

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

TELLACHE Mohamed & SADEKI Nesrine

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

---

# Optimisation de la planification des réseaux de communications basés sur la lumière visible dans un milieu intérieur

---

Soutenu le 13/07/2022 devant le jury composé de :

Mme.ACHELI	DALILA	PROFESSEUR	UMBB	PRÉSIDENTE
Mme.MAHDI	ISMAHAN	MCB	UMBB	EXAMINATRICE
Mme.YAHIA	SELMA	DOCTORANTE	UMBB	PROMOTRICE
M.MERAIHI	YASSINE	MCA	UMBB	CO-PROMOTEUR

Année Universitaire : 2021/2022

# Remerciements

Nous remercions Dieu pour nous avoir donné le courage, la force et la volonté qui nous ont accompagnés tout au long de cette période d'étude.

Notre profonde gratitude s'adresse à notre promotrice YAHIA Selma, pour tous ses conseils avisés, sa disponibilité, sa patience, sa modestie et son soutien technique et moral. Ce travail n'aurait pas été possible sans son aide.

Nos vifs remerciements s'adresse à notre co-promoteur Monsieur Yassine MERAIHI, Maître de conférences à l'université de Boumerdes, d'avoir accepté de diriger ce travail, pour sa confiance, son soutien inestimable et sa disponibilité malgré ses différents engagements.

Nos remerciements à Madame MEKHMOUKH Syla pour son aide lors de la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi, Monsieur AMRANE Amine ingénieur à l'exploration SONATRACH pour ses conseils et son aide.

Nos respectueux remerciements sont dédiés aux membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

Nos remerciements à Tellache Asma pour son aide lors de la réalisation de notre mémoire.

Enfin, nos remerciements les plus chaleureux à nos parents, familles et amis, qui ont cru en nous.

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail plus particulièrement à mes parents qui m'ont encouragé,  
soutenu et se sont sacrifiés pour me voir réussir,

A mon très cher frère Adem,

A mes grands parents, que je remercie pour leur soutien moral et leurs conseils précieux  
tout au long de mes études, ainsi que mes tantes et mon oncle.

A tonton Malek et sa petite famille, que je remercie pour son encouragement et ses conseils,

A mon binôme Mohamed avec qui j'ai eu le plaisir à réaliser ce travail,

A mes amis Yacine et Mehdi qui ont partagé avec moi toutes mes années d'études,

A mon ami Ramy que je remercie pour son soutien moral, ses conseils et tous les  
moments passés avec lui,

A notre amie Meriem pour son soutien et encouragement.

**SADEKI Nesrine**

Je tiens tout d'abord, à témoigner ma reconnaissance à mes parents, source d'inspiration et  
de motivation,

Mais aussi, à mon frère et mes chères sœurs Meriem et Asma qui m'ont fait part de leurs  
expériences dans la vie universitaire,

Sans oublier, mes amis et camarades qui se sont investis tant dans notre travail que dans  
mon quotidien, dans les meilleurs comme dans les pires moments,

Ainsi, je dédie ce mémoire à toute personne ayant participé de loin ou de près à notre  
travail.

**TELLACHE Mohamed**

## Résumé

La communication par lumière visible est une excellente alternative à la technologie traditionnelle radiofréquence (RF) où de nombreux problèmes ont été détectés dont la saturation du spectre RF rendant la communication sans fil incapable de supporter la grande demande des connexions sans fil. Le but de notre travail est de proposer l'algorithme Manta Rays Foraging Optimization (MRFO) pour résoudre le problème de déploiement des LEDs dans une bibliothèque universitaire en tenant compte des paramètres de couverture et de débit tout en respectant la contrainte du coût proportionnel au nombre des LEDs utilisées. L'algorithme MRFO est évalué en comparaison avec les algorithmes Whale Optimizationn Algorithm (WOA), Grey Wolf Optimizer (GWO), BAT Algorithm (BA) et Particle Swarm Optimization (PSO).

Cette étude est réalisée en variant le nombre de LEDs et le nombre de clients en suivant deux scénarios : Dans le premier scénario, nous varions le nombre des LEDs et nous gardons le nombre de clients fixe. Dans le deuxième scénario, nous varions le nombre des clients en gardant le nombre de LEDs fixe. D'après les résultats optimaux obtenus dans les différents scénarios, nous validons le choix de l'algorithme MRFO.

La validation expérimentale de cette étude confirme les grandes performances de la communication par optique sans fil et la garantie d'un énorme débit pour chaque utilisateur ce qui encourage l'émergence vers la technologie VLC.

**Mots-clés :** Communication par lumière visible (VLC), Manta Rays Foraging Optimization (MRFO), Métaheuristiques, Diodes électroluminescentes (LED), Photodétecteur (PD), Optimisation.

# Abstract

Visible light communication is an excellent alternative to traditional technology RF where many problems have been detected including saturation of the RF spectrum, making wireless communication unable to support the high demand of wireless connections. The goal of our work is to propose the Manta Rays Foraging Optimization (MRFO) algorithm for solving the problem of LED deployment in a university library taking into account coverage and throughput parameters while respecting the constraint of cost proportional to the number of LEDs used. The MRFO algorithm is evaluated in comparison with the Whale algorithms Optimization Algorithm (WOA), Grey Wolf Optimizer (GWO), BAT Algorithm (BA) and Particle Swarm Optimization (PSO).

This study is carried out by varying the number of LEDs and the number of customers in two scenarios. In the first scenario, we vary the number of LEDs and we keep the number of clients fixed. In the second scenario, we vary the number of clients while keeping the number of LEDs fixed. Based on the optimal results obtained in the different scenarios, we validate the choice of the MRFO algorithm.

The experimental validation of this study confirms the high performance of optical wireless communication and the guarantee of a huge throughput for each user which encourages the emergence towards the VLC technology.

**Keywords :** Visible Light Communication (VLC), Manta Rays Foraging Optimization (MRFO), Metaheuristics, Light Emitting Diodes (LEDs), Photodetector (PD), Optimization.

## الملخص

تعد الاتصالات الضوئية المرئية بديلاً ممتازاً لتقنية أنظمة الراديو (RF) التقليدية حيث يوجد فيها الكثير من المشاكل بما في ذلك تشعب طيف التردد اللاسلكي مما يجعل الاتصالات اللاