d'une LED blanche à base de phosphore.

- **LED rouge-vert-bleu (LED RVB)**

Un autre type de LED utilisé pour l'éclairage intérieur est la LED RVB, qui est composée de trois matrices de LED, ce qui permet une plus grande flexibilité pour le réglage des couleurs. Ces dernières années, les LED RVB ont suscité beaucoup d'intérêt dans le domaine de la VLC : en raison de l'absence de couche de phosphore, ces LED offrent généralement une largeur de bande de modulation d'une dizaine de MHz. Par ailleurs, des liaisons VLC à haut débit ont été établies expérimentalement au moyen de la technique du multiplexage en longueur d'onde (WDM), qui consiste à moduler indépendamment les trois sources LED pour augmenter le débit [81, 82, 83, 84].

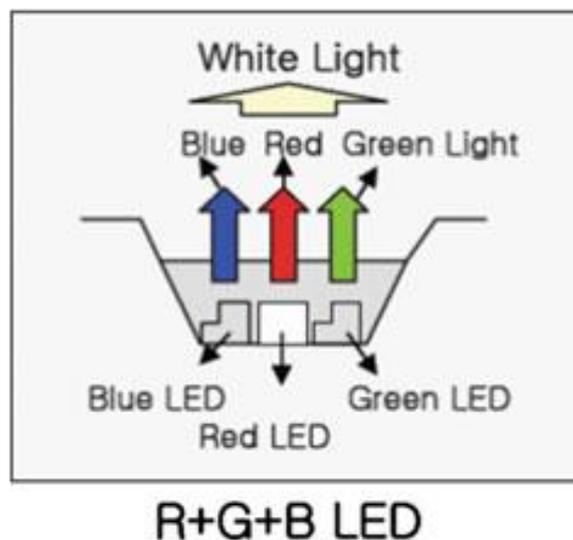


Fig 2.3. Génération de lumière blanche à partir de LED rouge-vert-bleu [85].

- **LED organique (OLED)**

Des travaux de recherche récents ont également étudié le potentiel des OLED pour VLC. Ce type de LED est composé de matériaux organiques et a été conçu à l'origine pour les technologies d'affichage, où elles émettent une lumière blanche d'une manière similaire à celle des LED RVB. L'avantage des OLED est la capacité de mise en œuvre sous la forme d'une unité de grande surface, c'est-à-dire un grand panneau, à un coût extrêmement faible. Ainsi, les luminaires basés sur les OLED peuvent fournir une efficacité énergétique élevée, donc un éclairage suffisant pour répondre aux exigences d'éclairage intérieur. D'autre part, les OLED présentent une faible bande passante de modulation, de l'ordre de plusieurs kHz, en raison de leur capacité de plaque élevée inhérente [86, 87, 88]. Par conséquent, les débits de données obtenus rapportés dans la littérature ne dépassent pas quelques Mbps [89, 90, 91, 92]

- **Diode laser (LD)**

Les LD ont suscité beaucoup d'intérêt récemment pour leur application potentielle dans VLC, car ils présentent une bande passante de modulation plus élevée dans la gamme GHz par rapport aux LED. De plus, la lumière blanche peut être produite de la même manière qu'avec les LED, c'est-à-dire soit en plaçant un film de phosphore jaune devant un LD de lumière bleue, soit en combinant des faisceaux lumineux rouge, vert et bleu produits par trois LD distincts. Bien que des débits de données extrêmement élevés de plusieurs dizaines de Gbps aient été rapportés dans la littérature [93, 94], les LD ne sont pas encore largement utilisés dans VLC en raison de leurs inconvénients par rapport à la fonction concurrente d'éclairage. Un LD émet un faisceau lumineux étroit très intense, ce qui soulève des inquiétudes quant à la sécurité des yeux et à un éclairage homogène. En conséquence, un diffuseur recouvert de phosphore doit être ajouté pour élargir le spectre et faire diverger spatialement une lumière laser bleue, au prix d'une réduction drastique du débit [95, 96]. L'utilisation d'un diffuseur permet d'assouplir la contrainte de puissance de lancement à l'émetteur imposée par les règles de sécurité oculaire, mais elle reste néanmoins inférieure à celle des LED [97]. Il s'ensuit que ces derniers sont mieux adaptés à l'éclairage intérieur et ne peuvent être pleinement exploités que si des composants électroniques à large bande passante, à savoir des amplificateurs et des photodétecteurs sont utilisés, ce qui augmente le coût du système et pourrait compromettre la viabilité d'un produit industriel.

Et comme le débit de données de transmission est généralement considéré comme le critère le plus important pour évaluer les performances d'un système de communication. Au cours des deux dernières décennies, le débit de transmission de données des VLC à base de LED a considérablement augmenté, passant de quelques Mbps seulement à plusieurs dizaines de Gbps. En fonction du type de LED utilisé, un résumé des différents systèmes VLC démontrés à ce jour peut être trouvé dans les tableaux 1 à 4 [98].

Tableau 2.1: Liaisons VLC basées sur des LED blanches à base de phosphore

Année	Emetteur	Récepteur	Modulation	Distance	Débit de données	Réf
2020	LED blanche	PIN	DMT	1 m	3 Gbps	[99]
2018	LED blanche	APD	OOK	1.2 m	2 Mbps	[100]
2015	LED blanche	PIN	OFDM	1.5 m	2 Gbps	[101]
2015	LED blanche	PIN	OFDM	1 m	1.6 Gbps	[102]

Tableau 2.2: Liaisons VLC basées sur des LED multi-puces .

Année	Emetteur	Récepteur	Modulation	Distance	Débit de données	Réf
2019	RGBY LEDs	PIN	OFDM	1.6 m	15.73 Gbps	[37]
2019	RGBY LEDs	PIN	DMT	1.2 m	15.17 Mbps	[38]
2017	RGB LEDs	PIN	OFDM	1 m	3.36 Gbps	[81]

Tableau 2.3: Liaisons VLC à base de LED organique (OLED).

Année	Emetteur	Récepteur	Modulation	Distance	Débit de données	Réf
2020	OLED	APS	OFDM	2 m	1.13 Gbps	[107]
2020	OLED	PIN	OOK	0.05 m	2.2 Mbps	[108]
2015	OLED	Organic-PD	OOK	0.05 m	55 Mbps	[109]

2.2.2 Radiométrie et photométrie

La radiométrie s'intéresse à la mesure du rayonnement optique pour un spectre optique plus large allant de l'UV à l'IR. En revanche, la photométrie consiste à examiner les rayonnements optiques qui ne sont visibles que par l'œil humain, contrairement à la radiométrie qui ne tient pas compte de la sensibilité de l'œil humain. Les paramètres de la photométrie n'examinent et n'évaluent les altérations que pour les différentes longueurs d'onde de la bande de lumière visible [110]. Les paramètres stéréotypés de la radiométrie comprennent le flux de puissance radiante, l'irradiance, l'intensité radiante et la radiance. La VLC est une technologie de communication sans fil qui repose sur la conversion de l'énergie lumineuse en électricité ; il est donc nécessaire de convertir entre les paramètres radiométriques et photométriques. Cette conversion prend en compte la visibilité relative de la lumière pour une longueur d'onde spécifique. La visibilité relative de la lumière est donnée par la courbe de sensibilité oculaire qui est interchangeable avec la courbe d'efficacité lumineuse [111]. Cette courbe représente le rapport entre tous les paramètres photométriques et leurs paramètres radiométriques équivalents. La corrélation entre les paramètres photométriques et radiométriques est donnée par la formule suivante

$$[lx] = [W] \times 683 \left(\frac{lm}{W} \right) \times V(\lambda) \quad (2.1)$$

où V est la fonction de sensibilité spectrale relative à la longueur d'onde λ . Les aspects typiques de la photométrie à comprendre en ce qui concerne les systèmes VLC sont le flux lumineux, l'intensité lumineuse, l'éclairement et la luminance.

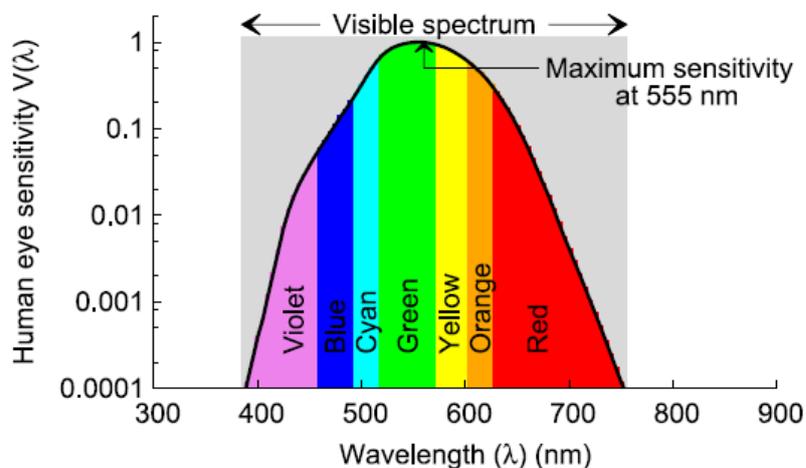


Fig 2.4. Sensibilité de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde du spectre visible [112].

2.3 Récepteurs VLC

Un autre élément important pour la réalisation des systèmes VLC est la photo-détection au niveau du récepteur. La détection de la lumière est généralement obtenue par l'utilisation de photo-détecteurs (PD), également appelés récepteurs sans imagerie. Un PD est un capteur de transducteur optoélectronique quadratique qui détecte et réagit au rayonnement électromagnétique (REM), en particulier la lumière, qui est incident à sa surface. Ils réagissent aux signaux REM incidentes en convertissant les photons lumineux en courant qui est proportionnel au carré du rayonnement reçu. En variante, la photo-détection peut être effectuée par l'utilisation de capteurs d'imagerie également appelés capteurs de caméra. Un capteur d'imagerie est une matrice de plusieurs PDs. De tels capteurs sont présents dans de nombreux appareils mobiles existants, y compris les Smartphones. Les appareils mobiles équipés de capteurs d'imagerie peuvent donc être facilement convertis et utilisés comme récepteurs VLC. La nécessité de cette conversion est motivée par un nombre très élevé de PD qui facilite l'imagerie à haute résolution. Le fait de disposer d'un grand nombre de PD réduit considérablement la vitesse à laquelle les images sont capturées par le capteur.

Cette réduction conduit par conséquent à l'allocation de débits de données limités, de l'ordre de quelques kbps seulement pour les signaux VLC, en raison des faibles taux d'échantillonnage du capteur. Contrairement aux capteurs d'imagerie, les capteurs détachés sans imagerie sont capables d'offrir des débits de données plus élevés, de l'ordre de plusieurs centaines de Mbps.

Pour cette étude, nous ne couvrirons que la théorie des PD en tant que récepteurs VLC.

Dans un canal de communication optique, la PD doit répondre à des exigences de performance précises et sans compromis, car le signal optique reçu est généralement faible.

Ces exigences de performance comprennent une largeur de bande suffisante pour satisfaire le taux de transfert de données souhaité, un niveau de bruit très faible et une sensibilité très élevée dans la gamme de longueurs d'onde dans laquelle le PD fonctionne. Comme pour les LEDs, les effets des variations de température des PDs doivent être très faibles. La composition du matériau du détecteur détermine les longueurs d'onde opérationnelles auxquelles la PD répond à la lumière.

L'efficacité quantique η_{qe} , qui est définie comme le rapport des paires électron-trou (e-h) produites par la PD aux photons incidents dans un temps déterminé est donné par [113].

$$\eta_{qe} = \frac{\text{électrons sortants}}{\text{photons sortants}} = (1 - R)\xi(1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.2)$$

Où, R est le coefficient de réflexion à l'interface de l'air et du semi-conducteur, ξ est la fraction des paires e-h, α est le coefficient d'absorption et d est la distance entre l'émetteur et le récepteur. Les exigences de compatibilité et de performance les plus critiques pour les détecteurs ont un certain nombre de propriétés dans lesquelles elles sont définies. Premièrement, une grande surface pour permettre un champ de vision de détection (FOV) plus large et une grande ouverture de collecte sont nécessaires. Dans les applications qui nécessitent une grande vitesse, il est plus approprié et préférable d'avoir des réseaux PD qui portent une petite surface. Deuxièmement, la sensibilité et la réactivité du PD à la longueur d'onde souhaitée doivent être élevées. Une autre propriété est que le PD doit avoir un faible bruit qui à son tour produit un SNR élevé. Enfin, la PD doit avoir un temps de réponse rapide, une petite taille, un faible coût et une grande fiabilité. Les caractéristiques de performance pour différents PD sont indiquées dans le tableau 2.1, [111].

Tableau 2.4: Caractéristiques de performance (typiques) pour différents PD.

Paramètre	Silicium		Germanium		InGaAs	
	PIN	APD	PIN	APD	PIN	APD
Efficacité quantique [%]	65-90	77	50-55	55-75	0-70	60-70
Réactivité R[A/W]	0.6	77-130	0.65-0.7	3-28	0.75-0.97	—
Facteur de bruit excessif	—	0.3-0.5	—	0.95-1	—	0.7
Gamme de longueurs d'onde [nm]	400-1100	—	800-1800	—	900-1700	—
Gain	1	150-250	1	5-40	1	3-10
Pic [nm]	900	830	1550	1300	1550	1550
Capacité [pF]	1.2-3	1.3-2	2-5	2-5	0.5-2	0.5

Courant d'obscurité [nA]	1-10	0.1-1	50-500	10-500	1-20	1-5
Tension de polarisation [-V]	45-100	220	6-10	20-35	5	30

2.3.1 Types et structures de PD

Les types de PD les plus couramment utilisés pour les récepteurs optiques sont les PD à avalanche (APD), les PD positifs-intrinsèques-négatifs (PIN) (sans gain interne) et les photoconducteurs. En raison de leurs propriétés, les PD PIN et APD répondent à toutes les exigences susmentionnées, par conséquent, ils sont largement utilisés pour les récepteurs VLC.

- **Photo-détecteur PIN.**

Un PIN PD est composé de deux matériaux semi-conducteurs avec des régions de type p et de type n, qui sont séparées par une région intrinsèque faiblement dopée. Pour qu'il fonctionne, une tension de polarisation inverse suffisamment élevée est appliquée aux bornes du dispositif. Le schéma est illustré à la figure 2.5. Pour convertir un photon incident en un courant électrique, l'énergie du photon incident doit être supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite. À la bande de conduction, l'énergie du photon incident excite l'électron de la bande de valence ; une paire électron-trou est générée pendant cette procédure. Dans des conditions standard, La concentration de la lumière incidente est dirigée vers la région intrinsèque.

Après la séparation des porteurs de charge générés en raison du champ électrique élevé dans la région intrinsèque, les charges s'accumulent à travers la jonction polarisée en inverse. À son tour, ce processus conduit au flux de courant le long de la résistance de charge, comme illustré à la figure 2.5. Il existe un seul flux d'électrons pour chacune des paires de porteurs générées. Les PIN PD ont la capacité de fonctionner à des débits binaires extrêmement élevés supérieurs à 100 Gbps [114, 115].

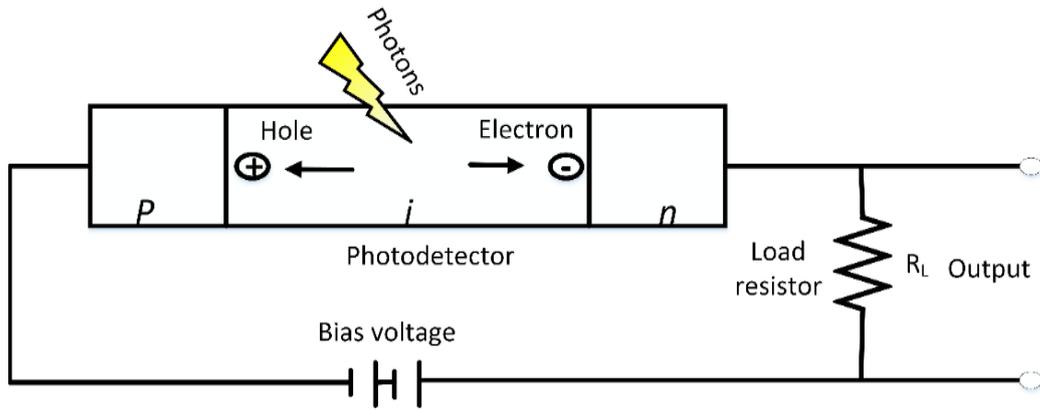


Fig 2.5. Diagramme de la photodiode PIN [116].

- **Photo-détecteur APD**

L'APD diffère du PIN PD en ce sens que l'APD fournit intrinsèquement un gain de courant en utilisant un processus d'ionisation électronique répété. Cela conduit à une sensibilité élevée du dispositif, en raison de la multiplication du photo-courant avant sa rencontre avec le bruit thermique du circuit récepteur. Le facteur de gain de l'APD qui a un effet sur la sensibilité de l'APD est donc donné par la formule suivante :

$$M = \frac{I_T}{I_{ph}} = \frac{I_T hc}{\lambda \eta_{qe} q P_r} = \frac{I_T}{\mathfrak{R} P_r} \quad (2.3)$$

Où I_T : est le photocourant de sortie total dans l'APD

I_{ph} : est le photo-courant primaire

q : est la charge électronique

P_r : est la puissance moyenne incidente du rayonnement optique, par période de temps.

\mathfrak{R} : est la réactivité du PD, qui peut être donnée par :

$$\mathfrak{R} = \frac{\lambda q \eta_{qe}}{hc} = \frac{\lambda \eta_{qe}}{1.24} \quad (2.4)$$

La valeur de sensibilité de l'APD peut être supérieure à l'unité puisque les valeurs de gain standard sont comprises entre 50 et 300. Ce qui signifie que la sensibilité de l'APD est supérieure à celle du PD PIN, car le PD PIN a une valeur de gain de l'unité. Cependant, il

convient de mentionner qu'il existe un bruit de multiplication omniprésent, en ce qui concerne l'APD suite au processus d'ionisation qui est de nature statistique [117]. Sachant que, le processus d'ionisation est très sensible à la température. Dans le cas de l'utilisation d'un APD dans un système VLC, il est conseillé de prendre en considération ces facteurs, car ils sont très importants pour la performance du système.

2.4 Canal optique sans fil en intérieur

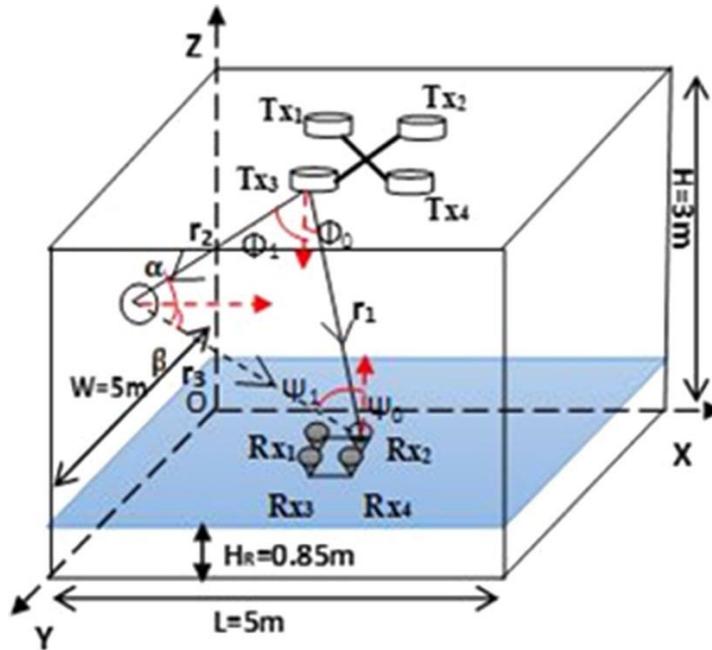


Fig 2.6 : Modèle géométrique MIMO VLC à trajets multiples en intérieur [118].

Généralement, un système OWC intérieur utilise une LED comme source, dont l'intensité lumineuse est modulée par un signal de message, et un PD à grande surface est utilisé pour la réception à l'extrémité de réception. Il est clairement illustré dans la Fig. 2.6, qui comprend à la fois les composantes à visibilité directe (LOS) et celles à visibilité indirecte (NLOS). Pour le scénario NLOS, il est difficile d'anticiper l'affaiblissement du chemin optique, car il dépend d'un certain nombre de facteurs multiples tels que les dimensions de la pièce, les réflexions dues aux parois, au plafond et à plusieurs autres objets dans l'environnement de la pièce. En outre, d'autres paramètres tels que la position et l'orientation d'émetteur et du récepteur, la taille de la fenêtre, l'emplacement et d'autres éléments physiques dans la pièce jouent également un rôle essentiel.

La puissance optique moyenne reçue P_r est généralement exprimée comme suit :

$$P_r = (H_{LOS} + H_{NLOS})P_t \quad (2.5)$$

Où, P_t représente la puissance optique émise

Dans (2.5), H_{LOS} et H_{NLOS} représentent respectivement les gains de canal des environnements LOS et NLOS. De plus, H_{NLOS} peut être exprimé en termes de réflexions pour atteindre [111]

$$P_r = (H_{LOS} + \sum_{reflections} H_{refl})P_t \quad (2.6)$$

où H_{refl} représente le trajet réfléchi.

Il existe plusieurs facteurs dont dépendent les caractéristiques de réflexion des surfaces d'objets dans un environnement de pièce, tels que la longueur d'onde de transmission, l'angle d'incidence θ_i , la surface de matériau, et la rugosité de la surface par rapport à la longueur d'onde. Si une seule source LED est installée avec un seul récepteur Rx placé dans une pièce, où la distribution angulaire de la LED du modèle d'intensité de rayonnement est modélisée à l'aide d'une intensité de rayonnement lambertienne généralisée, et sa distribution peut être exprimée comme

$$R_0(\phi) = \begin{cases} \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi) & \text{for } \phi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\ 0 & \text{for } \phi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.7)$$

D'après (2.7), m est l'ordre d'émission lambertienne, qui manifeste la directivité du faisceau source. La relation entre m et le demi-angle de la LED à mi-puissance $\phi_{1/2}$ est donnée par [111, 112, 119].

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \quad (2.8)$$

Sachant que le demi-angle à demi-puissance $\phi_{1/2}$ est appelé le demi-angle pour lequel la puissance optique est réduite de moitié.

Le détecteur peut être considéré comme une zone active A_r qui collecte le rayonnement incident avec des angles ψ plus petits que ψ_c (FOV) du détecteur.

Par conséquent, la zone de collecte effective du détecteur est définie par

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A_r \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \psi > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.9)$$

L'utilisation d'un détecteur avec une grande surface photo-active permettra de collecter autant d'énergie que souhaité, mais en pratique, cela limite la bande passante disponible en raison de la capacité de jonction accrue.

Un concentrateur non imageur peut être intégré pour augmenter la surface efficace globale. Par conséquent, le gain optique d'un concentrateur idéal non imageur ayant un indice de réfraction interne n est donné par :

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)} & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2.10)$$

Ainsi, pour une liaison OWC avec une source lambertienne, un récepteur avec un filtre passe-bande optique de transmission $T_s(\psi)$ et un concentrateur non imageur de gain $g(\psi)$, le gain DC pour un récepteur situé à une distance D et l'angle ψ par rapport à l'émetteur est donné par l'approximation suivante [120,121]

$$H_{LOS} = \begin{cases} \frac{A_r(m+1)\cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi)}{2\pi D^2} & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.11)$$

Nous essayons ensuite d'obtenir la réponse impulsionnelle du canal des composants NLOS qui peut être exprimée comme une somme infinie :

$$H_{NLOS}(t, S, R_x) = \sum_{k=0}^{\infty} H_{NLOS}^{(k)}(t, S, R_x) \quad (2.12)$$

où, $H_{NLOS}(t, S, R_x)$ est la réponse impulsionnelle due à la lumière subissant exactement k réflexions. Si k plusieurs sources LED sont installées, alors l'équation (2.12) peut être modifié comme suit :

$$H_{NLOS}(t, S, R_x) = \sum_i^k \sum_{k=0}^{\infty} H_{NLOSK}^{(k)}(t, S, R_x) \quad (2.13)$$

Après la $K^{i\text{ème}}$ réflexion, la réponse impulsionnelle $H^{(k)}(t, S, R_x)$ est calculée en mettant l'accent sur un algorithme répétitif tel que donné par [122, 123]

$$H_{NLOS}(t, S, R_x) = \frac{m+1}{2\pi} \sum_{j=1}^k \rho_j \cos^m(\phi_j) \frac{\cos(\Psi)}{d^2} \text{rect}\left(\frac{2\Psi}{\pi}\right) \times H_{NLOS}^{(k-1)}\left(t - \frac{d}{c}, S, R_x\right) \Delta A$$

(2.14)

2.5 Bruit dans les systèmes VLC

Dans les liaisons optiques par lumière visible en intérieures, Il existe trois sources principales de bruit: (1) Bruit de courant d'obscurité qui se produit dans les photodétecteurs même en l'absence de lumière incidente, (2) le bruit de la lumière ambiante dû au rayonnement solaire des fenêtres, des portes, etc. Et le bruit dû à d'autres sources d'éclairage, telles que les lampes à incandescence et fluorescentes et (3) le bruit du préamplificateur électrique (également appelé bruit thermique) du photodétecteur.

2.5.1 Bruit de courant d'obscurité

Il y a toujours une petite quantité de courant à la sortie de la photodiode, même lorsqu'il n'y a pas de lumière incidente. Ce courant est appelé courant d'obscurité et ne contient traditionnellement aucune donnée précieuse. En raison de la polarisation inverse, un petit courant de saturation inverse circule dans le dispositif. L'amplitude du courant dépend notamment de facteurs tels que la température, la tension de polarisation et le type de matériau. En général, l'amplitude du courant d'obscurité est de 100 pA et de 10 pA pour la photodiode Si PIN et la photodiode Si APD, respectivement [116].

2.5.2 Bruit optique ambiant (Shot Noise)

Le bruit optique ambiant est une source de bruit majeure dans une liaison VLC, qui est liée à la nature particulière de la lumière. Lorsque le nombre de photons reçus par le détecteur est suffisamment important, le bruit ambiant peut être modélisé comme un AWGN et sa puissance peut être exprimée comme suit [124] :

$$\delta_{shot}^2 = 2q(P_{r;tx} + P_{r;bg})R_{PD}B, \quad (2.15)$$

où $P_{r;tx}$ désigne la puissance optique reçue à partir des émetteurs, $P_{r;bg}$ désigne la puissance reçue de la lumière ambiante, et B est la largeur de bande de bruit qui est déterminée par la largeur de bande de modulation du signal, ou la largeur de bande du récepteur qui a été utilisée.

2.5.3 Bruit Thermique

En général, tous les dispositifs électroniques (actifs ou passifs) ont une résistance de charge R_L . Par conséquent, la fluctuation thermique des électrons avec un mouvement aléatoire produit de l'énergie thermique, même lorsqu'aucune puissance ou tension optique n'est appliquée au photodétecteur. Cette source de bruit est également appelée bruit de Jonson. De plus, il s'agit d'un bruit blanc et sa distribution est gaussienne de moyenne nulle et sa variance peut être définie comme [125] :

$$\sigma_{th}^2 = \frac{8 \kappa T_e}{G_{oL}} C_{pd} A I_2 B^2 + \frac{16 \pi^2 \kappa T_e \Gamma}{g_m} C_{pd}^2 A^2 I_3 B^3 \quad (2.16)$$

où B est la bande passante du filtre électrique, g_m est la transconductance FET, κ est la constante de Boltzmann, C_{pd} est la capacité fixe du photodétecteur par unité de surface, T_e est la température absolue, G_{oL} est le gain de tension en boucle ouverte, Γ est le Facteur de bruit du canal FET, A est la surface du photo-détecteur et $I_2 = 0,562$ et $I_3 = 0,0868$ sont les facteurs de bande passante du bruit [126].

2.6 Techniques de modulation numérique

Les modulations RF conventionnelles ne peuvent pas s'appliquer à la VLC, et seule la variation de l'intensité de la lumière peut être codée dans les systèmes VLC incohérents. La méthode de modulation la plus courante est la modulation d'intensité et la détection directe (IM/DD). Par conséquent, La VLC peut être implémenté comme un système IM/DD, qui exige un signal de modulation à valeur réelle et unipolaire non négatif.

L'intensité lumineuse peut être codée en tant que signal en bande de base. Par conséquent, les schémas de modulation typiques tels que l'OOK, la modulation d'amplitude d'impulsion (PAM), la modulation de position d'impulsion (PPM) et la modulation de largeur d'impulsion (PWM) sont également applicables dans les VLC [80]. La modulation OOK est une solution simple à la non-linéarité du processus de transmission. Cependant, une fréquence plus élevée de commutation de la LED est requise pour fournir un débit de données plus élevé, ce qui implique une exigence élevée en termes de bande passante. Par conséquent, il convient également d'étudier les techniques qui ont une plus grande efficacité spectrale, qui permettent d'utiliser un plus grand nombre de bits par canal [127].

L'une des techniques multi-porteuses est l'OFDM. Les données sont envoyées et divisées en sous-porteuses orthogonales. Ceci permet d'économiser la bande passante et d'obtenir une plus grande efficacité spectrale. Cependant, le signal OFDM brut est bipolaire et contient généralement des nombres complexes, ce qui doit être évité dans l'IM/DD. Certains schémas ont été mis au point, par exemple l'OFDM optique à polarisation DC (DCO-OFDM), l'OFDM optique à écrêtage asymétrique (ACO-OFDM), pour s'adapter à l'IM/DD. Les modulations offrent également des efficacités spectrales différentes [128].

2.6.1 Techniques de modulation mono-porteuse

Les techniques de modulation mono-porteuse utilisent des niveaux d'intensité discrets pour représenter les symboles d'information. Les techniques largement utilisées pour les systèmes optiques sans fil IM/DD comprennent les suivantes.

- **Modulation OOK**

OOK est le schéma pulsé le plus connu et le plus simple pour IM/DD dans la communication optique VLC, puisqu'il offre un bon compromis entre la performance du système et la complexité de la mise en œuvre. Comme il s'agit d'un schéma de modulation binaire, OOK ne transmet qu'un bit par intervalle de symbole, il offre donc une efficacité spectrale limitée. L'implémentation d'OOK est relativement facile, c'est-à-dire que lorsque la LED est allumée, le bit de données est 1, et lorsque la LED est éteinte, le bit de données est 0.

En règle générale, OOK est mis en œuvre en utilisant le format d'impulsion de retour à zéro (RZ), dans lequel une impulsion optique est transmise pendant une fraction d'intervalle de symbole. Cependant, OOK peut également être conçu avec un format d'impulsion de non-retour à zéro (NRZ), en transmettant l'impulsion optique pendant toute la durée du symbole T.

La modulation RZ-OOK offre une efficacité énergétique améliorée par rapport à NRZ-OOK, mais au prix d'une exigence de bande passante accrue.

La figure 2.7 illustre un signal optique NRZ-OOK. P_{on}^{OOK} et P_{off}^{OOK} désignent respectivement le niveau d'intensité de puissance élevée et faible émis par la source optique [129].

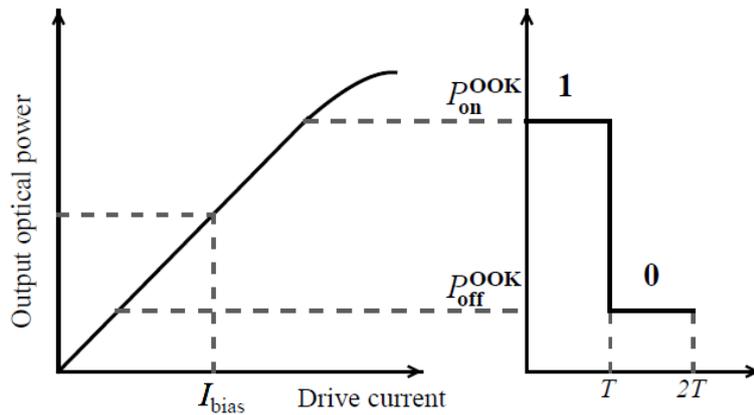


Fig 2.7. Signal optique NRZ-OOK.

- **Modulation d'amplitude d'impulsion (PAM)**

Il s'agit d'une modulation à plusieurs niveaux qui permet d'augmenter l'efficacité spectrale. Dans la modulation M -PAM, où $M=2^m$ niveaux d'intensité sont utilisés pour représenter m bits. Par conséquent, l'efficacité spectrale peut être améliorée de m fois par rapport à l'OOK-NRZ. Le 8-PAM et le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM), associés au codage de Manchester déphasé et aux égalisations hybrides dans le domaine temporel et fréquentiel, ont été utilisés pour transmettre des données à des débits de 3,375 et 4,05 Gb/s dans [130, 131], respectivement.

Un signal optique modulé à 4-PAM est représenté sur la figure 2.8, En transmettant $\log_2(L)$ bits/symbole contre 1 bit/symbole en OOK, donc la modulation PAM offre une efficacité de bande passante plus élevée par rapport à OOK.

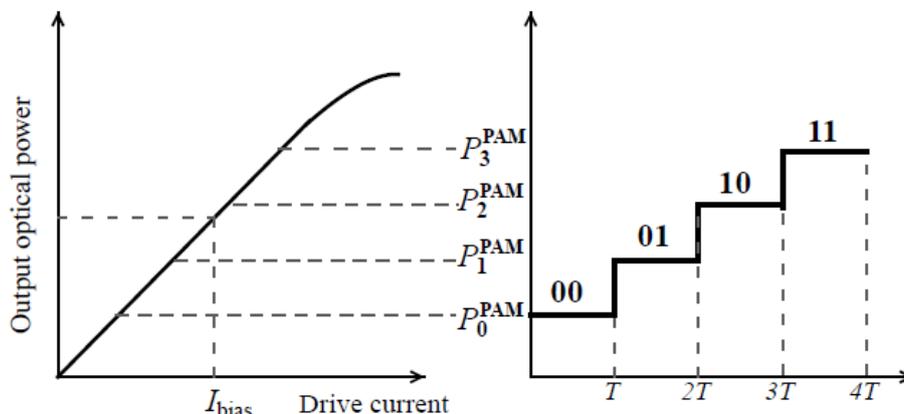


Fig 2.8. Signal optique 4-PAM.

- **Modulation de position d'impulsions (PPM)**

Dans un PPM, la durée du symbole est divisée en L sous-intervalles/tranches de temps (slots), chacun ayant une durée $T_C = T/L$. Les informations sont transmises en faisant varier la position (décalage temporel) de l'impulsion optique dans chaque durée de symbole. Un intervalle de temps remplie a un niveau d'intensité (amplitude d'impulsion) de P_{on}^{PPM} , tandis que les intervalles vides restantes ($L - 1$) ont un faible niveau d'intensité P_{off}^{PPM} . Un schéma PPM L -aire a une taille de constellation de signal de L . La constellation transmise (symbole) est identifiée par la position d'impulsion, et $\log_2(L)$ bits sont mappés à chacune des L constellations. La figure 2.9 illustre un signal optique 2-PPM. Lorsque L augmente, l'efficacité énergétique et les performances d'erreur de la modulation L -PPM s'améliorent. La puissance requise moyenne pour PPM est inférieure à OOK et PAM. Cependant, PPM a un intervalle d'impulsion plus court, ce qui implique une exigence de bande passante plus élevée. En tant que tel, PPM est moins efficace en bande passante que PAM. Différentes variantes de PPM ont été proposées afin d'améliorer l'efficacité spectrale. Par exemple, Overlapping PPM (OPPM) et Multipulse PPM (MPPM) utilisent une durée d'impulsion plus longue que le PPM conventionnel [129].

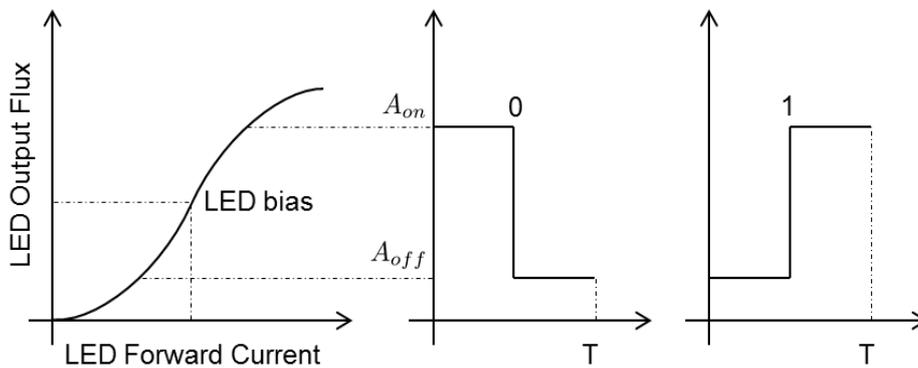


Fig 2.9. Signal optique 2-PPM.

2.6.2 Modulation multi-porteuse

Les systèmes de modulation multi-porteuse divisent les données à transmettre en plusieurs canaux de fréquence. Chaque porteuse individuelle peut avoir une bande passante plus étroite, ce qui présente des avantages pour les systèmes de modulation à grande vitesse. En effet, lorsqu'on essaie d'augmenter l'efficacité spectrale, les systèmes de modulation mono-

porteuse tels que OOK, PPM et PAM souffrent d'une distorsion non linéaire du signal au niveau de la LED et d'interférences inter-symboles, dues à la réponse de fréquence non linéaire des canaux de communication à lumière visible [132]. Par conséquent, l'une des solutions pour atteindre des communications optiques sans fil (OWC) à haut débit consiste à utiliser des modulations multi-porteuses. Elles sont moins efficaces sur le plan énergétique, mais beaucoup plus efficaces sur le plan de la largeur de bande. Dans les communications RF, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) a été largement adopté, en raison de son efficacité dans la lutte contre les interférences inter-symboles et l'évanouissement par trajets multiples [133]. Dans cette modulation, les données sont séparées et modulées en plusieurs sous-porteuses orthogonales envoyées dans des sous-flux parallèles. L'OFDM pour VLC peut atteindre une efficacité spectrale beaucoup plus élevée que l'OOK, le PPM ou le PAM en réduisant les interférences inter-symboles.

2.6.2.1 OFDM Optique

L'OFDM conventionnel utilisé dans les systèmes RF traditionnels ne peut pas être utilisé directement dans la VLC, en raison de la nature non cohérente des LED. Cette nature non cohérente des LED permet à la VLC de s'appuyer sur la modulation d'intensité (IM) à l'extrémité de la transmission. Pour la démodulation du signal reçu, un PD est utilisé pour la détection de la lumière, ce type de détection est appelé détection directe (DD). Il est évident que dans le cas de la communication RF, le signal complexe en bande de base module l'amplitude et la phase du signal porteur. Mais le scénario des systèmes IM/DD est entièrement différent, puisque le signal en bande de base module l'intensité du signal porteur plutôt que l'amplitude ou la phase. La principale condition préalable est qu'au lieu d'un signal bipolaire complexe, la transmission du signal dans le domaine temporel doit être à la fois réelle et unipolaire, conformément aux exigences des systèmes IM/DD. Pour obtenir un signal réel, il est essentiel d'avoir une compréhension claire de la DMT. Il est largement admis que la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) et la transformée de Fourier rapide (FFT) sont exploitées pour permettre la modulation et la démodulation dans l'OFDM. Plus précisément, pour faciliter la transmission des données entre les domaines fréquentiel et temporel, ces modules de transformation jouent un rôle important. La tâche principale du DMT est d'allouer les informations à l'entrée de l'IFFT de manière à produire les données réelles à sa sortie. Par conséquent, l'entrée de l'IFFT est contrainte de satisfaire aux critères de symétrie hermitienne.

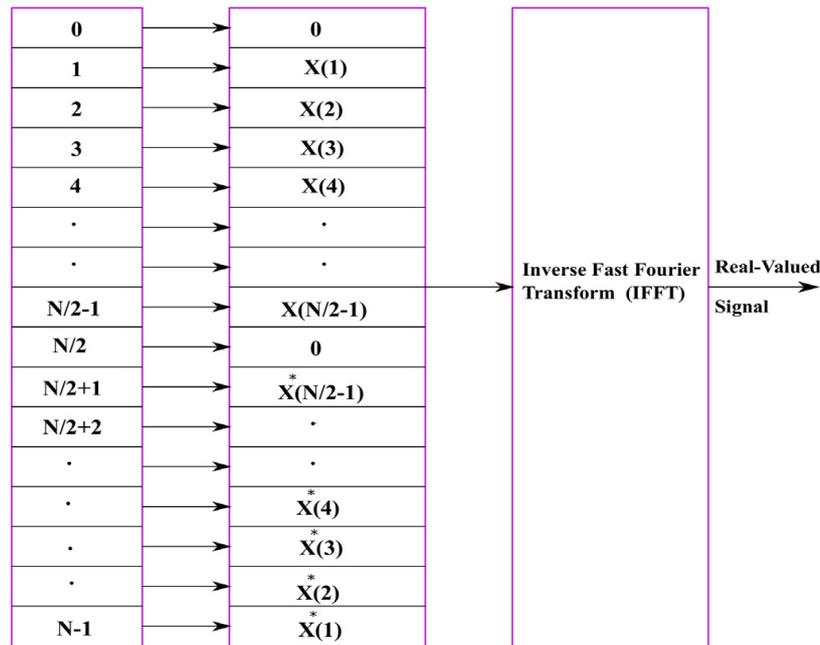


Fig. 2.10. Symétrie hermitienne imposée IFFT [134].

Le principe de base de la mise en œuvre de la DMT est illustré à la figure 2.10. Ici, les signaux mappés sont divisés en N sous-porteuses dont la première moitié, de l'entrée 1 à l'entrée $N/2-1$ de l'IFFT, porte les informations utiles (données). Il convient de noter que la première et $N/2$ sous-porteuses sont forcés à zéro afin de s'assurer qu'il n'y a pas de signal à valeur complexe à la sortie de l'IFFT.

$$X[0] = X\left[\frac{N}{2}\right] = 0 \quad (2.17)$$

Puis, en suivant la règle de la symétrie hermitienne

$$X[N - K] = X^*[K], K = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.18)$$

(2.18) implique que la seconde moitié des entrées disponibles portent la version conjuguée complexe retournée de la première moitié. En outre, on peut en déduire que seule la moitié des entrées de l'IFFT transporte l'information souhaitée, ce qui permet d'obtenir un signal à valeur réelle, mais au prix d'une réduction de l'efficacité spectrale. On peut donc affirmer que la DMT nous permet de travailler avec des signaux OFDM optiques à valeur réelle, ce qui est une condition préalable à la mise en place de systèmes IM/DD rentables.

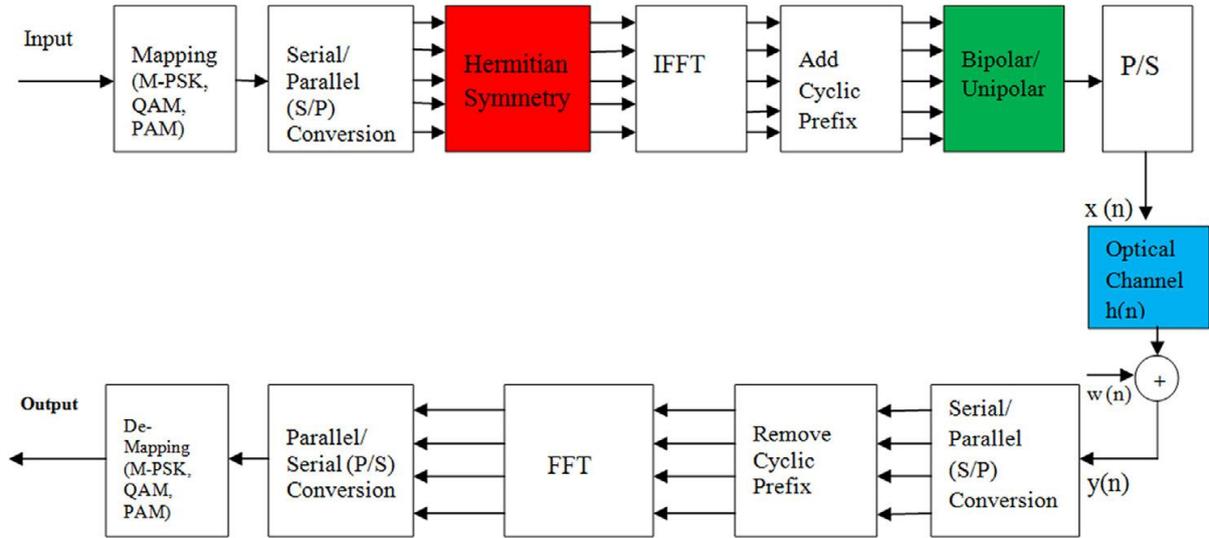


Fig 2.11. OFDM optique pour la communication par lumière visible [134].

La figure 2.11 montre clairement que, du côté de l'émetteur, l'énorme flux de données entrant est d'abord mappé en utilisant différents ordres de schémas de modulation, tels que la modulation par déplacement de phase M-aire (M-PSK), la modulation d'amplitude d'impulsion M-aire (M-PAM) et la modulation d'amplitude en quadrature M-aire (M-QAM), où M représente l'ordre de la constellation. Ensuite, ces données sérialisées sont transmises en parallèle à l'aide d'un convertisseur série-parallèle (S/P) et sont désignées par X [k]. X [k] ne peut pas être directement chargée dans le module IFFT. X [k] est donc contraint de satisfaire aux critères de symétrie hermitienne. La sortie de l'IFFT peut être exprimée comme suit

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (2.19)$$

(2.19) peut être résolu pour obtenir

$$X[n] = \frac{1}{N} \left[X[0] e^{\frac{j2\pi n(0)}{N}} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} X[k] e^{\frac{j2\pi nk}{N}} + X\left[\frac{N}{2}\right] e^{\frac{j2\pi n(\frac{N}{2})}{N}} + \sum_{k=\frac{N}{2}+1}^{N-1} X[k] e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \right] \quad (2.20)$$

Après résolution, [135]

$$x[n] = \frac{1}{N} \left[\sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} 2X_{\text{reel}}[k] \cos\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) - \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} 2X_{\text{imag}}[k] \sin\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) \right] \quad (2.21)$$

D'après (2.21), il est évident qu'un signal à valeur réelle dans le domaine temporel est transmis, mais sa positivité ne peut être garantie. Plus précisément, ce signal est toujours de nature bipolaire et contient à la fois des signaux positifs et négatifs. Par conséquent, afin de rendre ce signal bipolaire en unipolaire, plusieurs techniques ont été proposées dans la littérature les plus importants sont l'OFDM optique à polarisation DC (DCO-OFDM), et l'OFDM optique à écrêtage asymétrique (ACO-OFDM).

- **OFDM optique à polarisation par courant continu (DCO-OFDM)**

Le DCO-OFDM est l'une des approches rudimentaires et préliminaires permettant d'obtenir un signal unipolaire compatible avec les systèmes IM/DD.

Cette méthode consiste à ajouter une polarisation en courant continu (CC) au signal bipolaire, afin de le convertir en un signal unipolaire. Dans le but d'assurer la certitude du signal positif, la quantité de polarisation CC à ajouter est proportionnelle à la valeur absolue de l'amplitude négative maximale du signal OFDM bipolaire. Il est bien connu qu'en raison de l'incorporation de plusieurs porteuses orthogonales, l'OFDM est sujet à un rapport élevé entre la puissance de crête et la puissance moyenne (PAPR). Cela augmente le niveau de biais à ajouter pour confirmer la positivité des signaux. La meilleure approche pour contourner le surplus de polarisation continue à ajouter et en même temps pour obtenir une réduction de la puissance optique requise, est d'utiliser la polarisation continue B_{DC} proportionnelle à la puissance de $x[n]$. La polarisation continue B_{DC} est généralement relative à la puissance électrique du signal $x[n]$ et est représentée par :

$$B_{DC} = k\sqrt{E\{x^2(n)\}} \quad (2.22)$$

où k est la constante de proportionnalité qui représente généralement le facteur d'écrêtage.

Toutefois, la quantité de polarisation CC à ajouter est indiquée dans la littérature comme suit

$$B_{DC} = 10\log_{10}(k^2 + 1) \text{ dB} \quad (2.23)$$

Le signal ajouté discrétisé et polarisé en courant continu qui en résulte peut être exprimé comme

$$x_{DC}[n] = x[n] + B_{DC} \quad (2.24)$$

Afin d'éviter que la polarisation en courant continu ajoutée ne soit excessive, les crêtes du signal négatif doivent être écrêtées. Cela introduit donc un bruit appelé bruit d'écrêtage, noté η_{clip} . Par conséquent, le signal résultant après l'inclusion du bruit d'écrêtage est représenté par

$$x_{DC}[n] = x[n] + B_{DC} + \eta_{clip} \quad (2.25)$$

Il est intéressant de noter qu'en DCO-OFDM, en raison de la contrainte de symétrie hermitienne imposée à l'IFFT sur les N sous-porteuses, seules $N/2$ sous-porteuses transmettent les données et la moitié restante est un conjugué complexe inversé des précédentes. Finalement, (2.22) illustre clairement qu'une contrainte de proportionnalité existe entre la puissance optique et l'amplitude du signal OFDM.

Par conséquent, on peut affirmer que le DCO-OFDM est affecté par l'ajout d'une polarisation en courant continu, car il y a une énorme inefficacité en termes de puissance

- **OFDM optique à écrêtage asymétrique (ACO-OFDM)**

Pour surmonter l'inefficacité en termes de puissance du DCO-OFDM, l'OFDM optique à écrêtage asymétrique (ACO-OFDM) est proposé [27]. Ici, le signal unipolaire est généré sans la polarisation CC requise. Ceci est réalisé en adoptant sélectivement les fréquences des sous-porteuses. En bref, dans l'ACO-OFDM, les porteuses paires sont mises à zéro, alors que seules les sous-porteuses impaires sont exploitées pour la modulation, c'est-à-dire que la symétrie hermitienne n'est appliquée qu'aux porteuses impaires. Le signal résultant peut être exprimé comme suit

$$X[N - K] = \begin{cases} X^*[k], & k \text{ est impair} \\ 0, & k \text{ est pair} \end{cases} \quad (2.26)$$

En général, les données d'entrée au bloc IFFT se présentent sous la forme suivante comme [136]

$$X = \left[0, X_1, 0, X_3, \dots, X_{\frac{N}{4}-1}, 0, X_{\frac{N}{4}-1}^*, 0, \dots, X_1^* \right] \quad (2.27)$$

Il ressort de (2.27) que sur les N sous-porteuses, seules $N/2$ sont utilisées. En outre, en raison de la contrainte de symétrie hermitienne, seules $N/4$ sont destinées à transporter des données,

car les $N/4$ restantes sont des versions conjuguées complexes inversées des précédentes. Par conséquent, le signal discrétisé à la sortie de l'IFFT peut être interprété comme [135]

$$x[n] = \frac{1}{N} \left[\sum_{k=1}^{\frac{N}{4}-1} 2X_{\text{reel}}[k] \cos\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) - \sum_{k=1}^{\frac{N}{4}-1} 2X_{\text{imag}}[k] \sin\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) \right] \quad (2.28)$$

L'équation (2.28) indique nettement qu'il y a une diminution du débit, puisque seules $N/4$ sous-porteuses sont émises. Il est important de noter que le signal dans le domaine temporel présente une propriété antisymétrique.

Ultimement, ce signal du domaine temporel est rendu positif en écrêtant les composantes négatives et en transmettant uniquement les composantes positives.

2.6.2.2 Modulation d'amplitude et de phase sans porteuse (CAP)

CAP est un autre schéma de modulation multi-porteuse, dans lequel le signal après le mappage QAM est filtré par des filtres cosinus surélevés en phase et en quadrature (RRCF). Pour la démodulation, des filtres appariés sont déployés. En introduisant plusieurs RRCF passe-bande avec une fréquence centrale différente, il est possible de réaliser une modulation m -sous-porteuse CAP (m -CAP), qui est plus tolérante aux réponses en fréquence des LED non plates [137]. L'avantage de l'utilisation de la modulation m -CAP par rapport à l'OFDM est un PAPR plus faible et une exigence souple d'avoir des blocs IFFT et FFT (transformée de Fourier rapide), d'où une implémentation plus simple [138]. Il est démontré qu'à une distance de transmission de 1 m, l'efficacité spectrale du 10-CAP peut atteindre 4,85 b/s/Hz [139]. Cette efficacité a été améliorée à 23,25 b/s/Hz en utilisant un système 4×4 MIMO à une bande passante de 5 MHz [140].

2.6.3 Schémas de modulation spécifiques à VLC

Parmi les schémas de modulation spécifiques au VLC, La modulation par décalage de couleur (CSK) de ce système utilise une LED RVB de couleur claire. Ces couleurs peuvent être combinées par la lumière, en transmettant les données dans la même couleur et donc la densité de sortie est constante, les inconvénients de ce système sont la complexité de l'envoi et de la réception à la main. Des chercheurs ont proposé la norme CSK IEEE 802.15.7 pour améliorer le débit de données. D'une manière ou d'une autre, la production de lumière

blanche à l'aide de phosphore jaune et de lumière bleue ralentit la capacité de commutation, ce qui permet de résoudre ce problème en produisant de la lumière blanche à l'aide de trois lampes LED distinctes RVB. Ce système (CSK) est conçu pour surmonter les défauts du PWM et les modèles de bits sont cryptés dans des ensembles de longueurs d'onde [141].

Différents schémas de modulation sont utilisés pour la VLC pour différentes applications, et leurs performances peuvent varier. Ils sont présentés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5. Différentes méthodes de modulation dans VLC

Modulation	Performance spectral	Performance du système	Débit de données	Distance
OOK	Haut	Faible	Faible	Court
PPM	Faible	Modéré	Modéré	Moyen
PAM	Modéré	Faible	Modéré	Moyen
OFDM	Haut	Haut	Haut	Long
CAP	Haut	Modéré	Haut	Long
CSK	Modéré	Haut	Faible	Court

2.7 Systèmes de transmission

L'objectif principal des systèmes de communication est d'atteindre un débit élevé avec une grande fiabilité. Le débit de transmission est lié à la capacité du canal, représentant le nombre maximal de données transmises à chaque instant. La fiabilité de la transmission est quant à elle liée à la probabilité d'erreur, inversement proportionnelle au rapport signal sur bruit. Pour améliorer à la fois le débit et la fiabilité, une solution simple consiste à augmenter la puissance de transmission. Cependant, dans un environnement multi-utilisateurs, cela entraîne également une augmentation des interférences. Une deuxième solution consiste à modifier le type de modulation des données, mais cela nécessite d'élargir le spectre d'émission. La technique la plus récente consiste à utiliser des techniques de transmission et de réception à antennes multiples, ce qui permet d'améliorer à la fois la fiabilité et le débit de transmission tout en maintenant le même spectre et la même puissance de transmission. Ces systèmes sont largement connus sous le nom de "systèmes MIMO" (multiple-input multiple-output) [142].

Divers systèmes sont employés pour la transmission sans fil, tels que :

2.7.1 Système SISO

Le système SISO (Single Input Single Output) est un système de communication introduit au début de la technologie de communication sans fil. Il s'agit du système de communication sans fil le moins complexe et le plus simple par rapport aux autres systèmes. Le système SISO n'a qu'une seule antenne du côté de l'émetteur et du récepteur. En raison de la présence d'une seule antenne des deux côtés, il est facile à utiliser et à mettre en œuvre, et il est moins cher car il ne nécessite aucun traitement supplémentaire du côté de l'émetteur et du récepteur. Les systèmes SISO sont aujourd'hui utilisés dans les technologies de communication Wi-Fi, TV, radiodiffusion.

La capacité du canal dans un système SISO est représentée par :

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p}{N_0 B} \right) \quad (2.29)$$

Où :

B : la bande passante en Hz,

P : la puissance du signal utile exprimée en Watt

No : la densité spectrale de puissance du bruit en W/Hz,

Après normalisation de la capacité par la bande utile B, on trouve :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (2.30)$$

Sachant que ρ est le rapport signal/bruit

2.7.2 Système SIMO

Dans un schéma de transmission de données, le système SIMO contient une seule antenne du côté de l'émetteur et plusieurs antennes du côté du récepteur, pour lutter contre l'évanouissement du canal. Ce système est également connu sous le nom de diversité de réception. Le signal reçu est combiné et le rapport signal/bruit global est égal à la somme des rapports signal/bruit de chaque antenne de réception.

La capacité du canal dans un système SIMO est représentée par :

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + N_r^2 \frac{p}{N_0 B} \right) \quad (2.31)$$

Nr : est le nombre d'antennes de réception utilisées au niveau du récepteur. Et après la normalisation, on obtient

$$C = B \cdot \log_2(1 + N_r^2 \rho) \quad (2.32)$$

2.7.3 Système MISO

Il s'agit d'une technique de diversité spatiale en émission où plusieurs antennes émettent des signaux, qui sont captés par une seule antenne en réception.

Dans ce mode de transmission, les signaux émis simultanément par les N_t antennes émettrices sont superposés et reçus. Chaque antenne émet le même symbole avec une énergie ES / N_t . En d'autres termes, la puissance émise est répartie entre le nombre d'antennes, de sorte que :

$$P = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (2.33)$$

Où P_i est la puissance transmise par chaque antenne. Si la puissance est identique sur toutes les antennes, alors on dit que :

$$P = N_t P_i \quad (2.34)$$

La capacité du canal dans un système MISO est donnée par la formule suivante :

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + N_t \frac{P_i}{N_0 B} \right) = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p}{N_0 B} \right) \quad (2.35)$$

Après normalisation de la capacité par la bande utile B , on obtient :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (2.36)$$

Les équations (2.29) et (2.35) sont identiques, mais en cas de trajets multiples, la technique MISO est plus avantageuse que la technique SISO car la probabilité d'évanouissement dans N_t antennes est plus faible que dans une seule antenne.

2.7.4 Système MIMO

La technologie MIMO offre la possibilité d'augmenter le débit de manière linéaire en fonction du nombre d'antennes de réception, tout en contrant les effets de l'évanouissement

du canal. Par conséquent, elle permet de réduire la probabilité d'évanouissement et d'affaiblissement du signal.

La différence entre un système MIMO (Multiple Input Multiple Output) et un système MISO (Multiple Input Single Output) réside dans le fait que le MIMO envoie des paquets différents aux antennes émettrices fonctionnant à la même fréquence, tandis que le MISO envoie les mêmes paquets aux antennes émettrices fonctionnant à la même fréquence.

Une démonstration effectuée par Foshini et Telatar a établi que la capacité théorique du canal MIMO, utilisant N_t antennes en émission et N_r antennes en réception, augmente de façon linéaire avec $\min(N_t, N_r)$ [143].

Le système de communication MIMO présente plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes tels que SISO, SIMO et MISO, notamment :

1- Le gain de beamforming (formation de faisceau) : cela permet de diriger le signal vers une direction spécifique, ce qui améliore la qualité et la portée de la communication.

2- Le gain de diversité spatiale : en utilisant plusieurs antennes d'émission et de réception, le système MIMO peut atténuer les effets de l'évanouissement du canal et améliorer la fiabilité de la transmission.

3- Le gain de multiplexage spatial : contrairement aux systèmes SIMO et MISO, le système MIMO permet de transmettre simultanément plusieurs flux de données indépendants sur les mêmes fréquences, augmentant ainsi le débit global.

Ces deux premiers avantages sont également présents dans les systèmes SIMO et MISO, cependant, le gain de multiplexage spatial est spécifique au système MIMO, ce qui lui confère un avantage supplémentaire.

2.8 MIMO Optique (OMIMO)

Il est courant d'utiliser des luminaires multiples pour fournir des niveaux d'éclairage adéquats dans divers environnements. Dans la plupart des cas, les luminaires sont équipés de plusieurs LED, qui peuvent être utilisées comme émetteurs pour faciliter la conception et la mise en œuvre de systèmes MIMO optiques pour la VLC. Avec un objectif similaire à celui des systèmes MIMO RF, le MIMO optique utilise plusieurs LED, pour améliorer de

manière significative les performances des systèmes VLC du point de vue de transmission [144, 5]. Normalement, ces améliorations découlent de l'utilisation du multiplexage spatial, qui augmente le débit du système ou de l'utilisation de la diversité spatiale qui diminue le BER [145]. L'efficacité spectrale est considérablement améliorée du fait de l'établissement d'une plateforme de communication parallèle. Cette plateforme est créée lorsque des émetteurs dotés de plusieurs sources lumineuses sont utilisés conjointement avec des récepteurs dotés de plusieurs détecteurs [112]. Par conséquent, il en résulte une augmentation de la capacité de transmission des données par rapport à une paire émetteur-récepteur unique (SISO). En outre, l'utilisation de la technique MIMO optique facilite l'élaboration de schémas sans fil optiques mobiles, où il n'est pas nécessaire d'aligner rigoureusement l'émetteur et le récepteur [34].

Toutefois, il a été démontré dans la littérature que l'utilisation du multiplexage spatial pour le MIMO optique n'est pas une technique efficace, pour améliorer les débits de transmission de données pour les récepteurs non imageurs [46].

Par rapport aux systèmes MIMO RF, la conception et la mise en œuvre de systèmes MIMO optiques pour VLC ne sont pas faciles, en raison de la diversité spatiale limitée [112]. Cette limitation est principalement présente dans les applications intérieures, où les chemins empruntés par les signaux incidents de l'émetteur au récepteur sont moins diversifiés que les chemins naturellement diversifiés des systèmes MIMO RF. Les travaux sur la diversité spatiale dans le cadre de la MIMO optique sont présentés dans [146, 147]. Un autre problème rencontré dans MIMO VLC est attribué à la conception du récepteur du système MIMO optique, qui est généralement conçu comme récepteurs sans imagerie ou avec imagerie [46, 147].

Pour un récepteur non imageur, un groupe de PD est disposé sans aucune dépendance les uns par rapport aux autres, et chacun des PD a son propre concentrateur optique [148]. Ce type de récepteur est favorable aux systèmes nécessitant un gain très élevé, qui peut être facilement obtenu grâce au champ de vision étroit des PD individuels. Néanmoins, cette technique présente l'inconvénient d'exiger un alignement très strict de la paire émetteur-récepteur, en raison de son champ de vision étroit. Un léger défaut d'alignement de cette paire réduira considérablement la capacité spectrale du système [112].

En ce qui concerne les récepteurs d'imagerie, des capteurs d'images sont utilisés comme composants du récepteur.

Un capteur d'image est fondamentalement un composite d'un dispositif optique d'imagerie tel qu'une lentille de projection ainsi qu'un grand nombre de PD. Un tel capteur crée par la suite un champ de vision adéquat qui réduit considérablement la nécessité d'un alignement serré de la paire émetteur-récepteur [148].

D'autre part, ces récepteurs sont limités par la nécessité d'un traitement d'image exceptionnel pour la création d'un canal MIMO à haut niveau d'efficacité, et par le fait que chaque PD a un gain limité. Un autre facteur qui réduit le débit des systèmes basés sur des capteurs d'imagerie est la faible fréquence d'échantillonnage des capteurs.

Considérons un système MIMO-OWC typique équipé de N_t émetteurs LED et de N_r récepteurs à photodiode (PD). Soit $\mathbf{s}=[s_1, s_2, \dots, s_{N_t}]^T$ le vecteur du signal transmis, H représente la matrice de canal MIMO $N_r \times N_t$ et $\mathbf{n}=[n_1, n_2, \dots, n_{N_r}]^T$ désigne le vecteur de bruit additif. Le vecteur de signal reçu $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_{N_r}]^T$ peut être donné par : [149]

$$\mathbf{y} = H\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2.37)$$

Où, la matrice de canal du système $N_r \times N_t$ MIMO-OWC peut être exprimée comme suit :

$$H_{N_r \times N_t} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11} & \cdots & \mathbf{h}_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{Nr1} & \cdots & \mathbf{h}_{NrN_t} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

dans laquelle, h_{rt} ($r=1,2,\dots,N_r$; $t=1,2,\dots,N_t$) est le gain du canal entre le $r^{\text{ième}}$ PD et la $t^{\text{ème}}$ LED.

Il existe trois types d'algorithmes les plus courants pour la technologie MIMO VLC, qui ont été mis en œuvre par divers chercheurs dans la littérature, à savoir le codage par répétition (RC ou diversité spatial 'SD'), le multiplexage spatial (SMP) et la modulation spatiale (SM) [16, 150, 151].

La technique la plus élémentaire et la plus facile à comprendre est la SD, dans lequel tous les émetteurs transmettent simultanément le même signal de données.

Cet algorithme donne de bons résultats lorsqu'il est conçu pour des systèmes optiques en espace libre en raison de sa diversité d'émission [152]. En outre, les signaux transmis par les

différents émetteurs s'additionnent de manière constructive sur le récepteur, ce qui augmente le gain global du système.

Pour le SMP, tous les émetteurs transmettent simultanément des signaux de données différents. Essentiellement, le SMP conduit à la création de flux de données parallèles multiples à entrée unique et sortie unique (SISO). Ce type de transmission pose un problème, car il est impératif que la paire émetteur-récepteur soit alignée avec précision l'une par rapport à l'autre afin d'atténuer les interférences entre les canaux (ICI) [112]. Le débit de données de ces techniques sera bien détaillé au chapitre 4.

Une autre technique MIMO est la modulation spatiale (SM), qui a été proposée pour la première fois dans [153] et améliorée dans [154, 155], est une nouvelle technique combinant les techniques MIMO et de modulation numérique et a également été appliquée à la communication optique sans fil. La SM introduit des bits d'information supplémentaires dans la dimension spatiale en plus de la constellation conventionnelle du signal.

Ainsi, le débit obtenu est amélioré. Pour une SM avec N_t émetteurs, chaque émetteur individuel peut être représenté par un index unique de $\log_2(N_t)$ bits binaires. Pendant la transmission, un émetteur n'est activé que lorsque son index correspond aux symboles spatiaux aléatoires entrants. Lorsque le M-PAM est utilisé, le SM atteint une efficacité spectrale de $\log_2(N_t) + \log_2(M)$ bits/s/Hz. Pendant chaque période de symbole, un seul émetteur est activé, ce qui permet d'éviter les interférences entre canaux (ICI). En outre, par rapport à d'autres techniques MIMO, le SM présente une complexité de décodage plus faible [153].

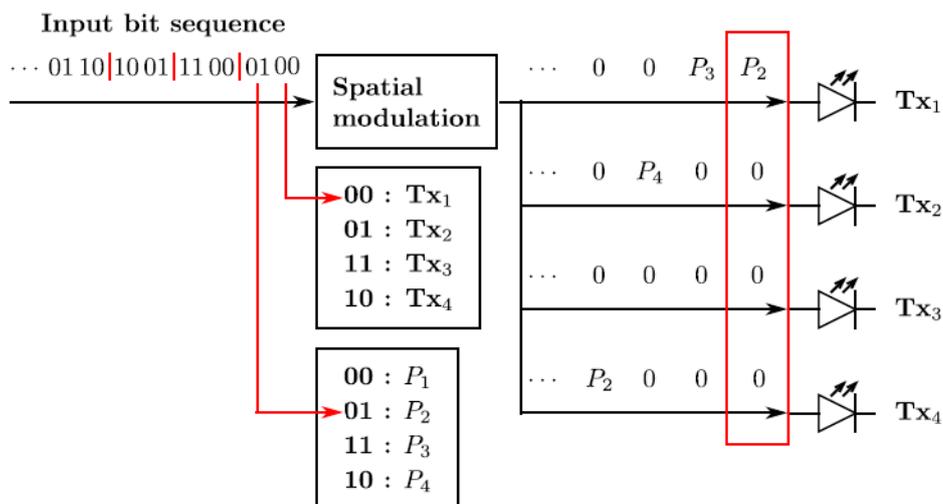


Fig 2.12. Illustration du fonctionnement du SM 4-PAM avec 4 émetteurs.

La figure 2.12 illustre le fonctionnement du SM M-PAM avec $N_t = 4$ et $M = 4$. T_{X1} - T_{X4} représentent les quatre émetteurs et P_1 - P_4 les quatre niveaux du signal émis.

Dans l'exemple, $\log_2(N_t) = 2$ bits sont utilisés pour sélectionner l'émetteur tandis que $\log_2(M) = 2$ bits sont codés dans chaque symbole 4-PAM. Comme le montre le diagramme, dans la première séquence de 4 bits '0 1 0 0', le signal d'émission P_2 représenté par les bits '0 1' est envoyé à T_{X1} qui est déterminé par les bits '0 0'. Pendant cette période de symbole, les trois autres émetteurs restent inactivés.

2.8.1 Techniques d'égalisation numérique

Les techniques d'égalisation numérique sont largement utilisées dans la pratique pour atténuer l'ISI provenant de la réponse sélective en fréquence de la LED, pour aider le système VLC à fonctionner au-delà de la largeur de bande de 3 dB de la LED. L'égalisation numérique permet d'alléger le matériel au détriment de la complexité de calcul. Pour les schémas de modulation mono-porteuse (par exemple PAM ou CAP), divers types d'égaliseurs dans le domaine temporel peuvent être utilisés au niveau du récepteur. Un égaliseur linéaire à réaction (FFE) peut être utilisé avec des critères de forçage zéro (ZF) ou d'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) : le premier élimine complètement l'ISI au détriment de l'amplification du bruit, tandis que le second réalise un compromis entre l'inversion du canal et l'amélioration du bruit. Par ailleurs, les égaliseurs non linéaires à rétroaction (DFE) limitent l'amplification du bruit, en ajoutant une voie de rétroaction à une structure FFE dans laquelle les symboles estimés précédents sont introduits. Contrairement aux signaux mono-porteurs avec des égaliseurs dans le domaine temporel, les schémas de modulation multi-porteurs tels que le DMT bénéficient d'une égalisation plus simple, car chaque sous-porteuse subit un canal d'évanouissement plat et nécessite donc un égaliseur à prise unique. En outre, inspirées par le processus d'égalisation de la DMT, les techniques d'égalisation dans le domaine fréquentiel ont également été étudiées pour les schémas de modulation mono-porteuse, afin de réduire la complexité des calculs [156, 157].

2.8.1.1 Égaliseur de Forçage à zéro (ZF)

L'égaliseur de Forçage à zéro (ZF) est un égaliseur linéaire de faible complexité qui doit son nom au fait qu'il minimise l'ISI à zéro, et offre une réponse en fréquence plate et une phase linéaire grâce à la combinaison des caractéristiques du canal et de l'égaliseur [158]. Cependant, cet égaliseur présente des inconvénients tels que l'amplification du bruit, la

nécessité d'une estimation précise des informations d'état du canal (CSI) pour un bon fonctionnement. Le vecteur de signal estimé, \hat{x} , à l'aide de l'égaliseur ZF est choisi comme le vecteur d'erreur minimal (solution des moindres carrés) et est donné par :

$$\hat{x} = \arg \min \|y - Hx\|^2 \quad (2.39)$$

$$\frac{d\|y-Hx\|^2}{dx} = \frac{d(y-Hx)^T(y-Hx)}{dx} \quad (2.40)$$

$$-2H^T \bar{y} + 2HH^T \hat{x} = 0 \quad (2.41)$$

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T \bar{y} \quad (2.42)$$

$$\hat{x} = (H^H H)^{-1} H^H \bar{y} \quad (2.43)$$

$(H^H H)^{-1} H^H$ est la pseudo-inverse de la matrice de canal H. Nous devons également noter que l'existence d'un inverse ne peut pas toujours être garantie, comme c'est le cas lorsque la matrice n'a pas un rang complet et n'est donc pas inversible.

2.8.1.2 Égaliseur de l'Erreur Quadratique Moyenne Minimum (MMSE)

Dans cette technique, l'erreur quadratique d'une variable aléatoire est d'abord calculée, puis sa moyenne est prise. La valeur moyenne représente une différence statistique très critique. Cet égaliseur MMSE est un égaliseur linéaire qui vise à atténuer l'ISI et à réduire le bruit également. Le modèle mathématique de l'égaliseur MMSE est donné par :

$$\hat{x} = \arg \min E \|y - Hx\|^2 \quad (2.44)$$

$$= \arg \min E \{ \|\bar{C}^T \bar{y} - x\|^2 \} \quad (2.45)$$

La matrice de l'égaliseur est alors la suivante :

$$\bar{c} = P_d (P_d H H^T + \sigma_n^2 I)^{-1} H \quad (2.46)$$

où P_d et σ_n^2 sont les puissances du signal transmis et du bruit au niveau du récepteur respectivement. Enfin, l'égaliseur LMMSE pour le système MIMO est donné comme suit :

$$\hat{x} = P_d(P_d H H^T + \sigma_n^2 I)^{-1} H \bar{y} \quad (2.47)$$

$$\hat{x} = P_d(P_d H H^H + \sigma_n^2 I)^{-1} H \bar{y} \quad (2.48)$$

L'équation ci-dessus peut être réécrite comme suit [159].

$$\hat{x} = (H H^H + \frac{1}{SNR} I)^{-1} H \bar{y} \quad (2.49)$$

où $SNR = \frac{P_d}{\sigma_n^2}$. Ici, à SNR élevé, l'égaliseur MMSE se rapproche de l'égaliseur ZF [160].

2.9 Technique d'accès multiples

2.9.1 Schémas à accès multiple orthogonaux

Les techniques d'accès OMA classiques permettent à plusieurs utilisateurs d'utiliser les ressources de manière orthogonale, de partager simultanément les ressources du système par division temporelle, fréquence, code ou espace.

Il y a donc une interférence nominale entre les blocs adjacents, ce qui permet une détection du signal raisonnablement accessible avec une complexité croissante au niveau du récepteur. Il existe différentes techniques OMA, qui dépend de la manière dont elles divisent les ressources du support par lequel l'information est transmise. Les principales techniques OMA sont TDMA, CDMA, FDMA et OFDMA, qui sont décrites ci-dessous.

2.9.1.1 Accès multiple par répartition temporelle (TDMA)

TDMA est un système très utilisé en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Les utilisateurs se voient attribuer un intervalle de temps à tout moment et les informations sont transmises sur ces intervalles. La répartition orthogonale des intervalles garantit l'élimination des interférences dans le cas du chevauchement d'une zone de couverture. Toutefois, l'efficacité de la répartition est limitée puisqu'un seul utilisateur est desservi à tout moment et que la synchronisation est difficile dans les systèmes VLC [161].

2.9.1.2 Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA)

Comme le TDMA, le FDMA est une technique largement utilisée en raison de son faible coût de mise en œuvre. La largeur de bande du signal est découpée en parties qui sont attribuées dynamiquement à chaque utilisateur. Chaque récepteur sera desservi par une ou plusieurs bandes de fréquences. Il peut parfois être appelé multiplexage de sous-porteuses (SCM).

2.9.1.3 Accès multiple par répartition en code (CDMA)

Le CDMA dans le domaine optique repose sur des codes orthogonaux pour permettre à des utilisateurs multiples d'accéder à un même canal. Ce concept est à l'origine de nombreux schémas appliqués à la fibre optique [162]. Chaque utilisateur se voit attribuer des codes d'étalement orthogonaux qui sont essentiellement des séquences binaires. En général, dans la VLC, il s'agit de codes unidimensionnels, tels que les séquences Gold, les codes orthogonaux optiques (OOC) et les codes premiers. Mais il peut également s'agir de codes bidimensionnels avec un étalement à la fois dans le temps et dans la longueur d'onde [163, 164]. Les débits de données pour un grand nombre d'utilisateurs sont généralement limités en raison de la difficulté à maintenir l'orthogonalité dans les canaux VLC.

2.9.1.4 Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA)

OFDMA est basé sur l'OFDM qui est un système d'accès multiple à plusieurs porteuses [165]. Chaque utilisateur se voit attribuer un ensemble différent de sous-porteuses pour la communication [166], de la même manière que le FDMA ou le multiplexage de sous-porteuses (SCM). Il s'agit d'une extension naturelle de l'utilisation de l'OFDM pour la modulation dans la couche physique. Le débit de données par récepteur est évidemment limité par le nombre d'utilisateurs.

2.9.1.5 Accès multiple par répartition spatiale (SDMA)

SDMA est un autre système qui permet à chaque utilisateur d'utiliser pleinement les blocs de temps et de fréquence disponibles. Pour ce faire, un émetteur à diversité angulaire (ADT) émet plusieurs faisceaux optiques étroits vers des utilisateurs séparés dans l'espace. Comme les différents éléments LED sont pilotés par des signaux électriques indépendants, chaque LED transmet un flux de données indépendant à l'un des utilisateurs. L'utilisation des ADT permet de réduire efficacement l'affaiblissement du trajet et les interférences entre

utilisateurs, car des faisceaux distincts transmettent des signaux d'information à différents utilisateurs [167].

2.9.1.6 Accès multiple par multiplexage en longueur d'onde (WDM)

WDM est une technique qui permet de multiplexer plusieurs porteuses optiques de différentes longueurs d'onde au niveau de l'émetteur, de les démultiplier au niveau du récepteur.

Le WDM peut être réalisé dans différentes structures. Par exemple, seuls des filtres passe-bande du côté du récepteur peuvent être utilisés pour détecter chaque longueur d'onde individuellement [35], ou une combinaison de filtres passe-bande au niveau du récepteur et de miroirs dichroïques au niveau de l'émetteur peut être sélectionnée [168]. Comme pour le SMP, des flux de données indépendants sont transportés par chaque longueur d'onde. Le WDM est largement utilisé dans les fibres optiques et peut également être appliqué aux communications optiques sans fil.

2.9.2 Schémas à accès multiple non orthogonaux (NOMA)

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) est une technique efficace pour desservir des utilisateurs multiples [169]. L'accès multiple non orthogonal permet à plusieurs utilisateurs de partager des ressources temporelles et fréquentielles dans la même couche spatiale, via le domaine de puissance (PD-NOMA) ou le domaine de code (CD-NOMA) [170]. Les communications basées sur la VLC ont également adopté la stratégie NOMA pour améliorer les performances. La NOMA dans le domaine de la puissance (PD) présente plusieurs avantages, notamment l'équité pour l'utilisateur, l'amélioration de l'efficacité spectrale, la faible latence de transmission et un débit plus élevé au niveau de la cellule. L'étude de [171] a démontré expérimentalement une communication MIMO basée sur la NOMA, avec une transmission mono-porteuse et une annulation des interférences successives dans le domaine des fréquences. Dans [172], les auteurs ont proposé une modulation d'amplitude en quadrature décalée (OQAM)-OFDM basée sur la MIMO-NOMA pour la VLC multi-utilisateurs, et le débit de données de 3,2 Gbps a été atteint. Les auteurs de [173] ont utilisé un égaliseur de forçage à zéro avec annulation d'interférences successives (ZF-SIC) et un égaliseur d'erreur quadratique moyenne minimale avec annulation d'interférences successives (MMSE-SIC), pour améliorer les performances du BER du système NOMA MIMO. Il a été conclu que le MMSE-SIC améliorerait le BER de 3 dB par rapport au ZF SIC.

Un schéma de transmission NOMA multi-utilisateurs a été proposé dans [174], où les utilisateurs ayant une corrélation élevée entre leur vecteur de gain de canal sont regroupés en une seule grappe. Les résultats de la simulation montrent que la méthode proposée peut fournir de meilleures performances que la méthode ZF en termes d'efficacité spectrale. La modulation L-PPM du NOMA-VLC a été proposée dans [175] pour déterminer la probabilité d'erreur des scénarios à deux et trois utilisateurs. La modulation L-PPM peut être plus performante que la modulation OOK et offrir des performances optimales avec un coefficient d'allocation de puissance de 0,3.

2.10 MIMO multi-utilisateurs

Le MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO) est une technique MIMO avancée qui a gagné en intérêt au cours des dix dernières années. MU-MIMO permet le partage du débit total d'un système MIMO et l'émission de données vers 2 utilisateurs ou plus. MU-MIMO est déjà utilisé dans la norme LTE-Advanced, ou 4G [176]. Par exemple, en RF, 4 antennes pourraient être utilisées à l'émetteur et 2 antennes par utilisateur aux récepteurs. Le multiplexage est effectué dans le domaine spatial et accorde une augmentation de l'efficacité spectrale cellulaire sans avoir besoin d'un grand nombre d'antennes dans chaque récepteur.

Dans la VLC, les multiples LED de l'émetteur peuvent être coordonnées pour transmettre des données à différents utilisateurs. Les interférences entre utilisateurs sont atténuées par un précodage de forçage à zéro (ZF) [177]. Le précodage peut ainsi réduire la complexité de calcul et la consommation d'énergie du récepteur, qui sont deux des principaux inconvénients des systèmes MU-MIMO [178, 179].

2.11 Comparaison des schémas à accès multiples appliqués aux systèmes VLC

Une comparaison qualitative des schémas d'accès multi-utilisateurs est présentée dans le tableau 2.6. La première métrique utilisée est l'efficacité spectrale par utilisateur, qui indique le débit qu'un utilisateur peut atteindre en fonction de la bande passante du signal pour un schéma d'accès multi-utilisateurs donné. La deuxième métrique importante pour un système VLC multi-récepteurs est la flexibilité, qui correspond à la capacité d'un schéma à compenser un état de canal variable. Ceci est particulièrement important dans les communications optiques sans fil, car les récepteurs subissent de grandes variations d'atténuation du canal en fonction de leur position et de l'angle d'incidence par rapport au point d'accès. La complexité

est une troisième mesure essentielle indiquant le coût de mise en œuvre de toute technique d'accès multi-utilisateurs. Enfin, le nombre maximum d'utilisateurs est comparé comme quatrième métrique.

Tableau 2.6.Comparaison qualitative des schémas d'accès multi-utilisateurs dans VLC [180].

	Efficacité spectral	Flexibilité	Complexité	Nombre maximal d'utilisateurs
CDMA	Modéré	Modéré	Modéré	Modéré
SDMA	Élevé	Élevé	Élevé	Modéré
WDMA	Élevé	Modéré	Élevé	Faible
FDMA/SCM	Faible	Modéré	Faible	Élevé
MU-MIMO	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

2.12 Conclusion

Le chapitre (03) décrit le principe de fonctionnement du système VLC et les différents composants utilisés dans un tel réseau de communication.

La communication par lumière visible (VLC) est un système de communication sans fil complet qui se distingue par sa capacité à remplir deux fonctions essentielles : l'éclairage et la transmission de données. Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des LED utilisées comme émetteurs, notamment les différents types de LED disponibles et leur débit de données réalisé. De plus, nous avons également abordé le rôle crucial des photodiodes en tant que récepteurs dans les systèmes VLC.

De plus, les caractéristiques de propagation et la modélisation du canal optique sans fil intérieur ont été examinées. La géométrie des scénarios de communication à visibilité directe (LOS) et de non visibilité directe (NLOS) est définie. De plus, le chapitre a présenté un aperçu des formats de modulation numérique couramment utilisés en OWC, en mettant l'accent sur les techniques de modulation pulsée (mono-porteuse) telles que : OOK, PPM et PAM, ainsi que sur la modulation multi-porteuse utilisant l'OFDM, suivi par une discussion sur les différents systèmes de transmission et les technique d'accès multiples.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons examiné les techniques MIMO pour l'OWC, mettant en évidence les caractéristiques spécifiques, les avantages de chaque technique. Les techniques MIMO peuvent être utilisés pour améliorer la capacité et/ou la fiabilité d'un système OWC en concevant le système pour fournir un gain de multiplexage, un gain de diversité, ou un compromis attrayant entre les deux.

Chapitre 3

Etude 3D des Arrangements des LEDs pour des Applications Intérieures

3.1 Introduction	61
3.2 Évaluation des performances du système VLC sur la base de l'arrangement des LEDs	61
3.3 Exigences du système VLC	62
3.4 Conception des Modèles des LEDs dans le system VLC Intérieur	63
3.4.1 Modélisation des systèmes VLC proposés.....	65
3.4.2 Canal de transmission.....	65
3.5 Analyse du system VLC proposé	67
3.5.1 Distribution d'illuminance horizontale	67
3.5.2 Puissance reçue	67
3.5.3 Rapport signal sur bruit (SNR).....	68
3.5.4 Propagation du retard quadratique moyen (RMSDS)	68
3.5.5 Débit binaire.....	69
3.6 Evaluation des performances des systèmes proposés	69
3.6.1 Distribution d'illuminance horizontale	69
3.6.2 Puissance optique reçue	71
3.6.3 Performance SNR du système	73
3.6.4 Propagation du retard quadratique moyen (RMSDS)	75
3.7 Conclusions	78

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons pour la première fois un nouvel arrangement de lampes à LED, où un arrangement tridimensionnel (3-D) de LED est choisi pour notre étude au lieu d'un arrangement bidimensionnel (2-D). Notre proposition permet d'améliorer les performances des systèmes VLC intérieurs en termes d'illuminance, de puissance reçue, de rapport signal sur bruit (SNR) ainsi que le débit de données du système au niveau du récepteur.

L'étude révèle qu'un choix approprié de l'arrangement des LEDs peut améliorer les performances de divers paramètres de communication, notamment l'illuminance, la puissance reçue, le rapport signal/bruit et l'augmentation du débit de données [181].

3.2 Évaluation des performances du système VLC sur la base de l'arrangement des LEDs

Aujourd'hui, le monde universitaire et l'industrie s'intéressent de près à la communication par lumière visible, qui est une technologie prometteuse utilisée pour répondre à la demande croissante de spectre pour les futurs systèmes de communication basés sur la 5G [182].

Pour réaliser un system VLC intérieur avec de bonnes performances et sans zone aveugle, il est nécessaire que chacun des paramètres d'illuminance, de puissance reçue et de rapport signal/bruit doivent être suffisants dans n'importe quelle partie de la pièce. Pour cela, la conception du récepteur optique et la disposition correcte des LEDs jouent donc un rôle important dans le système VLC [183].

Parmi les contraintes liées à l'utilisation des communications VLC à l'intérieur, l'uniformité d'éclairage qui est l'un des enjeux les plus critiques. Lorsqu'une seule lampe LED ne peut pas fournir un éclairage suffisant, il est nécessaire d'utiliser plusieurs LEDs pour obtenir un éclairage adéquat de la pièce [184-185]. En outre, la qualité de l'éclairage et de la communication est étroitement liée à l'emplacement des LED au plafond [120, 186-188].

Pour améliorer l'uniformité de la distribution et les performances du système VLC, de nombreux modèles de conception ont été présentés dans des études antérieures. Deux modèles de configuration pour la position des LEDs sont proposés [185, 120], où un et quatre émetteurs optiques sont placés dans le plafond. En termes de puissance reçue, de rapport signal-bruit (SNR)

et de niveaux d'illuminance, ces systèmes ont été évalués. En conséquence, une plus grande uniformité a été démontrée dans la configuration à quatre émetteurs optiques par rapport à un émetteur optique unique. La distribution circulaire est un autre arrangement introduit [189], dans lequel les LEDs sont distribuées uniformément sur un cercle, ce qui améliore l'uniformité du système mais au prix d'une interférence inter-symboles (ISI) plus élevée.

La distance entre les LEDs et l'angle d'émission à mi-puissance sont étudiés dans le système de positionnement intérieur VLC [190], afin d'atteindre la distance optimale qui permet de couvrir toute la zone de localisation du récepteur.

Trois modèles de configuration sont comparés, dans lesquels quatre, neuf et seize émetteurs sont répartis uniformément le long du plafond [191]. Lorsque le nombre d'émetteurs augmente, l'uniformité de puissance de rayonnement s'améliore ; en conséquence, le cas des seize émetteurs est plus performant que les autres cas de quatre et neuf émetteurs. Mais au centre de la pièce, la puissance reçue est beaucoup plus élevée que dans le reste de la pièce.

Pour cela, une étude de 16 émetteurs optiques avec différentes topologies de configuration a été réalisée [192]. Elle s'est concentrée sur l'impact de l'angle de demi-puissance sur les performances du système où une distribution uniforme a été atteinte dans le système, mais au prix d'une diminution au centre de la pièce.

Contrairement aux recherches précédentes qui se basent principalement sur une disposition bidimensionnelle (2D) des lampes LEDs au plafond, nous avons proposé pour la première fois un nouvel arrangement des lampes, en choisissant un arrangement tridimensionnel (3D) des LEDs pour notre étude [193]. Les lampes sont réparties horizontalement et verticalement au plafond.

3.3 Exigences du système VLC

Un bon système de communication VLC doit satisfaire aux exigences des fonctions d'éclairage et de communication. La norme ISO pour l'éclairage des bureaux exige une illuminance comprise entre 300 et 1500lx [183, 194-196]. Et un niveau de SNR supérieur à 13,6dB est nécessaire pour une liaison de communication stable. Un seuil de puissance reçue doit être choisi dans le système VLC, où un seuil de -2,8dBm est choisi dans [197]. Alors que la puissance reçue et l'illuminance doivent être simplement supérieures à certains seuils, le rapport signal/bruit doit être aussi élevé que possible. En général, un niveau plus élevé de SNR donne une meilleure qualité de la liaison de communication [197].

3.4 Configuration des Modèles des LEDs dans le system VLC Intérieur

Les schémas des modèles optiques proposés sont modélisés dans une pièce standard avec 5 m de longueur, 5 m de largeur et 3 m de hauteur, ce qui correspond à une dimension de $(5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3)$. Les émetteurs optiques (16 LEDs) sont répartis en trois dimensions (3-D) sur le plafond, où les quatre LEDs centrées sont fixées au plafond et les autres situées sous le plafond à une distance D , cette distance varie entre 5 et 20 cm. sachant que D représente la valeur du déclin ou la distance verticale par rapport au plafond.

Le récepteur est supposé être situé au-dessus du sol sur un bureau. La hauteur du bureau est de 0,85 m, En outre, chaque matrice de LED est remplie de 900 (30×30) puces LEDs, soit un nombre total de 14400 puces LEDs. Les modèles de pièces typiques sont présentés dans les Fig 3.1 et Fig 3.2, tandis que les vues de dessus des deux modèles sont présentées dans les Fig. 3.3.a et 3.3.b respectivement.

La vue de dessus de chaque modèle proposé est similaire à un schéma présenté déjà à la littérature, le premier modèle proposé est similaire au schéma de Khadr [191], alors que le deuxième modèle proposé est similaire au modèle de Mahfouz [192].

Ensuite, les arrangements proposés sont comparées aux modèles présentés antérieurement [191, 192] qui ont une distance verticale nulle par rapport au plafond ($D=0$). La géométrie de l'arrangement proposée est illustrée à la Fig. 3.4, où seule la ligne en visibilité direct (Line-Of-Sight LOS) a été prise en considération. Les différents paramètres utilisés dans la simulation sont présentés dans le tableau 3.1.

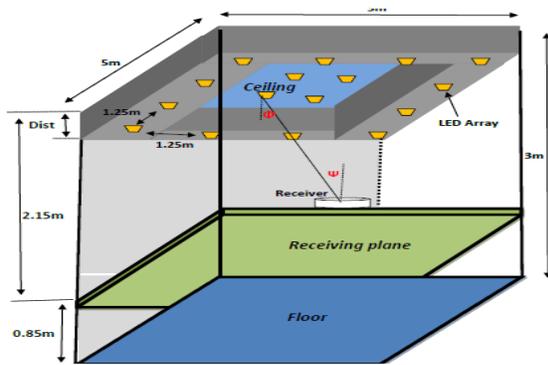


Fig. 3.1. Arrangement du premier Modèle.

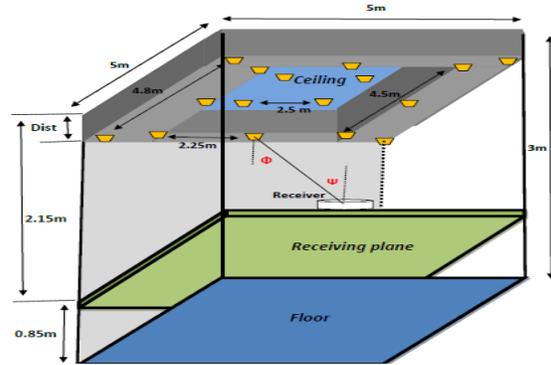
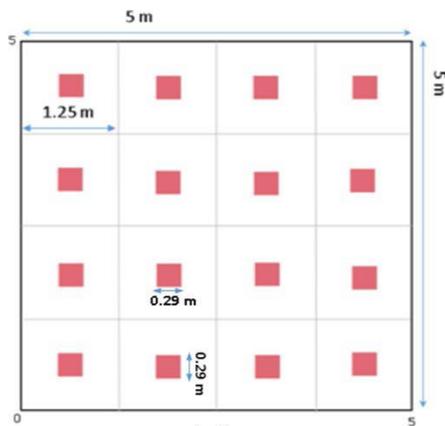
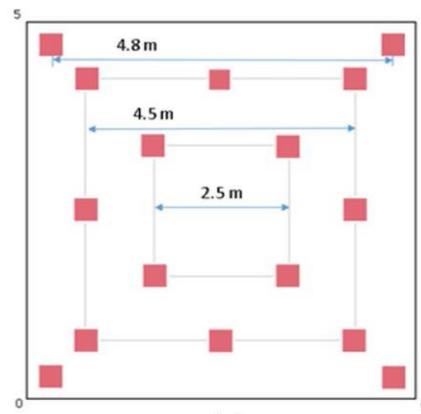


Fig. 3.2. Arrangement du deuxième Modèle.



a



b

Fig. 3.3. Vue de dessus des modèles proposés : (a) - premier Modèle, et (b) - deuxième Modèle.

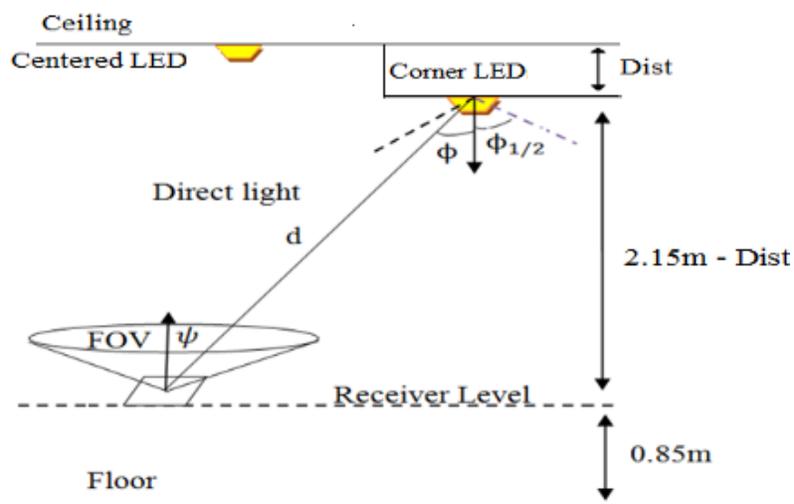


Fig. 3.4. La configuration géométrique du système.

3.4.1 Modélisation des systèmes VLC proposés

L'émission de lumière se produit dans toutes les directions autour de toute la surface des LEDs, ce qui est appelé émission lambertienne. L'intensité de la puissance optique est la puissance rayonnée à travers un angle solide unitaire sur une surface unitaire. L'intensité maximale I_0 se produit dans la direction perpendiculaire à la surface de LED. L'intensité du rayonnement $I(\phi)$ de la source optique dépend de l'angle d'irradiation ϕ et se présente comme suit [198] :

$$I(\phi) = I(0)\cos^m(\phi) \quad (3.1)$$

Où ϕ est l'angle d'éclairement par rapport à l'axe normal à la surface de l'émetteur. $I(0)$ est l'intensité lumineuse centrale, et l'ordre lambertien m est donné par l'équation (2.8).

3.4.2 Canal de transmission

En général, il existe deux types de liaisons VLC. L'une est une liaison point à point et l'autre est une liaison de diffusion [199]. Dans la liaison point à point, les émetteurs-récepteurs communiquent entre eux par l'intermédiaire d'un ensemble de faisceaux étroits, et il faut qu'il n'y ait pas d'obstacles entre les émetteurs-récepteurs et que les faisceaux soient orientés dans la bonne direction. La configuration de la liaison susmentionnée permet de réduire les interférences au niveau du récepteur dues à la lumière parasite ambiante, de diminuer l'atténuation du signal et d'obtenir une transmission à haut débit. Cependant, les canaux point à point nécessitent une transmission LOS stricte, qui est très sensible aux effets de blocage et d'ombre. Ce type de liaison VLC présente certains avantages en termes de faible coût de mise en place de la liaison. Dans le deuxième type de liaison VLC, le signal est diffusé selon un grand angle, comme dans les liaisons RF. Ainsi, une liaison diffusante ne connaît pas les problèmes d'orientation du rayonnement et d'ombrage qui existent dans les liaisons point à point, et le récepteur d'une telle liaison peut avoir une faible mobilité. En même temps, la communication VLC dans les liaisons diffusantes peut subir une perte de débit de données du signal et introduire une distorsion du signal induite par des trajets multiples, ce qui a un impact significatif sur la capacité globale du canal [200].

Dans notre étude, nous limitons la propagation des faisceaux lumineux uniquement dans le canal de visibilité directe (LOS), où le gain DC du canal LOS est modélisé par l'équation (2.11).

À la réception, des filtres optiques et des concentrateurs sont respectivement utilisés pour atténuer la lumière ambiante dans les récepteurs optiques et pour augmenter la surface efficace de collecte de la lumière [120].

Tableau 3.1 Paramètres de Simulation

	<i>Parameters</i>	<i>Valeurs</i>
Chambre	Taille	5x5x3 m^3
Source	Nombre total de μ LEDs	14.400 (30*30*16)
	Puissance transmise des μ LEDs	20mW
	Angle à mi-puissance	70°
Récepteur	Plan du récepteur au-dessus du sol	0.85 m
	Zone active	1 cm^2
	demi-angle FOV	70°
	Indice de réfraction de l'objectif	1.5
	Gain du filtre optique	1
	Réactivité de la photodiode (R)	0.54
	Facteur de bande passante (I_2)	0.562
	Débit binaire (B)	30 Mb/s
	Température absolue (T_k)	298 K
	Capacité fixe par unité de surface (η)	112pF/cm ²
	Facteur de bruit du canal FET(Γ)	1.5
	Transconductance du FET (g_m)	30 mS
Facteur de bande passante (I_3)	0.0868	

3.5 Analyse des systèmes VLC proposée

Les arrangements intérieurs typiques des LEDs et la caractérisation du modèle de canal ont été décrits en détail. Cela inclut l'adoption de certains paramètres d'analyse pour évaluer le système, tels que la puissance reçue au niveau du récepteur, le rapport signal/bruit, le retard quadratique moyen (RMS), le débit de données moyen et l'illuminance.

3.5.1 Distribution d'illuminance horizontale

Les espaces intérieurs doivent bénéficier de conditions d'éclairage appropriées [201,202], et le niveau d'éclairage doit être adapté au type de tâches visuelles effectuées dans l'environnement intérieur (par exemple, les tâches visuelles complexes nécessitent des niveaux d'éclairage plus élevés). Il ne doit pas non plus y avoir de grandes variations d'éclairage dans la pièce (à moins que cela ne soit nécessaire pour des raisons esthétiques, comme dans les musées ou les galeries d'art), car la cohérence de l'éclairage est importante pour le confort des yeux. L'éclairage d'un point est déterminé par l'illuminance horizontale, qu'est une grandeur photométrique qui mesure la quantité de lumière en lux [203].

L'illuminance horizontale I_{hor} déterminé par la $i^{\text{ème}}$ LED au point (x, y) sur le plan de communication est donné par la formule suivante :

$$I_{hor} = I(0) \cos^m(\phi) / d^2 \cos(\psi) \quad (3.2)$$

3.5.2 Puissance reçue

Dans les conceptions proposées, le récepteur est supposé être mobile, il a donc été considéré que le récepteur se déplace sur le plan de communication à une hauteur de $h = 0.85\text{m}$ par rapport au sol. De plus, le plan de communication est divisé en un nombre L de grilles égales. Lorsque le récepteur se déplace dans chaque grille, il reçoit la puissance totale émise par tous les LEDs.

Cette dernière peut s'écrire comme suit [189] :

$$P_r = \sum_{LEDs} P_t \cdot H(0)_{LOS} \quad (3.3)$$

où $H(0)_{LOS}$ est le gain DC du canal, et P_t est la puissance optique transmise par la LED.

3.5.3 Rapport signal sur bruit (SNR)

Le rapport signal/bruit (SNR) est le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit. Cette quantité sans dimension est un paramètre très important pour tous les systèmes de communication. Il s'agit d'un facteur de qualité pour eux, sachant que la qualité de communication est directement proportionnelle au SNR.

En présence de bruit optique et de bruit thermique, le SNR est mesuré pour évaluer les performances des modèles proposés ; il a été calculé comme [185] :

$$SNR = \frac{(RP_r)^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2} \quad (3.4)$$

où R est la sensibilité du récepteur, σ_{shot}^2 et $\sigma_{thermal}^2$ sont respectivement la variance du bruit optique et du bruit thermique qui sont représenté par les équations (2.15) et (2.16).

3.5.4 Propagation du retard quadratique moyen (RMSDS)

Le signal optique reçu est sujet à un étalement de retard dans des conditions de propagation par trajets multiples. Lorsqu'un émetteur envoie un signal d'impulsion optique très étroit, en raison du fait qu'il existe de nombreux trajets de propagation différents et que les longueurs de trajet ne sont pas les mêmes, les temps pendant lesquels le signal optique transmis atteint un récepteur le long de différents trajets de propagation varient. D'autre part, un trajet de propagation spécifique peut également changer avec la modification des positions du récepteur, et ainsi, le signal optique combiné vu au niveau d'un récepteur consiste en des impulsions avec des retards temporels différents. L'étalement du retard RMS est une excellente mesure de l'étalement du retard du canal ainsi que de l'ISI causé par un canal à trajets multiples. L'étalement du retard RMS du canal est un prédicteur très précis du SNR altéré par l'ISI, et il supprime la dépendance à la réponse impulsionnelle du canal à un moment précis [204-207]. La propagation du retard RMS peut être calculée par :

$$D_{RMS} = \sqrt{\mu^2 - (\mu)^2} \quad (3.5)$$

Le délai moyen des retards μ est défini comme le premier moment du profil de puissance et se calcule par la relation suivante :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}}{P_T} \quad (3.6)$$

$$\text{Ou} \quad \mu^2 = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2}{P_T} \quad (3.7)$$

3.5.5 Débit binaire

Les réseaux VLC intérieurs sont sujets à la propagation par trajets multiples, ce qui se traduit par une ISI plus élevée. Des interférences plus importantes élargissent l'impulsion transmise et limitent donc la bande passante du système, ce qui affecte la vitesse moyenne des données. Cependant, la vitesse moyenne des données peut être améliorée en réduisant les interférences. Ce paramètre s'agit d'un critère lié à la communication pure et ne prend pas en compte les problèmes relatifs à la réception ou non des données en extrémité de chaîne de transmission [208].

Et décrit aussi la vitesse à laquelle les bits sont transférés d'un bout à l'autre du réseau.

Le débit binaire est généralement mesuré en bits par seconde (bps), kilobits par seconde (Kbps) ou mégabits par seconde (Mbps).

Selon [5], et sans la nécessité d'un égaliseur, le débit binaire maximal pouvant être transmis via le canal est :

$$R_b \leq 1 / (10D_{RMS}) \quad (3.8)$$

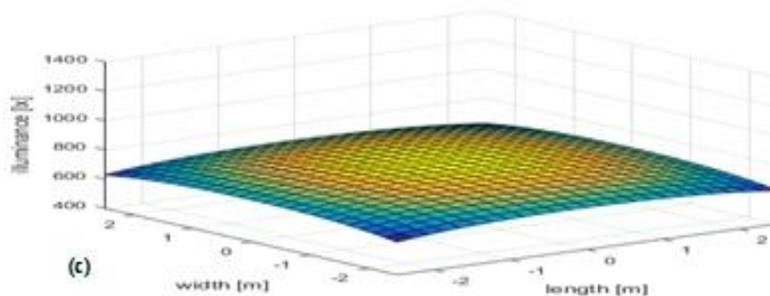
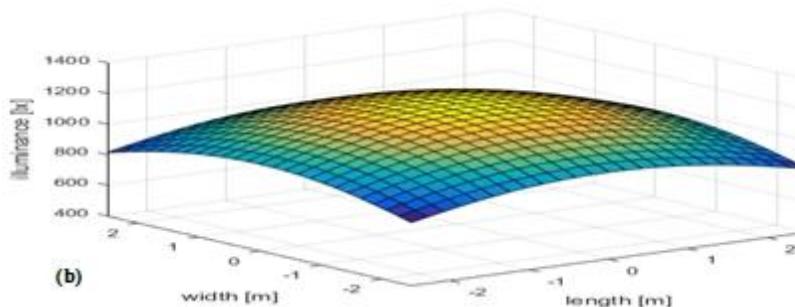
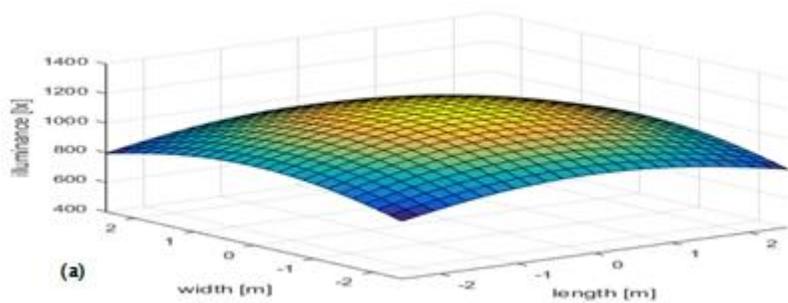
3.6 Evaluation des performances des systèmes proposés

3.6.1 Distribution d'illuminance horizontale

La distribution de l'illuminance horizontale pour quatre modèles avec un rayonnement lumineux direct (LOS) dans la pièce est montrée par la figure 3.5, où (a) représente le modèle de Khadr [191], (c) représente le modèle de Mahfouz [192].

Les modèles proposés sont illustrés par les figures (b) et (d), au (b) représente le premier modèle proposé avec une distance verticale $D= 20$ cm qui va être ensuite comparé au modèle de Khadr, (d) représente le deuxième modèle proposé avec $D = 20$ cm qui va être comparé au modèle de Mahfouz.

Le tableau 3.2 résume les performances d'illuminance horizontale des modèles mentionnés précédemment, où les valeurs minimales, maximales et moyennes pour chaque modèle sont présentées. Les résultats montrent que la valeur maximale d'illuminance dans le premier modèle a été améliorée de 1147 lx (modèle de Khadr) à 1185 lx. Ainsi que la valeur maximale dans le deuxième modèle proposé est améliorée de 767 lx (modèle de Mahfouz) à 786 lx.



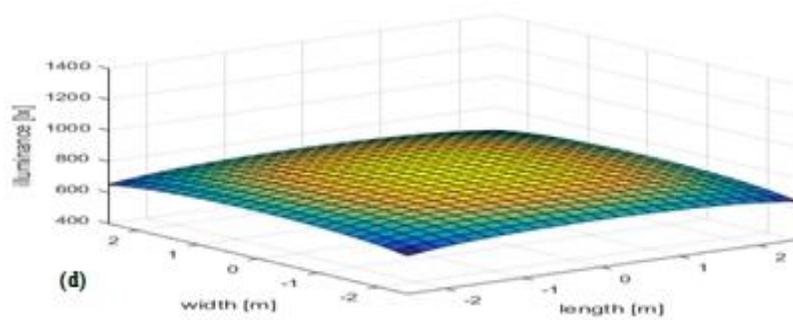


Fig. 3.5. Distribution d'illuminance pour: (a) Modèle Khadr, (b) premier modèle proposé à D=20 cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) deuxième modèle proposé à D=20 cm.

Tableau 3.2 : Distribution d'illuminance horizontale

	Model de Khadr (lux)	Premier modèle proposé (lux)	Model de Mahfouz (lux)	Deuxième modèle proposé (lux)
Max	1147	1185	767	786
Min	793	814	627	649
Moy	999	1034	718	739

3.6.2 Puissance optique reçue

Le tableau 3.3 résume les performances des modèles avec différentes distances verticales, où la puissance reçue minimale, maximale et moyenne en dBm pour chaque modèle est présentée. La puissance moyenne reçue a été améliorée de 0,7695 dBm dans le modèle de Khadr à 1,5112 dBm pour le premier modèle proposé et de -0,2600 dBm dans le modèle le Mahfouz à 0,3736 dBm pour le deuxième modèle proposé. En outre, la puissance minimale reçue a été améliorée de -2,2574 dBm pour modèle de Khadr à -1,5031 dBm pour le premier modèle proposé et aussi, de -0,8975 dBm pour le modèle de Mahfouz à 0,1119 dBm pour le deuxième modèle proposé.

L'analyse des résultats montre que les deux modèles proposés produisent une distribution de puissance reçue améliorée par rapport aux modèles Khadr et Mahfouz.

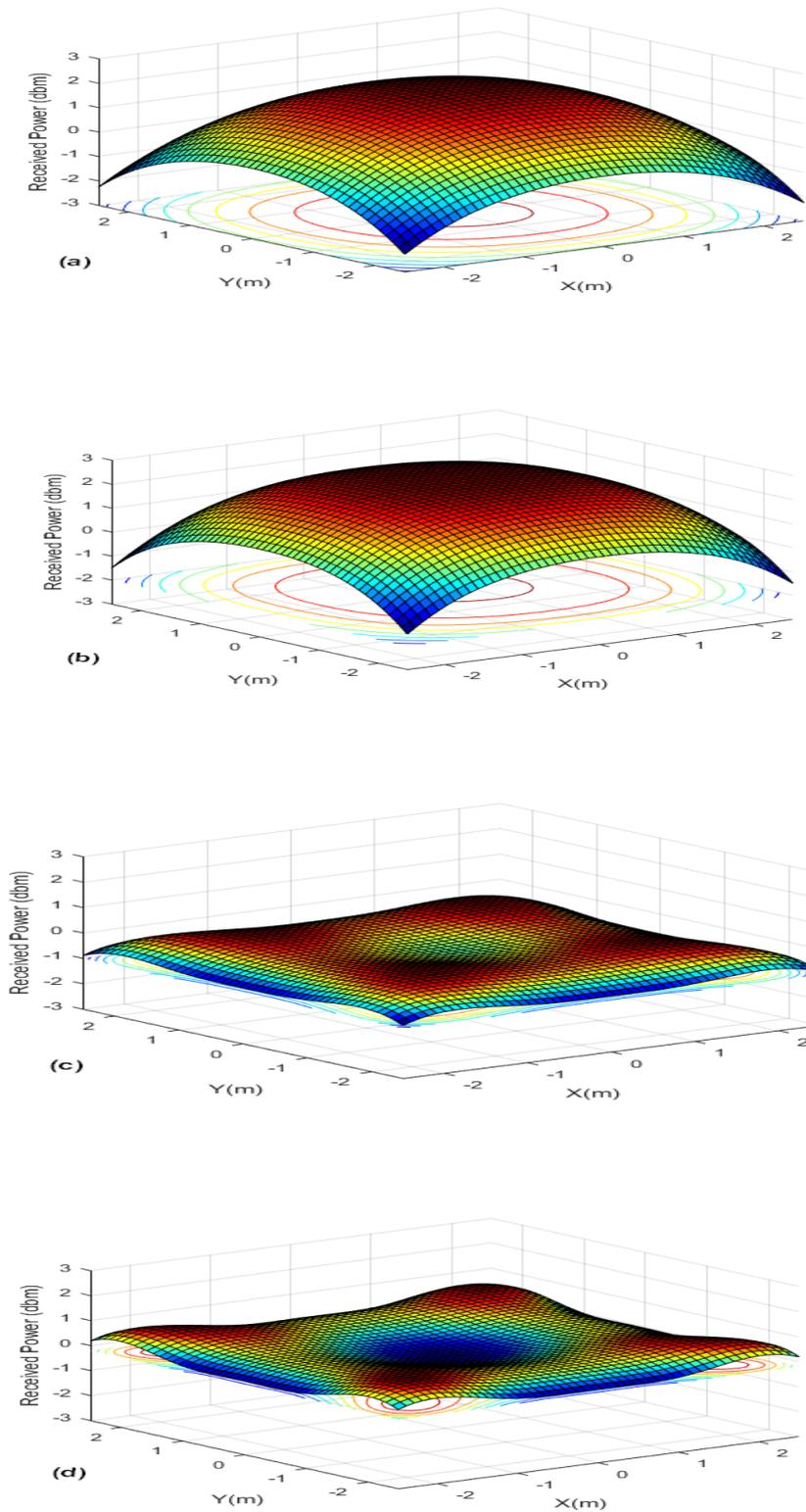


Fig. 3.6. Puissance reçue en dBm : (a) Modèle Khadr, (b) premier modèle proposé à D=20 cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) deuxième modèle proposé à D=20 cm.

Tableau 3.3 : Puissance reçue pour la liaison LOS

	model de Khadr	Premier modèle proposé 1			
	<i>D = 0 cm</i>	<i>D = 5 cm</i>	<i>D = 10 cm</i>	<i>D = 15 cm</i>	<i>D = 20 cm</i>
Max	2.1666	2.2669	2.3694	2.4739	2.5804
Min	-2.2574	-2.0764	-1.8905	2.4739	-1.5031
Moy	0.7695	0.9454	1.1275	1.3160	1.5112
	model de Mahfouz	Deuxième modèle proposé			
	<i>D = 0 cm</i>	<i>D = 5 cm</i>	<i>D = 10 cm</i>	<i>D = 15 cm</i>	<i>D = 20 cm</i>
Max	0.0592	0.2045	0.3670	0.5577	0.7778
Min	-0.8975	-0.6434	-0.4411	-0.2562	0.1119
Moy	-0.2600	-0.1096	0.0460	0.2070	0.3736

3.6.3 Performance SNR du système

La distribution SNR pour les 4 modèles est illustrée à la Fig. 3.7, où elle est assez similaire à la distribution de puissance reçue. En utilisant (3.4), les résultats de comparaison du SNR des quatre modèles sont résumés dans le tableau 3.4.

La fluctuation du SNR est passée de 8,6363 dBm dans le modèle Khadr à 7,9448 dBm pour le premier modèle proposé et de 1,8668 dBm pour le modèle Mahfouz à 1,7378 dBm pour le deuxième modèle proposé. Le premier modèle proposé a produit une distribution SNR maximale, minimale et moyenne plus élevée par rapport au modèle de Khadr, et même constat pour le deuxième modèle proposé en comparaison avec le modèle de Mahfouz. Sachant qu'une valeur plus faible de la fluctuation du SNR implique que le SNR est plus uniformément réparti dans l'ensemble de la pièce.

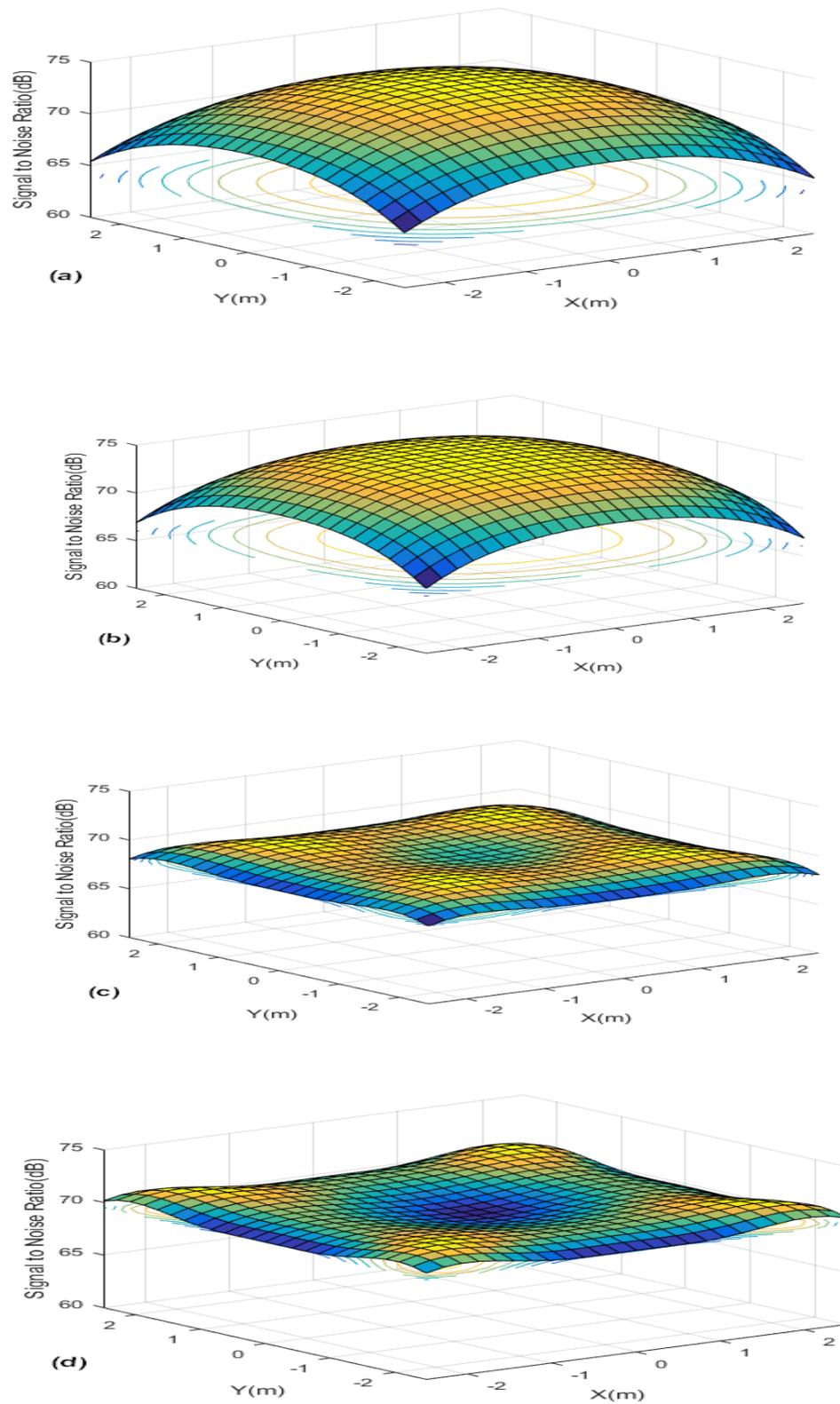


Fig. 3.7. Distribution SNR pour : (a) Modèle Khadr, (b) Premier modèle proposé à $D=20$ cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) Deuxième modèle proposé à $D=20$ cm.

Tableau 3.4 : Les valeurs de SNR

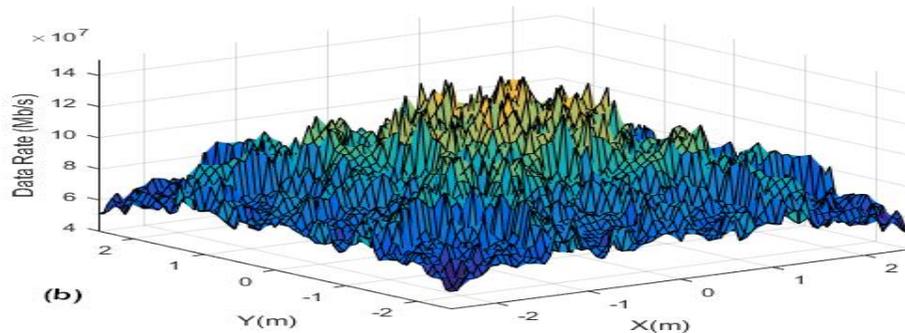
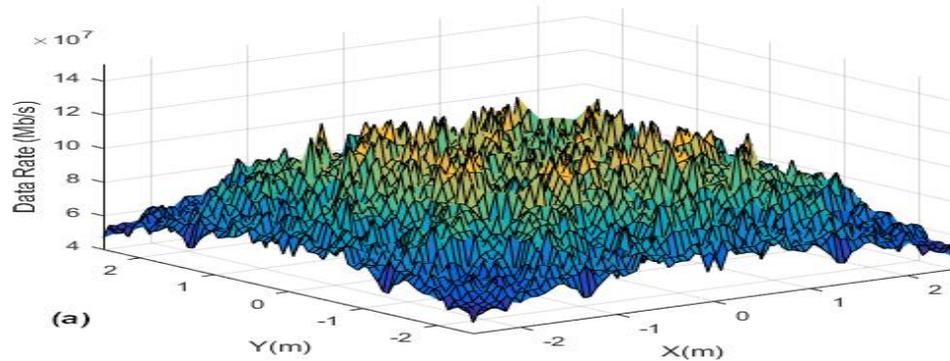
	model de Khadr	Premier modèle proposé			
	<i>D = 0 cm</i>	<i>D = 5 cm</i>	<i>D = 10 cm</i>	<i>D = 15 cm</i>	<i>D = 20 cm</i>
Max	73.9870	74.1796	74.3762	74.5765	74.7805
Min	65.3507	65.7074	66.0736	66.4496	66.8357
Moy	71.1431	71.4862	71.8408	72.2075	72.5866
	model de Mahfouz	Deuxième modèle proposé			
	<i>D = 0 cm</i>	<i>D = 5 cm</i>	<i>D = 10 cm</i>	<i>D = 15 cm</i>	<i>D = 20 cm</i>
Max	69.8918	70.18.3	70.4968	70.8576	71.2969
Min	68.0250	68.5232	68.9198	69.2812	69.5591
Moy	69.2333	69.5313	69.8394	70.1579	70.4874

3.6.4 Propagation du retard quadratique moyen (RMSDS)

Les distributions des retards quadratiques moyens (RMSDS) des quatre modèles sont calculées pour évaluer l'effet des différentes dispositions des LEDs sur le débit des données.

De plus, le débit de données le plus élevé est produit par l'étalement de retard RMS le plus faible, tandis que le débit de données le plus bas est produit par l'étalement de retard RMS le plus élevé. La figure 3.8 montre les valeurs de débit de données obtenues en remplaçant les valeurs RMSDS dans l'équation (3.8), les résultats de RMSDS et de débit de données des quatre modèles sont résumés dans le tableau 3.5. Pour le modèle Khadr, les valeurs minimale et maximale de RMSDS sont respectivement de 0,8554 et 2,1340 ns et pour le premier modèle proposé, les valeurs sont respectivement de 0,7173 et 1,9469 ns. Ces valeurs correspondent aux débits de données de 46,8608 à 116,9002 Mb/s pour le modèle Khadr, et de 51,3631 à 139,4031 Mb/s pour le premier modèle proposé. Les valeurs RMSDS vont de 0,80 à 1,9010 ns pour le modèle Mahfouz, et de 0,5962 à 1,9304 ns pour le deuxième modèle proposé qui correspond à des débits de données allant de 52,6031 à 125 Mb/s pour le modèle de Mahfouz et de 51,8017 à 167,7283 Mb/s pour le modèle proposé 2. Ainsi, les modèles proposés ont une meilleure performance de débit de données en tant que débit de données minimum sur l'ensemble de la pièce et il s'est amélioré de 46,8608 Mb/s pour le modèle Khadr à 51,3631 Mb/s pour le premier modèle proposé 1. Pour le modèle Mahfouz, le

débit de données minimum est assez similaire à celui du deuxième modèle proposé. D'après l'analyse précédente du système des 4 modèles, nous voyons que nos modèles proposés (1 et 2) fournissent de meilleurs résultats que les modèles Khadr [12] et Mahfouz [13] respectivement, que ce soit en puissance reçue, SNR, ainsi que de meilleurs débits de données sont obtenus. Le deuxième modèle proposé présente la meilleure uniformité du système et de meilleurs débits de données par rapport au premier modèle proposé, mais il souffre de la chute au centre de la pièce. Le choix du modèle de pièce utilisé dépend du scénario supposé de la pièce et de son application. Par exemple, si la pièce est un centre de calcul où les bureaux sont répartis uniformément dans toute la pièce, le deuxième modèle proposé sera plus adapté à mettre en œuvre. Tandis que, s'il s'agit d'une salle de conférence, où les utilisateurs sont regroupés autour du centre, le premier modèle proposé serait meilleur car une qualité de communication inutile dans les coins n'affectera personne ; en outre, des débits de données plus élevés pourraient être atteints.



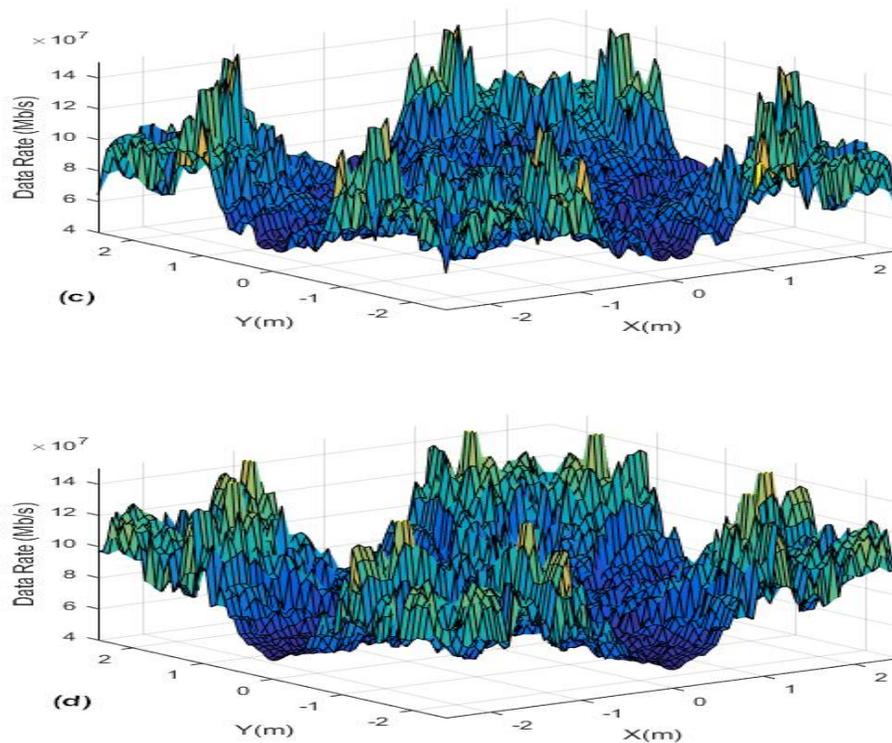


Fig. 3.8. Les valeurs de débit de données pour : (a) Modèle Khadr 1, (b) Premier modèle proposé à $D=20$ cm, (c) Modèle Mahfouz, (d) Deuxième modèle proposé à $D=20$ cm.

Tableau 3.5 : Les valeurs Max et Min du Débit de données et RMSDS

		model de Khadr	Premier modèle proposé			
		$D = 0$ cm	$D = 5$ cm	$D = 10$ cm	$D = 15$ cm	$D = 20$ cm
RMS (ns)	Max	2.1340	2.0288	2.0749	2.2030	1.9469
	Min	0.8554	0.8203	0.7871	0.7665	0.7173
Débit de Donnés(Mbit/s)	Max	116.9002	121.9069	127.0562	130.4610	139.4031
	Min	46.8608	49.2891	48.1960	45.3918	51.3631
		model de Mahfouz	Deuxième modèle proposé			
		$D = 0$ cm	$D = 5$ cm	$D = 10$ cm	$D = 15$ cm	$D = 20$ cm
RMS (ns)	Max	1.9010	1.9262	1.8660	1.9524	1.9304
	Min	0.80	0.6379	0.5701	0.7460	0.5962
Débit de Donnés(Mbit/s)	Max	125	156.771	175.4082	134.0462	167.7283
	Min	52.6031	51.9149	53.5893	51.2183	51.8017

3.7 CONCLUSION

Ce chapitre représente deux nouvelles conceptions d'arrangement de LED proposées et comparées à des modèles similaires existant dans la littérature, pour améliorer l'illuminance, la puissance reçue, la distribution SNR et d'augmenter le débit de données dans la pièce sans aucune LED supplémentaire. Le premier est comparé au modèle Khadr et le second est comparé au modèle Mahfouz. La puissance reçue moyenne a été améliorée de 0,7695 à 1,5112 dBm pour le premier modèle proposé et de -0,26 à 0,3736 dBm pour le deuxième modèle proposé, ainsi que la distribution du SNR a été améliorée. De plus, nos arrangements proposés sont également capables d'améliorer l'ISI. Le débit de données maximum est passé de 116,9002 à 139,4031 Mb/s, et le débit de données minimum a également augmenté de 46,8608 à 51,3631 Mb/s pour le premier modèle proposé, et le débit de données maximum est passé de 125 à 167,7283 Mb/s, et le débit de données minimal a également une valeur appropriée pour le deuxième modèle proposé. Notre travail montre également l'influence de la distance verticale dans l'arrangement des LEDs sur les performances du système. L'augmentation de cette distance de 0 à 20 cm améliore les performances du système. Cette distance verticale proposée dans ce travail est adéquate à la hauteur standard utilisée dans la construction des infrastructures (3m) appliquée dans nos modèles étudiés. Lorsque la hauteur de la pièce augmente (plus de 3 m), cette distance verticale peut être augmentée proportionnellement pour fournir de meilleurs résultats.

Chapitre4

Impact des Paramètres Emetteur/Récepteur sur Le Débit de Données dans un Système de Communication par Lumière Visible MIMO (MIMO-VLC)

4.1 Introduction.....	80
4.2 Présentation du système Etudié	80
4.3 Débit de Données pour les techniques MIMO	81
4.3.1 Diversité Spatial (SD).....	81
4.3.2 Multiplexage spatial (SMP).....	83
4.3.3 Commutation SD/SMP	85
4.3.4 Multiplexage spatial adaptatif (aSMP)	85
4.3.5 Multiplexage spatial adaptatif assisté par la diversité spatiale(SD- aSMP).....	87
4.4 Evaluation et comparaison des performances du système .	90
4.4.1 Configuration de la simulation.....	90
4.5 Résultat et discussion.....	91
4.5.1 Effet de la distance spatiale entre les PDs	92
4.5.2 Effet de la distance spatiale entre les LEDs	93
4.5.3 Effet de l'angle de demi-puissance de la LED.....	95
4.6 Conclusion	100

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous utilisons la technique d'entrées multiples/sorties multiples (MIMO), qui est une technique viable utilisée pour surmonter les inconvénients d'une bande passante limitée, et pour améliorer le débit de données de diodes électroluminescentes blanches (LED) dans un système de communication par lumière visible (VLC), où les LEDs sont utilisées pour fournir simultanément un éclairage et une communication de données.

Les performances du système VLC intérieur dépendent de la distribution de débit de données du côté récepteur. Dans cette étude, nous avons étudié l'effet des trois paramètres Emetteur/Récepteur sur le débit de données dans un système 4×4 MIMO-VLC dans un environnement intérieur, tel que : la distance spatiale entre les quatre photodiodes (PD), la distance spatiale entre les quatre LEDs, ainsi que l'impact de l'angle de demi-puissance de LED.

Exploisons différentes techniques MIMO [209], telles que la diversité spatiale (SD), le multiplexage spatial (SMP), la commutation SD/SMP, le multiplexage spatial adaptatif (aSMP) et le multiplexage spatial adaptatif assisté par SD (SD-aSMP).

4.2 Présentation du Système Etudié

Dans cette section, nous décrivons tout d'abord le modèle mathématique d'un système MIMO-VLC, pour des applications indoor d'une façon générale utilisant la modulation d'intensité et la détection directe (IM/DD). Le système se compose de N_t LEDs comme émetteurs placés au plafond et N_r PDs comme récepteurs.

En raison de bi-fonction des LEDs (l'éclairage et la communication), une polarisation en courant continue (DC) est généralement ajoutée en plus du signal AC pour chaque LED, afin d'obtenir une communication de données sans affecter la fonction d'éclairage primaire des LEDs.

Soit $x = [x_1, x_2, \dots, x_{N_t}]^T$ représente le vecteur de signal OFDM électrique AC transmis. Après la propagation en espace libre, le vecteur de signal reçu $y = [y_1, y_2, \dots, y_{N_r}]^T$ peut être représenté par l'équation (2.37).

Pour décoder avec succès le signal destiné au k -ième utilisateur, le démultiplexage MIMO est d'abord effectué du côté du récepteur en utilisant la matrice de canal estimée. En raison de sa simplicité et de sa faible complexité de calcul, le forçage du zéro (ZF) avec inversion du canal de base est adopté pour effectuer le démultiplexage MIMO [210, 211].

Par conséquent, le vecteur de signal OFDM transmis pour le k -ième utilisateur peut être estimé en multipliant le pseudo-inverse (PI) de H_k avec y_k :

$$x = H^\dagger y = x + H^\dagger n \quad (4.1)$$

où le PI de H_k , c'est-à-dire H^\dagger est donné par :

$$H^\dagger = (H^* H)^{-1} H^* \quad (4.2)$$

4.3 Débits de Données

Nous présentons et analysons le débit de données de différentes techniques MIMO dans un système VLC indoor.

4.3.1 Diversité spatiale (SD)

La technique de transmission MIMO la plus simple est la Diversité spatiale (SD) qui émet simultanément le même signal à partir de tous les émetteurs. Par conséquent, en SD, $x_1 = x_2 = \dots = x_{N_t}$. On sait que la SD permet d'obtenir de bonnes performances dans les communications optiques sans fil en espace libre grâce à la diversité des transmissions [212]. Ainsi, le démultiplexage MIMO n'est pas donc requis dans un système SD-VLC [213]. Selon (2.37), le signal de sortie du r -ième PD dans le système $N_r \times N_t$ SD-VLC peut être décrit comme suit :

$$y_{r,SD} = \sum_{t=1}^{N_t} h_{rt} x_{SD} + n_r \quad (4.3)$$

où h_{rt} est le gain du canal entre le r -ième PD et la t -ième LED, et n_r est le bruit additif du r -ième PD.

A partir de (4.3), le SNR du signal de sortie du r -ième PD dans le système $N_r \times N_t$ SD-VLC est déterminé par la formule suivante :

$$\gamma_{r,SD} = \frac{\left(\sum_{t=1}^{N_t} h_{rt}\right)^2 P_s}{P_n} = \left(\sum_{t=1}^{N_t} h_{rt}\right)^2 \gamma_{tx} \quad (4.4)$$

Comme les signaux de sortie de tous les PDs comprennent le même signal OFDM, la combinaison en diversité peut être utilisée pour obtenir une sortie finale.

Dans ce cas, la combinaison au rapport maximal (MRC) est adoptée en raison de ses performances supérieures en termes de rapport signal/bruit [16]. En utilisant la combinaison MRC, le signal de sortie du $r^{\text{ième}}$ PD est multiplié par un poids :

$$\alpha_r = \gamma_{r,SD} \quad (4.5)$$

Et le signal de sortie final est obtenu en combinant tous les signaux pondérés ensemble.

$$y_{SD} = \sum_{r=1}^{N_r} \alpha_r y_{r,SD} = \sum_{r=1}^{N_r} \left(\alpha_r \sum_{t=1}^{N_t} h_{rt} x_{SD} \right) + \sum_{r=1}^{N_r} (\alpha_r n_r) \quad (4.6)$$

Selon (4.6), le SNR du signal combiné est donné par :

$$\gamma_{SD} = \frac{\left(\sum_{r=1}^{N_r} \left(\alpha_r \sum_{t=1}^{N_t} h_{rt}\right)\right)^2 P_s}{\sum_{r=1}^{N_r} \alpha_r^2 P_n} \quad (4.7)$$

En remplaçant (4.5) dans (4.7), on obtient [213] :

$$\gamma_{SD} = \sum_{r=1}^{N_r} \gamma_{r,SD} = \sum_{r=1}^{N_r} \left(\alpha_r \sum_{t=1}^{N_t} h_{rt}\right)^2 \gamma_{tx} \quad (4.8)$$

Dans ce travail, nous utilisons la modulation OFDM dans le système $N_r \times N_t$ MIMO-VLC, où des polarisations continues (DC) sont additionnées et une contrainte de symétrie hermitienne est imposée, pour obtenir des signaux OFDM non négatifs à valeur réelle compatibles avec les LEDs [214].

D'après (4.8), le débit de données, autrement dit l'efficacité spectrale (bit/s/Hz) du système $N_r \times N_t$ SD-VLC peut être exprimée de la manière suivante :

$$\begin{aligned} R_{SD} &= \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{SD}) \\ &= \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \sum_{r=1}^{N_r} \left(\sum_{t=1}^{N_t} h_{rt} \right)^2 \gamma_{tx} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

où le facteur d'échelle $\frac{1}{2}$ est dû à la contrainte de symétrie hermitienne dans la modulation OFDM, où γ_{tx} représente le SNR transmis.

4.3.2 Multiplexage spatial (SMP)

Une autre technique MIMO bien connue est le multiplexage spatial (SMP). En SMP, chacune des LEDs émettrice transmet simultanément différents flux de données (c'est-à-dire indépendamment les uns des autres) [215], et le démultiplexage MIMO qu'est généralement nécessaire du côté récepteur [210]. Le SMP a donc une efficacité spectrale supérieure à celle du SD et du SM [216]. La figure 4.1 illustre la technique SMP avec quatre configurations d'émetteur. Du côté gauche, le flux de données est inséré dans le système de mappage SMP et deux bits sont sélectionnés pour être transmis par une émetteur LED. Ainsi, pour 2^n configurations, les antennes peuvent transmettre n bits à la fois [217].

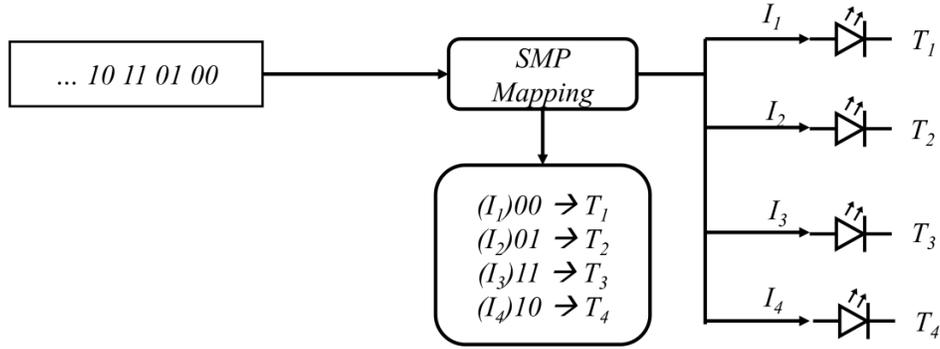


Figure 4.1. Exemple de SMP pour une communication MIMO avec quatre configurations émetteur LED.

Selon (4.1) et (4.2), l'estimation du $t^{\text{ième}}$ flux de données $x_{t,SMP}$ dans le système $N_r \times N_t$ SMP-VLC est donné par :

$$x_{t,SMP} = x_{t,SMP} + \sum_{r=1}^{N_r} h_{tr} n_r \quad (4.10)$$

où h_{tr} représente l'élément de la $t^{\text{ième}}$ ligne et la $r^{\text{ième}}$ colonne de H^\dagger .

D'après (4.10), le SNR de $x_{t,SMP}$ est calculé comme suit :

$$\gamma_{t,SMP} = \frac{P_s}{\sum_{r=1}^{N_r} \tilde{h}_{tr} P_n} = \frac{\gamma_{tx}}{\sum_{r=1}^{N_r} \tilde{h}_{tr}} \quad (4.11)$$

Le débit de données global du système $N_r \times N_t$ SMP-VLC peut être obtenu par la somme des débits de données de tous les flux de données indépendants.

$$R_{SMP} = \sum_{t=1}^{N_t} \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{t,SMP})$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N_t} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_{tx}}{\sum_{r=1}^{N_r} h_{tr}^2} \right) \quad (4.12)$$

4.3.3 Commutation SD/SMP

La commutation SD/SMP ajuste automatiquement les deux modes (SD et SMP) pour atteindre un débit de données plus élevé.

Lorsque le système MIMO-VLC est en mode SD, toutes les LEDs sont utilisées pour transmettre le même flux de données, tandis qu'en mode SMP, différentes LEDs sont utilisées pour transmettre différents flux de données.

Le débit de données est fourni par l'équation suivante :

$$R_{SD/SMP} = \begin{cases} R_{SD}, & \text{si } R_{SD} \geq R_{SMP} \\ R_{SMP}, & \text{si } R_{SD} < R_{SMP} \end{cases} \quad (4.13)$$

4.3.4 Multiplexage spatial adaptatif (aSMP)

Dans un SMP classique, toutes les LEDs sont activées pour transmettre des données, quelle que soit la position spatiale des utilisateurs. Par l'exploitation des positions d'utilisateurs comme un nouveau degré de diversité, une technique aSMP centrée sur l'utilisateur est proposé pour les systèmes VLC intérieurs afin d'améliorer le débit de données.

Dans un aSMP, seul un sous-ensemble des LEDs est activé pour transmettre des flux de données indépendants, cependant les autres sont uniquement utilisées pour l'éclairage.

Pour réaliser une technique aSMP, nous réécrivons la matrice du canal H définie par l'équation (2.38), où l'élément vectoriel $h_t = [h_{1t}, h_{2t}, \dots, h_{N_r t}]^T$ de la matrice du canal H correspond à la $t^{\text{ième}}$ LED. En supposant que k ($1 \leq k \leq N_t$) LEDs sont activées pour la transmission du signal, la dimension de la matrice du canal est, alors, changée de $N_r \times N_t$ à $N_r \times k$ et la matrice de canal résultante L peut être représentée par :

$$L_{N_r \times k} = [l_1, l_2, \dots, l_k] = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{N_r1} & \dots & l_{N_rk} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

D'après (4.12), le débit de données global du système VLC utilisant la technique aSMP avec k LEDs activées est déterminé comme suit :

$$R_{aSMP,k} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^k \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_{tx}}{\sum_{r=1}^{N_r} \tilde{l}_{tr}^2} \right) \quad (4.15)$$

où \tilde{l}_{tr} représente l'élément de la t^{ième} ligne et la r^{ième} colonne de L^\dagger (la pseudo-inverse de L), et L est la matrice de canal $N_r \times k$.

L'idée principale de la technique aSMP est de sélectionner un sous-ensemble de toutes les N_t LEDs pour la transmission du signal qui maximise le débit de données du système VLC. La méthode de sélection des sous-ensembles des LEDs dans aSMP est détaillée et présentée dans l'algorithme 1 [209]. Dans la phase initiale, le vecteur d'index de toutes les LEDs du système VLC est défini par $K = \{1, 2, \dots, N_t\}$ et la matrice du canal H est reformulée comme une combinaison de ses éléments vectoriels, c'est-à-dire $H_c = \{h_1, h_2, \dots, h_{N_t}\}$.

Tout d'abord, nous calculons le vecteur moyen $\epsilon = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{N_t}\}$ de H_c , où ϵ_t ($t = 1, 2, \dots, N_t$) représente la moyenne de h_t . Ensuite, il est classé dans l'ordre décroissant et le vecteur index correspondant $q = \{q_1, q_2, \dots, q_{N_t}\}$ est obtenu. L'itération commence à partir de $k = N_t$, où toutes les LEDs sont sélectionnées et le débit de données correspondant $R_{aSMP,k}$ est déterminé à l'aide de l'équation (4.15).

Après cela, la LED la plus éloignée de l'utilisateur est enlevée du sous-ensemble Q_k de LED, afin de réduire la corrélation des canaux ainsi que l'amplification du bruit. La matrice des canaux est actualisée et le débit de données est alors calculé à l'aide de la matrice des canaux actualisée en conséquence. De cette manière, les LEDs du sous-ensemble Q_k sont supprimées une par une jusqu'à ce qu'il n'en reste plus qu'une.

Par conséquent, le débit de données maximal $R_{aSMP,max}$ du système VLC basé sur la technique aSMP peut être trouvé et son indice correspondant k_{opt} peut être utilisé pour identifier le sous-ensemble optimal Q_{kopt} de LED.

Algorithme 1: Sélection de sous-ensembles de LED dans aSMP
1: Initialiser $K = \{1, 2, \dots, N_t\}, H_c = \{h_1, h_2, \dots, h_{N_t}\}$
2: Calculer le vecteur moyen $\epsilon = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{N_t}\}$ de H_c , où ϵ_t représente la moyenne de h_t , ($t = 1, 2, \dots, N_t$)
3: classé ϵ dans l'ordre décroissant et obtenir le vecteur d'index correspondant
$q = \{q_1, q_2, \dots, q_{N_t}\}$
4: for $k = N_t$ à 2 do
5: if $k = N_t$ then
6: Mettre à jour $L_c = H_c, Q_k = K$
7: Obtenir L en fonction de L_c
8: Calculer $R_{aSMP,k}$ en utilisant (4.15)
9: else
10: Mettre à jour $L_c = L_c - \{h_{q_k}\}, Q_k = Q_k - \{q_k\}$
11: Obtenir L en fonction de L_c
12: Calculer $R_{aSMP,k}$ à l'aide de (4.15)
13: end if
14: end for
15: Obtenir l'indice qui maximise $R_{aSMP,k}$
16: Produire le sous-ensemble optimal Q_{kopt} de LED

4.3.5 Multiplexage spatial adaptatif assisté par la diversité spatiale (SD-aSMP)

Dans la technique aSMP, le nombre des LED activées pour la transmission du signal peut être inférieur au nombre de toutes les LEDs, ce qui indique que certaines LEDs ne sont alimentées que par la tension continue pour l'éclairage. Du point de vue de l'utilisation des ressources, on peut considérer qu'il s'agit d'un gaspillage de ressources puisque ces LEDs sont déjà présentes mais ne sont pas utilisées pour la communication.

Pour utiliser pleinement toutes les ressources, une autre technique MIMO est proposée, appelée Multiplexage spatial adaptatif assisté par la diversité spatiale (SD-aSMP) [209]. Dans la technique SD-aSMP, toutes les LEDs sont activées pour transmettre des signaux et certaines d'entre elles sont utilisées pour transmettre le même flux de données.

Par conséquent, la technique SD-aSMP peut être considéré comme une version modifiée de l'aSMP, où les LEDs désactivées dans l'aSMP sont réactivées pour transmettre le même flux de données qu'une LED activée spécifique, afin d'obtenir un gain de diversité supplémentaire.

Nous supposons ici que les LEDs désactivées sont utilisées pour transmettre le même flux de données que la LED activée, qui est la plus éloignée de l'utilisateur. De cette manière, la puissance reçue du signal transmis par la LED la plus éloignée peut être augmentée efficacement grâce au gain de diversité supplémentaire, et par conséquent, l'effet négatif de l'amplification du bruit peut être réduit par rapport à l'aSMP.

Nous supposons qu'un sous-ensemble de k LEDs est utilisé pour transmettre différents flux de données et que la $z^{\text{ième}}$ LED ($1 \leq z \leq k$) du sous-ensemble est la plus éloignée de l'utilisateur. Par conséquent, la matrice du canal correspondante de ces k LEDs dans le sous-ensemble peut être exprimée par $W_{N_r \times k} = [w_1, \dots, w_z, \dots, w_k]$

En outre, les $N_t - k$ LEDs restantes sont utilisées pour transmettre le même flux de données que la $z^{\text{ième}}$ LED et la matrice du canal relative à ces $N_t - k$ LEDs peut être représentée par

$V_{N_r \times (N_t - k)} = [v_1, v_2, \dots, v_{N_t - k}]$. Par conséquent, la matrice de canal résultante de SD-aSMP est donnée par :

$$F_{N_r \times k} = \begin{bmatrix} w_1, \dots, w_z + \underbrace{\sum_{i=1}^{N_t - k} v_i}_{\text{la } z^{\text{ième}} \text{ colonne}}, \dots, w_k \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

En utilisant le démultiplexage MIMO basé sur ZF, le pseudo-inverse F^\dagger de F peut être obtenu conformément à (4.2). Par conséquent, sur la base de (4.15), le débit de données global du système VLC adoptant SD-aSMP avec k flux de données indépendants est obtenu par :

$$R_{SD-aSMP, k} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^k \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_{tx}}{\sum_{r=1}^{N_r} \tilde{f}_{tr}^2} \right) \quad (4.17)$$

où \tilde{f}_{tr} est l'élément de la $t^{\text{ième}}$ ligne et la $r^{\text{ième}}$ colonne de F^\dagger , c'est-à-dire le pseudo-inverse de F . L'algorithme 2 montre les méthodes détaillées utilisées pour la sélection des sous-ensembles de LED pour la transmission de différents flux de données dans le SD-aSMP, dans lequel $W_c = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ et $V_c = \{v_1, v_2, \dots, v_{N_t-k}\}$. Par conséquent, le sous-ensemble optimal Q_{kopt} de LEDs peut être trouvé pour le système VLC utilisant SD-aSMP afin d'atteindre le débit maximal $R_{SD-aSMP,max}$.

Algorithme 2 : Sélection de sous-ensembles de LED dans SD-aSMP.

```

1: Initialiser  $K = \{1, 2, \dots, N_t\}, \mathbf{H}_c = \{h_1, h_2, \dots, h_{N_t}\}$ 
2: Calculer le vecteur moyen  $\epsilon = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{N_t}\}$  de  $\mathbf{H}_c$ , où  $\epsilon_t$  représente la moyenne
   de  $h_t$ , ( $t = 1, 2, \dots, N_t$ )
3: classé  $\epsilon$  dans l'ordre décroissant et obtenir le vecteur d'index correspondant
 $q = \{q_1, q_2, \dots, q_{N_t}\}$ 
4: for  $k = N_t$  à 2 do
5:   if  $k = N_t$  then
6:     Mettre à jour  $W_c = \mathbf{H}_c, V_c = \emptyset, Q_k = K$ 
7:     Mettre à jour  $F_c$  à l'aide de (4.16)
8:     Obtenir  $\mathbf{F}$  en fonction de  $F_c$ 
9:     Calculer  $R_{SD-aSMP,k}$  en utilisant (4.17)
10:  else
11:    Mettre à jour  $W_c = W_c - \{h_{q_k}\}, V_c = V_c + \{q_k\}$ 
12:     $Q_q = Q_q - \{q_k\}$ 
13:    Mettre à jour  $F_c$  à l'aide de (4.16)
14:    Obtenir  $\mathbf{F}$  en fonction de  $F_c$ 
15:    Calculer  $R_{SD-aSMP,k}$  en utilisant (4.17)
16:  end if
17: end for
18: Obtenir l'indice  $k_{opt}$  qui maximise  $R_{SD-aSMP,k}$ 
19: Sortie du sous-ensemble optimal  $Q_{kopt}$  de LED

```

4.4 ÉVALUATION ET COMPARAISON DES PERFORMANCES DU SYSTÈME

Dans ce système, des simulations numériques ont été utilisées pour évaluer et comparer les performances des différentes techniques MIMO par rapport aux paramètres suivants : la distance entre les LEDs, la distance entre les PDs et l'angle de demi-puissance des LEDs.

4.4.1 Configuration de la simulation

Dans notre simulation, on a utilisé MATLAB comme simulateur et on a considéré un système 4×4 MIMO-VLC, dans laquelle la géométrie de configuration est montrée par la figure 4.2 (a), où $X(m)$, $Y(m)$ et $Z(m)$ sont les coordonnées tridimensionnelles du système. Quatre LEDs (2×2) ont été placées au plafond et l'utilisateur était équipé de quatre PDs (2×2) placés dans le plan récepteur. Les PDs étaient orientés vers le plafond et les LEDs étaient orientées dans la direction opposée.

La figure 4.2 (b) représente le placement des LEDs et des PDs, où d_{LED} représente la distance entre deux LEDs adjacentes et le point (2,5, 2,5 et 3) représente a la fois le centre du plafond et le centre de la matrice de LED. La position d'utilisateur détermine le centre de la matrice du PD et d_{PD} représente la distance entre deux PDs adjacents. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 4.1.

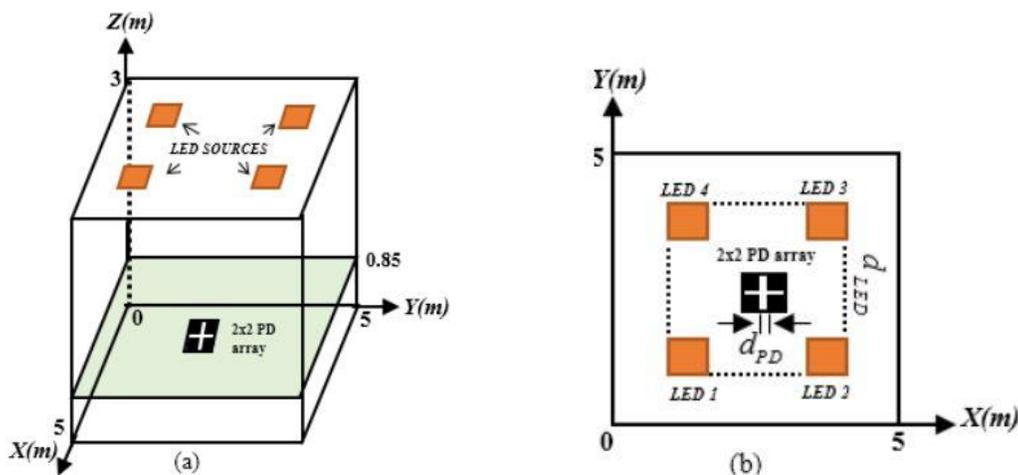


Fig. 4.2. (a) Configuration géométrique et (b) Vue de dessus du système 4×4 MIMO-VLC.

Tableau 4.1 : Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Dimension de la pièce	5 m x 5 m x 3 m
Hauteur du plan de réception	0.85 m
Espacement entre les LED	d_{LED}
Espacement entre PD	d_{PD}
Angle de demi-puissance des LED	$\phi_{1/2}$
Intensité lumineuse maximale de la LED	3000 cd
Gain du filtre optique	0.9
Indice de réfraction de la lentille optique	1.5
Champ de vision à mi-angle de la lentille optique	70°
Sensibilité du PD	0.53 A/W
Surface du détecteur	1 cm ²
Bande passante du signal	20 MHz
DSP du bruit	10 ⁻²² A ² /Hz
Taille de l'IFFT/FFT	128
Nombre de sous-porteuses de données	63
Constellation	BPSK

4.5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans notre système 4 × 4 MIMO-VLC étudié, les débits de données de différentes techniques MIMO ont été discutés.

En considérant uniquement la modélisation LOS du canal, les effets de la modification de la distance entre les PDs, les LEDs et l'angle de demi-puissance ont été évalués. L'objectif principal de cette évaluation était d'étudier l'influence de ces paramètres sur le débit de données. Les résultats de simulation ont été comparés aux résultats disponibles dans la littérature [209].

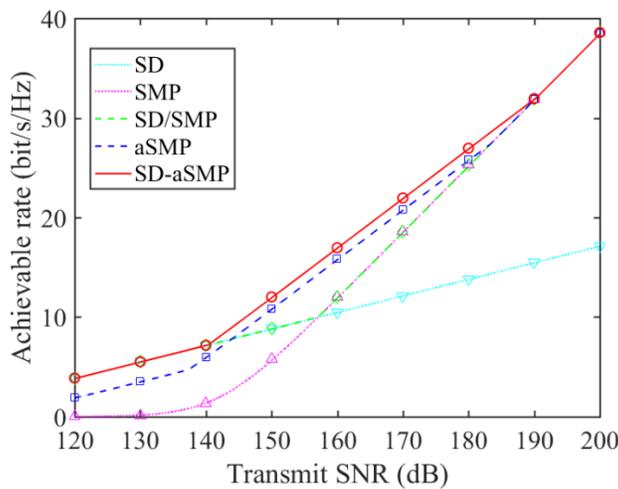
4.5.1 Effet de la distance spatiale entre les PDs

Pour étudier l'impact de la distance spatiale entre les PDs du côté de la réception sur le débit de données, nous avons utilisé des différentes techniques MIMO telles que SD, SMP, commutation SD/SMP, aSMP et SD-aSMP. Ces techniques sont illustrées dans les figures ci-dessous.

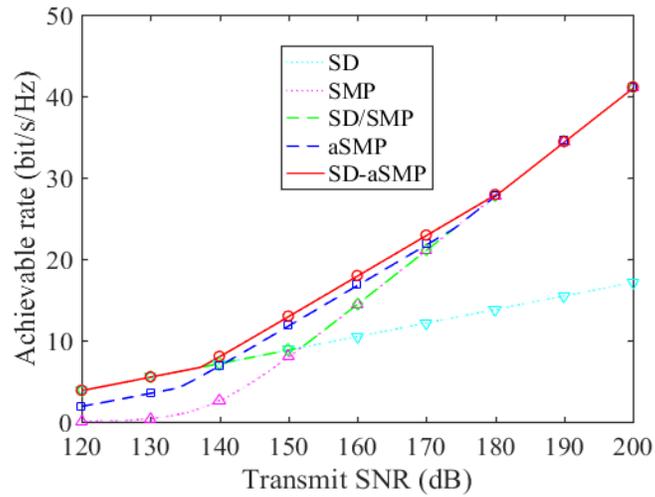
Dans laquelle, la figure 4.3 compare les débits de données de ces techniques MIMO, lorsque l'espacement entre les LEDs est fixé à 3 m, $\phi_{1/2} = 70^\circ$ et que le SNR de transmission est compris entre 120 et 200 dB. Le débit de données pour les différentes techniques MIMO lorsque l'espacement entre PD a été fixé à (a) : $d_{PD} = 20$ cm, (b) : $d_{PD} = 25$ cm (valeur proposé) est illustré à la figure Fig.4.3(a) et Fig.4.3(b) respectivement.

Nous pouvons voir que les débits de données dans toute la pièce pour toutes les techniques MIMO ont été considérablement améliorés dans le cas de l'espacement entre les PDs de 25 cm par rapport à l'espacement de 20 cm. Ce qui a été principalement attribué à la diminution importante de la corrélation des canaux avec l'augmentation de la distance entre les PDs.

Par conséquent, les performances du système dépendaient fortement de la disposition des PDs. Brièvement le débit de données augmente proportionnellement à l'augmentation de l'espacement entre PDs.



(a)



(b)

Fig. 4.3. Comparaison du débit de données pour différentes techniques MIMO avec (a) : $d_{PD} = 20$ cm, (b) : $d_{PD} = 25$ cm.

4.5.2 Effet de la distance spatiale entre LEDs

Pour étudier l'effet de la distance spatiale entre les émetteurs, nous avons fixé la valeur du SNR, l'espacement entre les PDs et l'angle de demi-puissance, mais nous avons varié l'espacement entre LEDs.

La figure 4.4 montre le débit de données en fonction de la distance d_{LED} lorsque le SNR de transmission était fixé à 200 dB, l'espacement entre les PDs est fixé à 20 cm, l'angle de demi-puissance est fixé à 70° , et l'espacement entre LEDs varié de 1 à 4 m. Par conséquent, la valeur d_{LED} optimale qui fournit le débit de données le plus élevé pour toutes les techniques MIMO (à l'exception du modèle SD) a été obtenue à $d_{LED} = 2$ m, tandis que le débit de données du modèle SD a diminué de manière linéaire avec l'augmentation de la valeur d_{LED} .

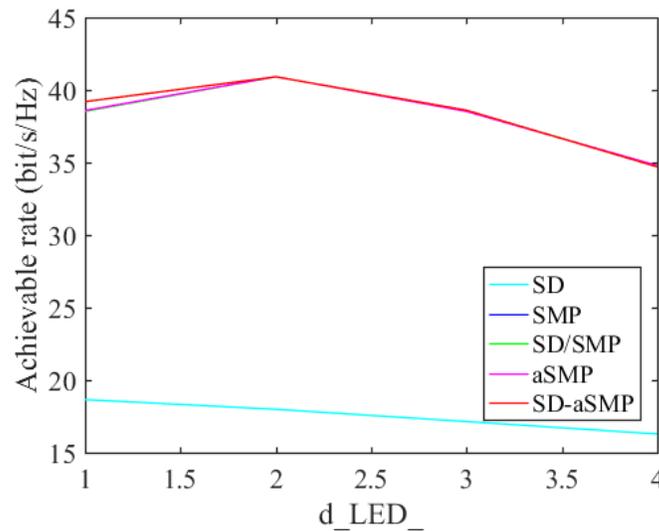
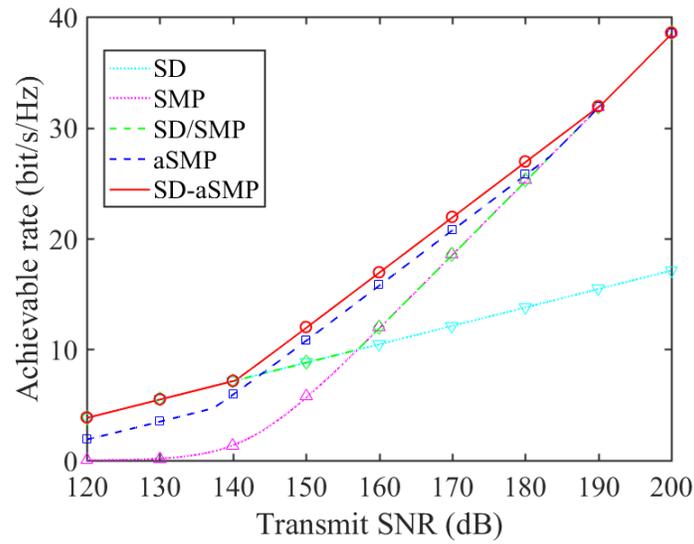
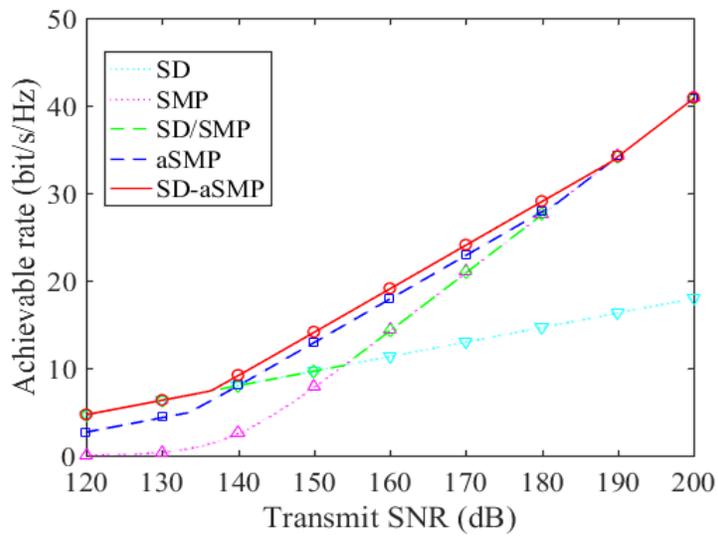


Fig. 4.4. Le débit de données par rapport à la distance entre les LED.

La figure 4.5 montre le débit de données par rapport au SNR transmis pour les techniques MIMO décrites précédemment à $d_{PD} = 20$ cm et $\phi_{1/2} = 70^\circ$, où d_{LED} a été fixé à 3 m dans la Fig. 4.5(a)] et 2 m dans la Fig. 4.5(b) (la valeur optimale obtenue). On peut voir qu'il y a une amélioration du débit de données du système lorsque d_{LED} est optimisé. Par conséquent, nous pouvons conclure que la distance d_{LED} a une influence sur les performances du système. Cependant, cette valeur n'est pas appropriée car elle peut produire des interférences inter-symboles en raison de la réduction de la largeur de la bande de cohérence du canal, elle peut également affecter les exigences d'éclairage à travers la pièce.



(a)



(b)

Fig.4.5. Comparaison du débit de données pour différentes techniques MIMO avec

(a): $d_{LED} = 3$ m, (b) : $d_{LED} = 2$ m.

4.5.3 Effet de l'angle de demi-puissance de la LED

Notre objectif était d'atteindre une valeur optimale de l'angle de demi-puissance LED ($\phi_{1/2}$) de 50° à 70° . Les valeurs inférieures de 50° de $\phi_{1/2}$ ont provoqué une tache lumineuse au sol.

Cependant, les valeurs supérieures à 70° réduisent le niveau de puissance reçue au niveau du PD [218]. De plus, l'angle de demi-puissance de la LED a affecté le motif lambertien de la LED, qui ne convient pas aux systèmes [219]. Selon cette plage, une puissance optique suffisamment élevée et uniforme peut être obtenue à la fois pour l'éclairage et la communication dans les systèmes VLC intérieurs [220].

La figure 4.6 montre le débit de données en fonction de l'angle de demi-puissance de la LED lorsque le SNR transmis a été fixé à 200 dB. La valeur optimale de l'angle de demi-puissance de la LED qui a fourni le débit le plus élevé possible pour toutes les techniques MIMO a été obtenue à $\phi_{1/2} = 58^\circ$. Cet angle optimal a ensuite été utilisé pour démontrer son impact sur les performances du système.

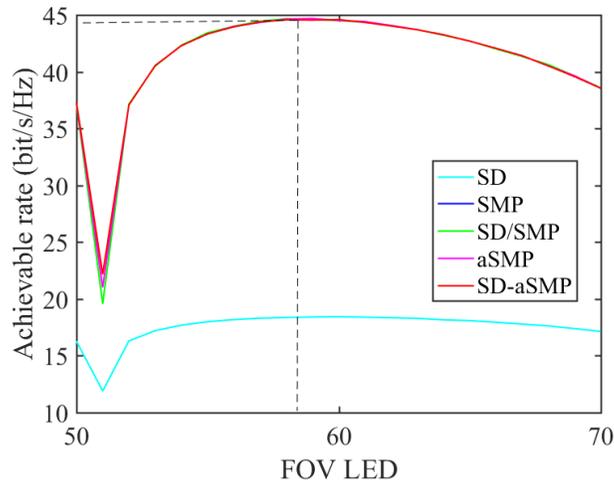
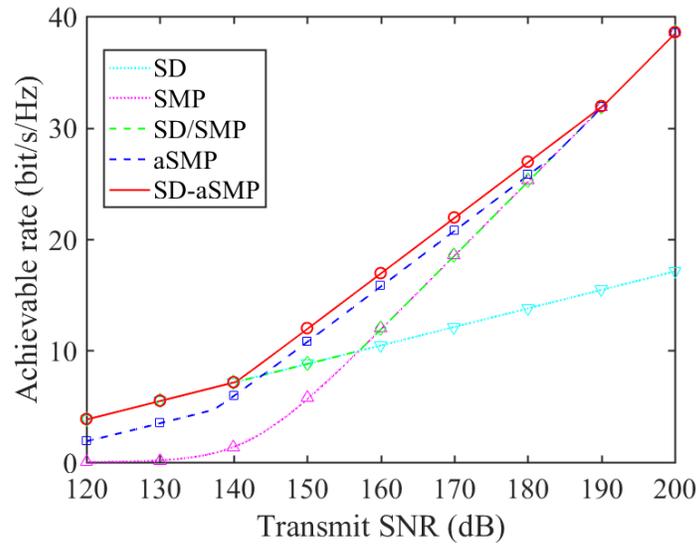


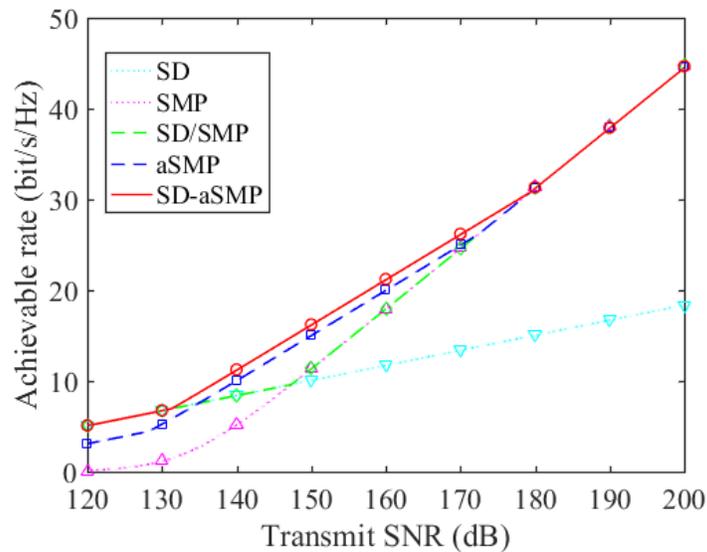
Fig. 4.6. Variation du débit de données par rapport à l'angle de demi-puissance de la LED.

Dans la plage de 120 à 200 dB, la Fig. 4.7 montre le débit de données en fonction du SNR transmis pour les techniques MIMO décrites précédemment à $d_{LED} = 3m$ et $d_{PD} = 20 cm$, où les valeurs $\phi_{1/2}$ ont été fixées à 70° (fig.4.7(a)) et 58° (Fig. 4.7(b), notre angle optimal). On constate que le débit de données du système est amélioré de 38,5 à 45 bits/s/Hz lorsque l'angle de demi-puissance est optimisé de 70° à 58° pour le modèle SD-aSMP à SNR = 200 dB, et une amélioration a été observé dans toutes les autres techniques. Par conséquent, nous pouvons conclure que l'angle de demi-puissance de la LED a un effet significatif sur les performances du

système. En conséquence, l'optimisation proposée donne de meilleures performances du système étudié.



(a)



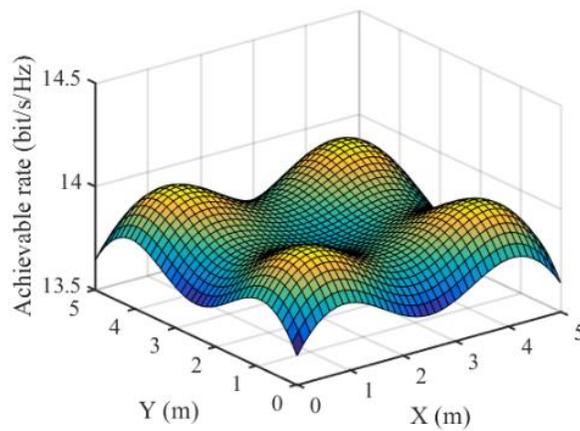
(b)

Fig. 4.7. Comparaison du débit de données pour différentes techniques MIMO avec (a): $\phi_{1/2} = 70^\circ$, (b): $\phi_{1/2} = 58^\circ$.

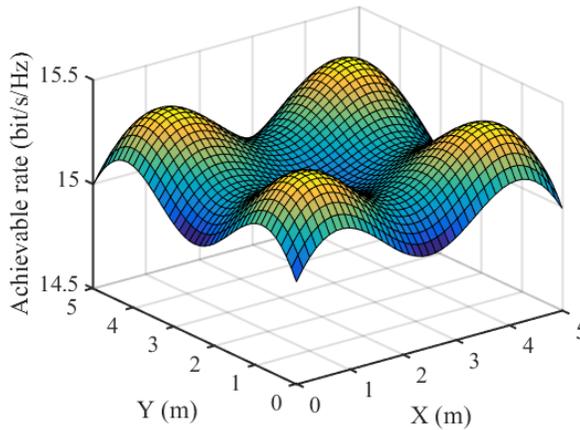
Pour montrer les performances globales des différentes techniques MIMO sur l'ensemble du plan de réception, les distributions des débits de données ont été évaluées sur le plan de réception dans

un système intérieur 4×4 MIMO-VLC, où l'espacement entre les LEDs est de 3 m, l'espacement entre les PDs est de 20 cm et le SNR transmis est fixé à 180 dB.

Les figures 4.8(a) et 4.8(b) montrent les distributions de débit de données en utilisant le modèle SD à $\phi_{1/2} = 70^\circ$ et $\phi_{1/2} = 58^\circ$ (l'angle optimisé), respectivement. Comme on peut le voir, le débit de données maximal a été amélioré de 14 à 15,4 bit/s/Hz, tandis que le débit de données minimal a été amélioré de 13,6 à 15 bit/s/Hz.



(a)

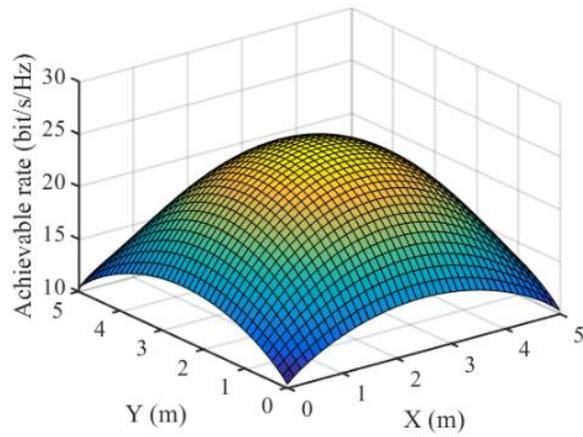


(b)

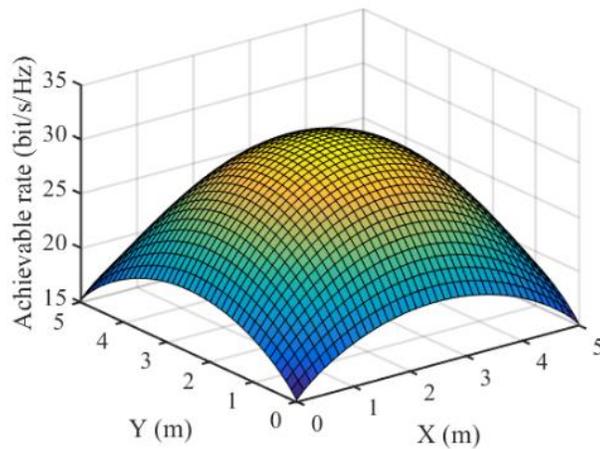
Fig. 4.8. SD Répartition du débit à : (a) $\phi_{1/2} = 70^\circ$, (b) $\phi_{1/2} = 58^\circ$.

Les figures 3.9(a) et 3.9(b) montrent les distributions de débit de données en utilisant le modèle SMP à $\phi_{1/2} = 70^\circ$ et $\phi_{1/2} = 58^\circ$, respectivement. On observe que, le débit de données maximal a été

amélioré de 25,1 à 30,1 bit/s/Hz, tandis que le débit de données minimal a été amélioré de 10,3 à 15,3 bit/s/Hz. Ainsi, nous avons des gains de 1,4 et 5 bit/s/Hz dans les débits de données en utilisant les modèles SD et SMP, respectivement, si le demi-angle LED est optimisé.



(a)



(b)

Fig. 4.9. SMP Répartition du débit à : (a) $\phi_{1/2}=70^\circ$, (b) $\phi_{1/2}=58^\circ$.

4.6 CONCLUSIONS

Dans ce travail, nous avons montré que le débit de données au niveau du récepteur dépend des paramètres d'émetteur/récepteur tels que la distance entre les LEDs, l'angle de demi-puissance des LEDs du côté de l'émetteur et la distance entre les PDs de l'autre côté. Les résultats obtenus prouvent que lorsque la distance entre les LEDs augmente, le débit de données diminue. De plus, si la distance entre les PDs augmente, le débit de données est considérablement amélioré. Lorsque l'angle de demi-puissance de la LED est bien optimisé, il produit des meilleurs résultats, où des gains de 1,4 et 5 bit/s/Hz dans le débit de données ont été obtenus en utilisant les modèles SD et SMP, respectivement. Nous pouvons conclure que les performances du système MIMO-VLC dépendent fortement des paramètres de l'émetteur-récepteur.

Conclusion Générale

Les réseaux 5G sont en cours de déploiement, de nombreux efforts de recherche se concentrent sur "Beyond 5G" et la sixième génération de réseaux cellulaires (6G) afin de répondre à la demande croissante de trafic de données. Dans ce contexte, les communications par lumière visible (VLC) suscitent un intérêt croissant en tant qu'intégration potentielle dans les futures technologies sans fil. Les VLC offrent des avantages significatifs tels qu'une large bande passante sans licence, une immunité aux interférences électromagnétiques, une excellente efficacité énergétique, et une installation économique, ce qui les rend complémentaires aux systèmes RF en environnement intérieur. Cependant, les VLC sont confrontées à divers défis qui limitent leur débit de données compétitif. Ces obstacles incluent les limitations des LED blanches bon marché, tels que leur non-linéarité qui entraîne des distorsions significatives du signal d'information, ainsi que la bande de modulation limitée du composant. Cette thèse vise à étudier la technologie de communication par lumière visible (VLC), afin d'exploiter son potentiel, notamment en environnement intérieur. Plus précisément, la recherche rapportée dans cette thèse a abordé cet objectif en étudiant, analysant et évaluant les techniques de transmission à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) pour les systèmes VLC. Cette démarche est motivée par le succès enregistré dans l'utilisation de la technologie MIMO dans les communications RF, où elle a été utilisée pour améliorer les performances du système en termes de capacité et/ou de fiabilité de la transmission sans fil.

Nous avons débuté dans le premier chapitre par ; une généralité sur la communication par lumière visible. Ainsi on a discuté son principe de fonctionnement. De plus on a cité quelques avantages qui le rendent attirante, suivi par les différents domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit l'architecture d'un system VLC, qui contient les différentes composantes, tel qu'émetteur, récepteur et le canal de transmission. Nous avons abordé les différents types de bruit, les techniques de modulation numérique, et la technique MIMO Optique.

Dans le troisième chapitre nous avons commencé par une évaluation des performances du système VLC sur la base des arrangements tridimensionnelle des LEDs, puis on a présenté la configuration des modèles proposés. Ensuite on a évalué et discuté les performances des

systèmes proposés en terme de: distribution d'illuminance horizontale, puissance optique reçue, performance SNR du système et propagation du retard quadratique moyen (RMSDS) tous ces critères de performance sont améliorés dans la pièce sans aucune LED supplémentaire.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié l'effet des paramètres Emetteur/Récepteur sur le débit de données dans un système de communication par lumière visible MIMO (MIMO-VLC), dans lequel nous avons présenté le système étudié. Nous avons aussi cité le débit de données des divers techniques MIMO. Les résultats montrent que les paramètres Emetteur/Récepteur ont une influence significative sur la performance du système, dont les meilleurs résultats sont obtenus s'ils sont bien optimisés.

Voici quelques points qui pourraient constituer des perspectives pour nos futures recherches sur la technologie MIMO dans les communications par lumière visible (VLC) :

- La communication LOS (Line-of-Sight) est très importante en VLC, car le signal direct peut fournir une communication à haut débit. Les surfaces intelligentes réfléchissantes peuvent aider à atteindre l'utilisateur avec un signal direct. Le modèle de canal est très complexe et nécessite une étude plus approfondie.
- Pour augmenter la connectivité des appareils IoT, le MIMO en VLC peut contribuer à augmenter la bande passante. Cependant, de nouveaux protocoles doivent être étudiés pour permettre une utilisation interchangeable des marges RF et VLC.
- La modulation CAP (Carrierless Amplitude/Phase) est considérée comme une alternative à la modulation DCO-OFDM en communication par lumière visible (VLC). La modulation DCO-OFDM présente effectivement un rapport élevé entre la puissance de crête et la puissance moyenne (PAPR), ce qui peut poser des défis en termes d'amplification de puissance et de linéarité des amplificateurs de transmission. En revanche, la modulation CAP offre une PAPR réduite, ce qui la rend attrayante pour les systèmes MIMO VLC intérieurs. La réduction de la PAPR permet à une utilisation plus efficace de la puissance d'émission, réduit les distorsions non linéaires et améliore la qualité du signal transmis. Par conséquent, la modulation CAP est considérée comme une option prometteuse pour améliorer les performances des systèmes MIMO VLC intérieurs par rapport à la modulation DCO-OFDM.

- La compression de données est une technique couramment utilisée pour réduire la taille des données à transmettre, le temps de transfert donc une moindre consommation énergétique, ce qui peut être bénéfique dans les systèmes MIMO VLC où une grande quantité de données peut être générée. Il est important de noter que la DCT est seulement l'une des nombreuses techniques de compression disponibles. D'autres méthodes, telles que la compression par transformée en ondelettes ou la compression basée sur des algorithmes de codage spécifiques, peuvent également être considérées en fonction des besoins et des performances souhaitées dans un système MIMO VLC.

Bibliographie

1. X. Chen, D. W. K. Ng, W. Yu, E. G. Larsson, N. Al-Dhahir and R. Schober, "Massive Access for 5G and Beyond," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 3, pp. 615-637, March 2021, doi: 10.1109/JSAC.2020.3019724.
2. G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato and F. Adachi, "6G: Opening New Horizons for Integration of Comfort, Security, and Intelligence," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 5, pp. 126-132, October 2020, doi: 10.1109/MWC.001.1900516.
3. F. Miramirkhani, M. Karbalayghareh, E. Zeydan, R. Mitra, "Enabling 5G indoor services for residential environment using VLC technology," *Phys. Commun.*, 53, 101679. 2022.
4. Cisco, U. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper; Cisco: San Jose, CA, USA, 2020.
5. D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally and R. Parthiban, "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649-1678, thirdquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2417576.
6. M. A. S. Sejan, R. P. Naik, B. G. Lee and W. -Y. Chung, "A Bandwidth Efficient Hybrid Multilevel Pulse Width Modulation for Visible Light Communication System: Experimental and Theoretical Evaluation," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 1991-2004, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3217778.
7. L.U. Khan, "Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges," *Digit. Commun. Netw.* vol. 3, pp.78–88, **2017**.
8. A. Jovicic, J. Li and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26-32, December 2013, doi: 10.1109/MCOM.2013.6685754.
9. GlamoX. *LED and lifetime*. Available: <https://glamoX.com/uk/led-and-lifetime>.
10. International Energy Agency. *Lighting sales by type in the Sustainable Development Scenario, 2010-2030*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/lighting-sales-by-type-in-the-sustainable-development-scenario-2010-2030>. last update 2020.
11. United States Department of Energy, "Energy savings forecast of solid-state lighting in general illumination applications." September 2016, Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/energysavingsforecast16_2.pdf.
12. H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "VLC: Beyond point-to-point communication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 7, pp. 98–105, 2014.
13. H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, D. O'Brien, and G. Faulkner, "Indoor gigabit optical wireless communications: challenges and possibilities," in *Proceedings of the 12th International Conference on Transparent Optical Networks*, Munich, Germany, 2010, pp. 1–6.
14. "Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 11: Wireless lan medium access control (mac)and physical layer (phy) specifications amendment 5:

- Enhancements for higher throughput,” IEEE Std 802.11n-2009 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, and IEEE Std 802.11w-2009), pp. 1–565, Oct 2009.
15. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “LTE,” <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, Accessed: 2019.
 16. T. Fath and H. Haas, “Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 2, pp. 733–742, 2013.
 17. P. Lorenz and L. Hamada, “LiFi Towards 5G: Concepts Challenges Applications in Telemedicine,” *Second International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS)*, pp. 123-127, 2020.
 18. L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira and O. Gnawali, “Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges,” in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3204-3237, 2019.
 19. S.U. Rehman, S. Ullah, P.H.J. Chong, S. Yongchareon, D. Komosny, “Visible Light Communication: A System Perspective—Overview and Challenges,” *Sensors* 2019, 19, 1153. <https://doi.org/10.3390/s19051153>.
 20. T.-C. Yu, W.-T. Huang, W.-B. Lee, C.-W. Chow, S.-W. Chang, H.-C Kuo, “Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications,” *Crystals* 2021, 11, 1098.
 21. K. James Singh, et al., “Micro-LED as a Promising Candidate for High-Speed Visible Light Communication,” *Appl. Sci.* 2020,10, 7384.
 22. S.P. Najda, et al., “GaN Laser Diode Technology for Visible-Light Communications,” *Electronics* 2022, 11, 1430.
 23. F.M. MIMS, “Alexander Graham Bell and the photophone: the centennial of the invention of light-wave communications, 1880–1980. *Opt. News* 1980, 6, 8–16.
 24. Visible Light Communications Association. Available online: <http://vlca.net/standard> (accessed on 10 October 2018).
 25. H. Haas, “High-speed wireless networking using visible light,” *SPIE Newsroom*, vol. 1, pp. 1-3, 2013.
 26. H. Le Minh *et al.*, “100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED,” in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 15, pp. 1063-1065, Aug.1, 2009.
 27. J. Armstrong, A.J. Lowery, “Power efficient optical OFDM,” *Electron. Lett.* **2006**, 42, 1.
 28. D. O’Brien, “High speed optical wireless demonstrators in the OMEGA project: Summary and conclusions,” *Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications & 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OC&I)*, Graz, Austria, 2013, pp. 159-162.
 29. J. -P. Javaudin, M. Bellec, D. Varoutas and V. Suraci, “OMEGA ICT project: Towards convergent Gigabit home networks,” *2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes, France, pp. 1-5, 2008.
 30. J. -P. Javaudin and M. Bellec, “OMEGA project: On Convergent Digital Home Networks,” *2011 Third International Workshop on Cross Layer Design*, Rennes, France, pp. 1-5, 2011.

31. J. Vučić, C. Kottke, S. Nerreter, K. -D. Langer and J. W. Walewski, "513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 24, pp. 3512-3518, Dec.15, 2010.
32. H. Haas, L. Yin, Y. Wang and C. Chen, "What is LiFi?," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, 15 March15, 2016.
33. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," in *IEEE Std 802.15.7-2011* , vol., no., pp.1-309, 6 Sept. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195.
34. A. H. Azhar, T. -A. Tran and D. O'Brien, "A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 171-174, Jan.15, 2013.
35. Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi and N. Chi, "8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC System Employing High-Order CAP Modulation and Hybrid Post Equalizer," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1-7, Dec. 2015.
36. H. Chun *et al.*, "LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 13, pp. 3047-3052, 1 July1, 2016.
37. R. Bian, I. Tavakkolnia and H. Haas, "15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 10, pp. 2418-2424, 15 May, 2019.
38. Y. Zhou, X. Zhu, F. Hu, J. Shi, F. Wang, P. Zou, J. Liu, F. Jiang, and N. Chi, "Common-anode LED on a Si substrate for beyond 15 Gbit/s underwater visible light communication," *Photonics Res.* 7, 1019–1029, 2019.
39. H. Kazemi, E. Sarbazi, M. D. Soltani, M. Safari and H. Haas, "A Tb/s Indoor Optical Wireless Backhaul System Using VCSEL Arrays," *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, London, UK, pp. 1-6, 2020.
40. Y. Hong, et al, "Demonstration of >1Tbit/s WDM OWC with wavelength-transparent beam tracking-and-steering capability, " *Opt. Express*, 29, 33694–33702, **2021**.
41. M.D. Soltani, et al, "Terabit Indoor Laser-Based Wireless Communications: LiFi 2.0 for 6G, " *arXiv* **2022**, arXiv:2206.10532.
42. C. He, C. Chen, "A Review of Advanced Transceiver Technologies in Visible Light Communications, " *Photonics*. 2023; 10(6):648. <https://doi.org/10.3390/photonics10060648>.
43. A. Chaabna," Visible Light Communication System: Simplified Architecture and Energetic Efficiency of Positioning System," these, Université 8 Mai 1945 Guelma ,2019.
44. T. Kishi, H. Tanaka, Y. Umeda, and O. Takyu, "A high-speed LED driver that sweeps out the remaining carriers for visible light communications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 239–249, Jan. 15, 2014.
45. A. B. Siddique and M. Tahir, "Joint rate-brightness control using variable rate MPPM for LED based visible light communication systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 9, pp. 4604–4611, Sep. 2013.
46. L. Zeng et al., "High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 9, pp. 1654–1662, Dec. 2009.

47. T.-C. Lin et al., "Large-signal modulation performance of light-emitting diodes with photonic crystals for visible light communication," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, no. 10, pp. 4375–4380, Oct. 2018.
48. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, "IARC Classifies Radio Frequency Electromagnetic Fields as Possible Carcinogenic to Humans", Press Release No. 208, 31 May 2011.
49. A-M. CĂILEAN, "Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field," THÈSE, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2014.
50. L. Feng, R. Q. Hu, J. Wang, P. Xu, and Y. Qian, "Applying VLC in 5G networks: Architectures and key technologies," *IEEE Network*, vol. 30, no. 6, pp. 77–83, 2016.
51. Ji R, Wang S, Liu Q, Lu W, "High-Speed Visible Light Communications: Enabling Technologies and State of the Art," *Applied Sciences*. 8(4):589, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8040589>
52. Y. Zhuang et al., "A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1963-1988, 2018.
53. F. Ahmed-Zaid, F. Bai, S. Bai et al., "Vehicle safety communications-applications (VSC-A) final report," Technical report, U.S. Department of Transportation (DOT) National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA, 2011).
54. World Economic Forum. , "Connected world transforming travel, transportation and supply chains insight report," Technical report, World Economic Forum In collaboration with The Boston Consulting Group, 2013.
55. S. Fuada, A. P. Putra, Y. Aska and T. Adiono, "International Journal of Recent Contributions from Engineering , " Science & IT (iJES), " 5, 14-30 (2017).
56. J. Luo, L. Fan and H. Li, "Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2871-2893, Fourthquarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2743228.
57. A. Chaabna et al., "Indoor positioning system based on low complexity hybrid algorithm using VLC," INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMMUNICATION TECHNOLOGY, COMPUTING AND ENGINEERING (ICACTCE 2021).
58. H.M. Oubei, et al., "4.8 gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication", *Opt. Express*, 23, pp. 23302–23309, 2015.
59. W. O. Popoola, E. Poves and H. Haas, "Error Performance of Generalised Space Shift Keying for Indoor Visible Light Communications," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 5, pp. 1968-1976, May 2013, doi: 10.1109/TCOMM.2013.022713.120501.
60. G. Schirripa Spagnolo, L. Cozzella, F. Leccese, , "Underwater Optical Wireless Communications: overview," Multidisciplinary Digital Publishing Institute, pp. 1–14, 2020.
61. D. Witters, S. Seidman, H. Bassen, "EMC and wireless healthcare," *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Beijing, China, 2010, pp. 5-8, doi: 10.1109/APEMC.2010.5475637.
62. S. J. Demeffo, "Dispositif communicant par optique sans fil pour les transmissions audio à l'intérieur du cockpit d'un avion," Université de Limoges, 2020.

63. S. M. Kannan *et al.*, "Towards Industry 4.0: Gap Analysis between Current Automotive MES and Industry Standards Using Model-Based Requirement Engineering," *2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW)*, Gothenburg, Sweden, 2017, pp. 29-35, doi: 10.1109/ICSAW.2017.53.
64. Y. Lu, K.C. Morris, S. Frechette., "Current standards landscape for smart manufacturing systems, " *Natl. Inst. Stand. Technol. NISTIR 2016, 8107*, 39.
65. H. Kagermann, R. Anderl, J. Gausemeier, G. Schuh, W. Wahlster, J. Winter., "Industrie 4.0 in a Global Context: Strategies for Cooperating with International Partners (Acatech STUDY) , " *Herbert Utz Verlag: München, Germany, 2016*.
66. P. Wilke Berenguer *et al.*, "Optical Wireless MIMO Experiments in an Industrial Environment," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 1, pp. 185-193, Jan. 2018, doi: 10.1109/JSAC.2017.2774618.
67. E. W. Lam and T. D. C. Little, "Visible Light Positioning for Location-Based Services in Industry 4.0," *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, 2019, pp. 345-350.
68. Y. Almadani, D. Plets, S. Bastiaens, W. Joseph, M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari, , "Visible Light Communications for Industrial Applications—Challenges and Potentials," *Electronics* 2020, 9, 2157. <https://doi.org/10.3390/electronics9122157>
69. A. Chaabna, A. Babouri, H. Chouabia², T. Hafsi, Z. E. Meguetta and X. Zhang, " Prototype of mobile robot Controlled via VLC technology for Industry 4.0 applications, " *2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, Konya, Turkey, October, 2022*.
70. L. Hamada, "Conception d'une architecture supportant la technologie Li-Fi," *L'UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE*, 2022.
71. IEEE Std. 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std. 802.15.7-2011). IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications, 2019.
72. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). ITU-T GG.9991 Std.. High-speed indoor visible light communication transceiver – System architecture, physical layer and data link layer specification, 2019.
73. IEEE Std. 802.15.13 WPAN Task Group. Multi-gigabit/s optical wireless communications. Available: <https://www.ieee802.org/15/pub/tg13.html>.
74. IEEE Std. 802.11.bb Task Group on Light Communications. IEEE 802.11 Light Communications Amendment. Available: https://www.ieee802.org/11/reports/tgbb_update.htm.
75. H. Haas, "Wireless data from every light bulb," TED Talk. Available: https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb
76. S. Yahia, Y. Meraihi, A. Ramdane-Cherif, A. B. Gabis, D. Acheli and H. Guan, "A survey of channel modeling techniques for visible light communications", *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 194, Nov. 2021.
77. A.-M. Cailean, "Study, implementation and optimization of a visible light communications systems. Application to automotive field.", PhD thesis, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Dec. 2014.
78. GlamoX. LED and lifetime. Available: <https://glamoX.com/uk/led-and-lifetime>.
79. J. Cho, J. H. Park, J. K. Kim, and E. F. Schubert, "White light-emitting diodes: History, progress, and future, " *Laser & Photonics Reviews*, vol. 11, p. 1600147, 2017.

80. Z. Ghassemlooy, L. N. Alves, S. Zvanovec, and M. A. Khalighi, "Visible Light Communications: Theory and Applications," CRC Press, 2017.
81. I. Lu, C. Lai, C. Yeh, and J. Chen, "6.36 Gbit/s RGB LED-based WDM MIMO visible light communication system employing OFDM modulation," In 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), pages 1–3, 2017.
82. C. Kottke, J. Hilt, K. Habel, J. Vučić and K. -D. Langer, "1.25 Gbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary," *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, Amsterdam, Netherlands, pp. 1-3, 2012, doi: 10.1364/ECEOC.2012.We.3.B.4.
83. G. Cossu, R. Corsini, A. M. Khalid and E. Ciaramella, "Bi-directional 400 Mbit/s LED-based optical wireless communication for non-directed line-of-sight transmission," *OFC 2014*, San Francisco, CA, USA, pp. 1-3, 2014, doi: 10.1364/OFC.2014.Th1F.2.
84. G. Cossu, A. Wajahat, R. Corsini, and E. Ciaramella, "5.6 Gbit/s downlink and 1.5 Gbit/s uplink optical wireless transmission at indoor distances (≥ 1.5 m)," in Proc. Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), pp. 1–3, Sep. 2014.
85. B. A. Vijayalakshmi and N. N. Sudha, "A Novel Approach to Using Energy-Efficient LED-Based Visible Light Communication in Hospitals", *Intelligent and Efficient Electrical Systems: Selected Proceedings of ICIEES'17*. Springer Singapore, vol 446, pp. 197-204, 2018.
86. Z. N. Chaleshtori, P. Chvojka, S. Zvanovec, Z. Ghassemlooy and P. A. Haigh, "A Survey on Recent Advances in Organic Visible Light Communications," *2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, Budapest, Hungary, pp. 1-6, 2018, doi: 10.1109/CSNDSP.2018.8471788
87. P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari and I. Papakonstantinou, "Visible light communications using organic light emitting diodes," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 8, pp. 148-154, August 2013, doi: 10.1109/MCOM.2013.6576353.
88. H. Chun, C. -J. Chiang, A. Monkman and D. O'Brien, "A Study of Illumination and Communication using Organic Light Emitting Diodes," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 22, pp. 3511-3517, 2013, doi: 10.1109/JLT.2013.2284247.
89. Z. N. Chaleshtori, A. Burton, Z. Ghassemlooy and S. Zvanovec, "A Flexible OLED based VLC Link with m-CAP Modulation," *2019 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, Graz, Austria, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/ConTEL.2019.8848543.
90. P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, I. Papakonstantinou and H. Le Minh, "2.7 Mb/s With a 93-kHz White Organic Light Emitting Diode and Real Time ANN Equalizer," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 17, pp. 1687-1690, Sept.1, 2013, doi: 10.1109/LPT.2013.2273850.
91. P. Q. Thai, N. T. Thanh, S. Shigeru, J. Liu and Z. Wende, "127.5 kbps Transmission using OLED with 7 kHz 3dB modulation bandwidth in visible light communication system," *2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, pp. 389-393, 2015, doi: 10.1109/ATC.2015.7388358.

92. P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy and I. Papakonstantinou, "1.4-Mb/s White Organic LED Transmission System Using Discrete Multitone Modulation," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 6, pp. 615-618, March 15, 2013, doi: 10.1109/LPT.2013.2244879.
93. C. Lee *et al.*, "26 Gbit/s LiFi System With Laser-Based White Light Transmitter," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 5, pp. 1432-1439, 1 March 1, 2022, doi: 10.1109/JLT.2021.3124942.
94. K. O. Akande and W. O. Popoola, "Impact of timing jitter on the performance of carrier amplitude and phase modulation," *2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE)*, Newcastle Upon Tyne, UK, pp. 259-263, 2016, doi: 10.1109/ICSAE.2016.7810199.
95. C. -H. Yeh, C. -W. Chow and L. -Y. Wei, "1250 Mbit/s OOK Wireless White-Light VLC Transmission Based on Phosphor Laser Diode," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1-5, June 2019, Art no. 7903205, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2911411.
96. Y-C. Chi, et al. , " Phosphorous Diffuser Diverged Blue Laser Diode for Indoor Lighting and Communication," *Sci Rep* 5, 18690, 2015.
97. F. Zafar, M. Bakaul and R. Parthiban, "Laser-Diode-Based Visible Light Communication: Toward Gigabit Class Communication," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 144-151, February 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1500672CM.
98. C He, C Chen, "A Review of Advanced Transceiver Technologies in Visible Light Communications, " *Photonics*. 2023, 10(6):648. <https://doi.org/10.3390/photonics10060648>
99. Y Zhou et al , " Comparison of nonlinear equalizers for high-speed visible light communication utilizing silicon substrate phosphorescent white LED ". *Opt. Express*, vol. 28, no. 2, pp. 2302–2316, **2020**.
100. Y. Wei Ji, G. Feng Wu, C. Wang and E. Feng Zhang, "Experimental study of spad-based long distance outdoor vlc systems", *Optics Communications*, vol. 424, pp. 7-12, 2018.
101. X. Huang *et al.*, "2.0-Gb/s Visible Light Link Based on Adaptive Bit Allocation OFDM of a Single Phosphorescent White LED," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 1-8, Oct. 2015, Art no. 7904008, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2480541.
102. Z. W. Huang, J. Shi, Y. Wang, and N. Chi, "1.6 Gbit/s phospho-rescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver," *Opt.Express*, vol. 23, pp. 22034–42, 2015.
103. F. Xu *et al.*, "High Bandwidth Semi-Polar InGaN/GaN Micro-LEDs With Low Current Injection for Visible Light Communication," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1-4, Feb. 2023, Art no. 7300704, doi: 10.1109/JPHOT.2023.3235108.
104. P. Qiu, S. Zhu, Z. Jin, X. Zhou, X. Cui, and P. Tian, "Beyond 25 Gbps optical wireless communication using wavelength division multiplexed LEDs and micro-LEDs," *Opt. Lett.*, vol. 47, no. 2, pp. 317–320, Jan. 2022, doi: 10.1364/OL.447540.
105. Y. -H. Chang *et al.*, "4.343-Gbit/s Green Semipolar (20-21) μ -LED for High Speed Visible Light Communication," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 1-4, Aug. 2021, Art no. 7300204, doi: 10.1109/JPHOT.2021.3092878.

106. M. S. Islim et al., "Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED," *Photon. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. A35–A43, Apr. 2017.
107. K. Yoshida, et al., "245 MHz bandwidth organic light-emitting diodes used in a gigabit optical wireless data link," *Nat. Commun.*, 11, 1171, **2020**.
108. A. Minotto et al., "Visible light communication with efficient far-red/near-infrared polymer light-emitting diodes," *Light. Sci. Appl.*, 9, 70, **2020**.
109. P. A. Haigh *et al.*, "Wavelength-Multiplexed Polymer LEDs: Towards 55 Mb/s Organic Visible Light Communications," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1819-1828, Sept. 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2432491.
110. S. Muthu, F. J. P. Schuurmans and M. D. Pashley, "Red, green, and blue LEDs for white light illumination," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 333-338, March-April 2002, doi: 10.1109/2944.999188.
111. Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, "Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®," CRC Press, 2013.
112. P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu and P. Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047-2077, Fourth quarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2476474.
113. C. C. Davis, "Lasers and electro-optics: fundamentals and engineering," Cambridge University Press, Cambridge, 2 edition, 2013.
114. S. Demiguel, Ning Li, Xiaowei Li et al., "Very high responsivity evanescently coupled photodiodes integrating a short planar multimode waveguide for high-speed applications," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 12, pp. 1761–1763, 2003.
115. K. Kato, A. Kozen, Y. Muramoto, Y. Itaya, T. Nagatsuma, and M. Yaita, "110-GHz, 50%-efficiency mushroom-mesa waveguide p-i-n photodiode for a 1.55- μm wavelength," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 719–721, 1994.
116. Farag Ibrahim Khalifa Mousa, "Secure Visible Light Communication Systems Based on the Position of the User," Doctoral thesis, Northumbria University, 2017.
117. K. Shiba, T. Nakata, T. Takeuchi, T. Sasaki, and K. Makita, "10 Gbit/s asymmetric waveguide APD with high sensitivity of -30 dBm," *Electronics Letters*, vol. 42, no. 20, pp. 1177- 1178, 2006.
118. A. Kumar, S.K. Ghorai, "Effect of LED Radiation Pattern on BER Performance in Indoor Multipath MIMO-VLC System," *Wireless Pers Commun* 113, 2009–2026 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07305-2>
119. H. Elgala, R. Mesleh and H. Haas, "Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1127-1134, August 2009, doi: 10.1109/TCE.2009.5277966.
120. T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004, doi: 10.1109/TCE.2004.1277847.
121. J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, Feb. 1997, doi: 10.1109/5.554222.

122. C.R. Lomba, R.T. Valadas, A. de Oliveira Duarte, " Efficient simulation of the impulse response of the indoor wireless optical channel," *Int. J. Commun. Syst.* 13 (7–8) (2000) 537–549.
123. J. R. Barry, J. M. Kahn, W. J. Krause, E. A. Lee and D. G. Messerschmitt, "Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 367-379, April 1993, doi: 10.1109/49.219552.
124. S. Dimitrov and H. Haas, "Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi, " Cambridge University Press, 2015.
125. L. Seongsu and J. Sung-Yoon, "Location awareness using angle-of-arrival based circular-PD-array for visible light communication," presented at the 18th Asia- Pacific Conference on Communications (APCC), 2012.
126. P. Lou, H. Zhang, X. Zhang, M. Yao, and Z. Xu, "Fundamental analysis for indoor visible light positioning system," in 2012 1st IEEE International Conference on Communications in China Workshops (ICCC), pp. 59-63, 2012.
127. D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "Light fidelity (li-fi): Towards all-optical networking," vol. 9007, 12 2013, p. 900702.
128. Xiaotong Shen, " Vehicular Visible Light Communications , " Doctoral thesis, Edinburgh. University, 2021
129. HAMMED GBOLAHAN OLANREWAJU, " A Study of MIMO Techniques for Optical Wireless Communications," Doctoral thesis, Edinburgh. University, 2019.
130. N. Chi, M. Zhang, Y. Zhou, and J. Zhao, "3.375-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing PAM-8 modulation with phase shifted Manchester coding," *Optics express*, vol. 24, pp. 21663-21673, 2016.
131. M. Zhang *et al.*, "4.05-Gb/s RGB LED-based VLC system utilizing PS-Manchester coded Nyquist PAM-8 modulation and hybrid time-frequency domain equalization," *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Los Angeles, CA, USA, pp. 1-3, 2017.
132. M. A. Kashani and M. Kavehrad, "On the performance of single-and multi-carrier modulation schemes for indoor visible light communication systems", in 2014 IEEE Global Communications Conference, pp. 2084–2089 Dec. 2014. doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037115.
133. R. v. Nee and R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", 1st. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2000, ISBN: 0890065306.
134. S. Vappangi, V. Mani, "Concurrent illumination and communication: A survey on visible light communication", *Physical Communication*, vol 33 pp.90–114, 2019.
135. S. Vappangi, V.M. Vakamulla, "Channel estimation in aco-ofdm employing different transforms for vlc", *AEU - Int. J. Electron. Commun.* 84 (2018) 111–122, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2017.11.016>,
136. R. Mesleh, H. Elgala, H. Haas, "On the performance of different ofdm based optical wireless communication systems", *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Networking* 3 (8) (2011) 620–628, <http://dx.doi.org/10.1364/JOCN.3.000620>.
137. P. Chvojka, et al., "On the m-CAP performance with different pulse shaping filters parameters for visible light communications," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, pp. 1-12, 2017.

138. F. Wu, et al., "Performance comparison of OFDM signal and CAP signal over high capacity RGB-LED-based WDM visible light communication," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, pp. 7901507-7901507, 2013.
139. P. A. Haigh, et al., "A multi-CAP visible-light communications system with 4.85-b/s/Hz spectral efficiency," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, pp. 1771-1779, 2015.
140. K. Werfli, et al., "Experimental Demonstration of High-Speed 4× 4 Imaging Multi-CAP MIMO Visible Light Communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, pp. 1944-1951, 2018.
141. M. S. M. Akram, L. G. D. Aravinda, M. K. P. D. Munaweera, G. M. R. I. Godaliyadda and M. P. B. Ekanayake, "Camera based visible light communication system for underwater applications", *International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, pp. 1-6, 2017.
142. Nuttapol PRAYONGPUN, "Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation", These, Université Joseph Fourier – Grenoble1, le 29 avril 2009.
143. Didier Le Ruyet et Berna Özbek, "Systèmes MIMO et codage spatio-temporel", CNAM, 292 rue Saint Martin, 75141 Paris Cedex 3, France.
144. C. W. Hsu, C. W. Chow, I. C. Lu, Y. L. Liu, C. H. Yeh, and Y. Liu, "High speed imaging 3 × 3 MIMO phosphor white light LED based visible light communication system," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 6, pp. 1–6, 2016.
145. P. Saengudomlert, "Transmit beamforming for line-of-sight MIMO VLC with IM/DD under illumination constraints," in *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 1–4, Hua Hin, Thailand, 2015.
146. R. Mesleh, H. Elgala, and H. Haas, "Optical spatial modulation," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 3, 2011.
147. Y.-Y. Zhang, H.-Y. Yu, J.-K. Zhang, Y.-J. Zhu, J.-L. Wang, and T. Wang, "Full large-scale diversity space codes for MIMO optical wireless communications," in *2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, vol. 2015, pp. 1671–1675, Hong Kong, China, 2015.
148. J. M. Kahn, R. You, P. Djahani, A. G. Weisbin, Beh Kian Teik, and A. Tang, "Imaging diversity receivers for high-speed infrared wireless communication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 12, pp. 88–94, 1998.
149. X. Zhong, C. Chen, S. Fu, X. Jian and M. Liu, "Generalized Spatial Multiplexing for Optical Wireless Communication Systems," *2020 12th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, Macao, China, 2020, pp. 23-27, doi: 10.1109/ICAIT51223.2020.9315500
150. Y. J. Zhu, W. F. Liang, J. K. Zhang, and Y.-Y. Zhang, "Space collaborative constellation designs for MIMO indoor visible light communications, " *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 15, pp. 1667–1670, 2015.
151. A. Khalid, H. M. Asif, S. Mumtaz, S. Al Otaibi, and K. Konstantin, "Design of MIMO-visible light communication transceiver using maximum rank distance codes," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 89128–89140, 2019.
152. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: a communication theory perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.

153. R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial Modulation – A New Low Complexity Spectral Efficiency Enhancing Technique," in IEEE International Conference on Communication and Networking in China (CHINACOM), Beijing, China, Oct. 25–27, 2006, pp. 1–5.
154. R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial Modulation," IEEE Trans. on Veh. Tech., vol. 57, no. 4, pp. 2228 – 2241, Jul. 2008.
155. M. Di Renzo, H. Haas, and P. M. Grant, "Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: a survey," Communications Magazine, IEEE, vol. 49, no. 12, pp. 182 –191, 2011.
156. M. Wolf, L. Grobe, M. R. Rieche, A. Koher and J. Vučić, "Block transmission with linear frequency domain equalization for dispersive optical channels with direct detection," *2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks*, Munich, Germany, 2010, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICTON.2010.5549129.
157. L. Grobe and K. -D. Langer, "Block-based PAM with frequency domain equalization in visible light communications," *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Atlanta, GA, USA, 2013, pp. 1070-1075, doi: 10.1109/GLOCOMW.2013.6825134.
158. N. Kaur and L. Kansal, "Performance comparison of MIMO systems over AWGN and Rician channels with Zero Forcing receivers," *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)* vol. 5, p. 12, February 2013.
159. K. D. Kulat and D. Shalke, "Performance analysis of ZF and MMSE receiver algorithm," *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, vol. 03, p. 10, Jan 2015 2015.
160. S. Adnan, N. U. Rehman, and M. I. Zahoor, "Effect of different modulation techniques comparison of linear MIMO receivers," *International Journal of Computer Applications* vol. 121, p. 5, July 2015.
161. 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 Journal of Optical Communications and Networking, vol. 7, no. 5, pp. 489–495, May 2015, ISSN: 1943-0620. doi: 10.1364/JOCN.7.000489.
162. N. Karafolas and D. Uttamchandani, "Optical fiber code division multiple access networks: A review", *Optical Fiber Technology*, vol. 2,no. 2,pp. 149-168, 1996, ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1006/ofte.1996.0017>.
163. M. F. Guerra-Medina, O. Gonzalez, B. Rojas-Guillama, J. A. Martin-Gonzalez, F. Delgado, and J. Rabadan, "Ethernet-ocdma system for multi-user visible light communications", *Electronics Letters*, vol. 48,no. 4,pp. 227-228, Feb. 2012, ISSN: 0013-5194. DOI: 10.1049/el.2011.4035.
164. Y. Qiu, S. Chen, H. Chen, and W. Meng, "Visible light communications based on cdma technology", *IEEE Wireless Communications*, vol. 25,no. 2,pp. 178-185, Apr.2018, ISSN: 1536-1284. doi: 10.1109/MWC.2017.1700051.
165. J. Dang and Z. Zhang, "Comparison of optical ofdm-idma and optical ofdma for uplink visible light communications", in *2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Oct. 2012, pp. 1-6. DOI: 10.1109/WCSP.2012.6542858.
166. M. Ergen, "Principles of ofdma", in *Mobile Broadband: Including WiMAX and LTE*. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 177-220, ISBN: 9780387681924. DOI: 10.1007/978\0\387\68192\4\5.

167. H. Haas, E. Sarbazi, H. Marshoud, and J. Fakidis, "Visible-light communications and light fidelity," in *Optical Fiber Telecommunications VII*. New York, NY, USA: Academic Press, 2020, ch. 11, pp. 443–493.
168. D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network," *Optics express*, vol. 23, no. 2, pp. 1627–1637, Jan. 2015.
169. M.H. Rahman, et al., "Multi-User Joint Detection Using Bi-Directional Deep Neural Network Framework in NOMA-OFDM System," *Sensors* 2022, 22, 6994. <https://doi.org/10.3390/s22186994>.
170. L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, I. Chih-lin and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, September 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349.
171. B. Lin, Z. Ghassemlooy, X. Tang, Y. Li and M. Zhang, "Experimental demonstration of optical MIMO NOMA-VLC with single carrier transmission", *Opt. Commun.*, vol. 402, pp. 52-55, Nov. 2017.
172. J. Shi, Y. Hong, J. He, R. Deng and L. -K. Chen, "Experimental Demonstration of OQAM-OFDM based MIMO-NOMA over Visible Light Communications," *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, San Diego, CA, USA, 2018, pp. 1-3.
173. M. K. Jha, N. Kumar and Y. V. S. Lakshmi, "NOMA MIMO Visible Light Communication with ZF-SIC and MMSE-SIC," *2020 2nd PhD Colloquium on Ethically Driven Innovation and Technology for Society (PhD EDITS)*, Bangalore, India, 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/PhDEDITS51180.2020.9315316.
174. V. S. Rajput, D. R. Ashok and A. Chockalingam, "MU-MIMO NOMA with Linear Precoding Techniques in Indoor Downlink VLC Systems," *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128391.
175. V. Dixit, A. Kumar, "Error analysis of L-PPM modulated MIMO based multi-user NOMA-VLC system with perfect and imperfect SIC, " *Appl. Opt.* 2022, 61, 858–867. doi: 10.1364/AO.440511.
176. A. Technologies and M. Rumney," *LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges*", 2nd. Wiley Publishing, 2013, ISBN: 1119962579, 9781119962571.
177. Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser mimo channels", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004, ISSN: 1053-587X. DOI: 10.1109/TSP.2003.821107.
178. R. Zhang, "Cooperative multi-cell block diagonalization with per-base-station power constraints", in *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, Apr. 2010, pp. 1-6. DOI: 10.1109/WCNC.2010.5506527.
179. V. Nguyen, L. Tran, T. Q. Duong, O. Shin, and R. Farrell, "An efficient precoder design for multiuser mimo cognitive radio networks with interference constraints", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 3991-4004, May 2017, ISSN: 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2016.2602844.
180. Merah, Mounir Mohammedi. "Conception and realization of an indoor multi-user Light-Fidelity link. (Conception et réalisation d'un lien Light-Fidelity multi-utilisateur en intérieur)." PhD thesis, Université de Paris-Saclay, Dec. 2019.
181. R. Sharma, "Performance Evaluation and Optimization of Indoor Visible Light Communication Systems," THE NORTHCAP UNIVERSITY GURUGRAM – 122017, 2020.

182. R. Mitra and V. Bhatia, "Precoding technique for ill-conditioned massive MIMO-VLC system," in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference,(IEEE 2018), pp.1–5, 2018.
183. W. Yun, L. Tian, W. Hongtoa, and N. Guoqiang, "A new design of light source arrangements for indoor visible light communication," The 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2016), pp. 705-709, 2016
184. H.Q. Nguyen, et al, "A matlab-based simulation program for indoor visible light communication system," Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. (CSNDSP), 2010 7th Int. Symp., vol. 3600, no. April 2016, pp. 537–541, 2010.
185. T. Ganjian, G. Baghersalimi and Z. Ghassemlooy, "Performance evaluation of the received power based on the transmitter position in a visible light communications system," 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, 2017, pp. 1763-1768,
186. M. Ivan and R. Tzonchev, "Effects on illumination uniformity due to dilution on arrays of LEDs," In Non imaging Optics and Efficient Illumination Systems, vol. 5529, pp. 268-276, International Society for Optics and Photonics, Sep 2004.
187. H. Yang, J. W. Bergmans, T. C. Schenk, J.-P. Linnartz, and R. Rietman, "Uniform illumination rendering using anarray of LEDs: A signal processing perspective," Signal Processing, IEEE Transactions on 57, no. 3, pp. 1044-1057, Mar 2009.
188. A. Burton, H. Le Minh, Z. Ghasemlooy and S. Rajbhandari, "A study of LED lamination uniformity with mobility for visible light communications, " 2012 International Workshop on Optical Wireless Communications, IEEE, pp. 1-3, Oct 2012.
189. W. Zixiong, Y. Changyuan, Z. Wen-De, C. Jian, and C. Wei, "Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems" Optics Express, vol. 20, no. 4, pp. 4564-4573, 2012
190. A. Chaabna, A. Babouri, X. Zhang, and S Laifa, "Performance evaluation of illuminance based on LEDs spacing in indoor positioning system based on VLC" Third International Conference on Technological Advances in Electrical Engineering (ICTAEE'18.), 2018
191. M. H. Khadr, H. A. Fayed, A. Abd El Aziz and M. H. Aly, "Bandwidth extension of an enhanced SNR with a higher light uniformity of a phosphorescent white LED based visible light communication system," 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Prague, pp. 1-6, 2016.
192. E.M. Nouran, A.F. Heba, A .A. Ahmed, and A.A. Moustafa, "Improved light uniformity and SNR employing new LED distribution pattern for indoor applications in VLC system". Opt Quantum Electron. vol. 50, no. 9, p. 350, 2018.
193. C. Halim, B. Abdesselam, L. Abdelaziz, C. Ameer and Z. Xun, "3D Arrangement of LEDs for Indoor VLC Applications," 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/BMSB49480.2020.9379553.
194. D. Wu, "Cellular indoor optical wireless communication system," PhD, Physical ans Electrical, Northumbria university, 2013.

195. A. C. Boucouvalas, "IEC 825-1 eye safety classification of some consumer electronic products," in IEE Colloquium on Optical Free Space Communication Links, 1996, pp. 13/1-13/6.
196. I. E. Commission, "Standard: IEC 60825-1: safety of laser products-part 1: equipment classification and requirements," ed, 2014, p. 224.
197. D. Tronghop, J. Hwang, S. Jung, Y. Shin and M. Yoo, "Modeling and analysis of the wireless channel formed by LED angle in visible light communication," *The International Conference on Information Network 2012*, pp. 354-357, 2012.
198. J. M. Senior, *Optical Fiber Communications Principles and Practice*. Pearson Education Limited, 2011.
199. D. Wu, Z. Ghassemlooy, H. Le Minh, S. Rajbhandari, A. C. Boucouvalas, "Improvement of the transmission bandwidth for indoor optical wireless communication systems using a diffused Gaussian beam," *IEEE Communications Letters*. vol. 16, no. 8, p. 1316–1319, 2012.
200. Y. Qiu, H-H. Chen and W-X. Meng, "Channel modeling for visible light communications a survey", *wireless communications and mobile computing*, Wiley Online Library, Feb. 2016.
201. P. Boyce, P. Raynham, *SLL Lighting Handbook*, CIBSE, The Society of Light and Lighing, UK, 2009.
202. P. Raynham, *The SLL Code for Lighting*, CIBSE, The Society of Light and Lighing, UK, 2012.
203. M. Kafafy, Y. Fahmy, and M. Khairy, "Multi-cell VLC system design under illumination and communication constraints," *Optical Switching and Networking*, vol. 34, p. 23-34, 2019.
204. M. D. Higgins, R. J. Green, and M. S. Leeson, "A genetic algorithm method for optical wireless channel control," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 6, p. 760–772, 2009.
205. T. Komine, J. H. Lee, S. Haruyama and M. Nakagawa, "Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 6, pp. 2892-2900, 2009.
206. D. Wu, Z. Ghassemlooy, H. Le-Minh, S. Rajbhandari and L. Chao, "Channel characteristics analysis of diffuse indoor cellular optical wireless communication systems," *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP)*, pp. 1-6, 2011.
207. J. M. Kahn, W. J. Krause and J. B. Carruthers, "Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1613-1623, 1995.
208. N. Lorrière, "Cellules photovoltaïques pour la récupération d'énergie et la communication de données," *Micro et nanotechnologies/Microélectronique*. Aix-Marseille Université (AMU); IM2NP - Aix Marseille Université, 2019.
209. C. Chen, H. Yang, P. Du, W. D. Zhong, A. Alphones, Y. Yang, and X. Deng, "User-centric MIMO techniques for indoor visible light communication systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 14, no. 3, pp. 3202–3213, 2020.
210. A. Burton, H. Minh, Z. Ghassemlooy, E. Bentley, and C. Botella, "Experimental demonstration of 50-Mb/s visible light communications using 4 x 4 MIMO," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 9, pp. 945–948, May 2014.

211. J. Grubor, S. Randel, K. Langer, and J.W. Walewski, "Broadband Information Broadcasting Using LED-Based Interior Lighting", *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 24, pp. 3883–3892, 2008. DOI: 10.1109/JLT.2008.928525
212. S. M. Navidpour, M. Uysal, and M. Kavehrad, "BER Performance of Free-Space Optical Transmission with Spatial Diversity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 8, pp. 2813–2819, Aug. 2007.
213. P. Djahani and J. M. Kahn, "Analysis of infrared wireless links employing multibeam transmitters and imaging diversity receivers," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 12, pp. 2077–2088, Dec. 2000.
214. C. Chen, W. De. Zhong, and D. Wu, "Non-Hermitian symmetry orthogonal frequency division multiplexing for multiple-input multiple-output visible light communications," *J.Opt. Commun. Netw.*, vol.9, no. 1, pp. 36-44, Jan 2017.
215. H. Bolcskei, "MIMO-OFDM wireless systems: Basics, perspectives, and challenges," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 4, pp. 31–37, 2006.
216. C. He, T.Q. Wang, and J. Armstrong, "Performance comparison between spatial multiplexing and spatial modulation in indoor MIMO visible light communication systems, " In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 22–27; pp. 1–6, May 2016.
217. M.A.S. Sejan, M.H. Rahman, M.A. Aziz, D. S. Kim, Y. H. You, and H. K. Song, "A Comprehensive Survey on MIMO Visible Light Communication: Current Research, Machine Learning and Future Trends, ". *Sensors* vol. 23, no. 2, pp. 01–2, Jan 2023.
218. F. Madani, G. Baghersalirni, and Z. Ghassemlooy, "Effect of Transmitter and Receiver Parameters on the Output Signal to Noise Ratio in Visible Light Communications, ", in *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 2111–2116, 2017.
219. S. Shekhar, A.Kumar, and S.K. Ghorai, "Analysis of ICA MIMO-OFDM VLC System with Different FOV Based Photodetectors," *Proc. of 2nd IEEE Int. Conf. on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, India, pp. 982–986, 2017.
220. R. Raj, S.Jaiswal, and A. Dixit, "Optimization of LED Semi-Angle in Multipath Indoor Visible Light Communication Links," *IEEE Int. Conf. on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, Goa, India, pp. 1–6, 2019.

Publications et communications

Publication internationale:

- Ameer Chaabna, Abdesselam Babouri, Xun Zhang, Chuanxi Huang, **Halim Chouabia**, "New indoor positioning technique using spectral data compression based on VLC for performance improvement" *Optical and Quantum Electronics* 52 (7), 343, 2020.
- **Halim Chouabia**, Abdesselam Babouri, Ameer Chaabna, Xun Zhang, Jamel Nebhen, Zine Eddine Meguetta, "IMPACT OF TRANSCEIVER PARAMETERS ON THE ACHIEVABLE DATA RATE IN MIMO VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM", *Telecommunications and Radio Engineering* Volume 80, 2021 Issue 7 pp. 35-50

Communication internationale:

- **Chouabia Halim**, Babouri Abdesselam, Ladjimi Abdelaziz, Chaabna Ameer, Zhang Xun, " 3D Arrangement of LEDs for Indoor VLC Applications", Conference: IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB 2020) Paris, France, October 2020, DOI: 10.1109/BMSB49480.2020.9379553.
- Ameer Chaabna, Abdesselam Babouri, **Chouabia Halim**, Takoua Hafsi, Zine-Eddine Meguetta, Xun Zhang, "Experimental Demonstration of V2V Communication System based on VLC Technology for Smart Transportation ", 5th International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic System IC-AIRES2021, At: Tipasa, ALGERIA, 2021.
- Chaabna Ameer, Babouri Abdesselam, Ladjimi Abdelaziz, **Chouabia Halim**, Takoua Hafsi,,Zhang Xun, "Indoor positioning system based on low complexity hybrid algorithm

using VLC", : International Conference on Advances in Communication Technology, Computing and Engineering (ICACTCE 2021),Morocco

- A. Chaabna, A. Babouri, **H. Chouabia**, T. Hafsi,Z. E. Meguetta and X. Zhang, " Prototype of mobile robot Controlled via VLC technology for Industry 4.0 applications, " 2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, Konya, Turkey, October, 2022.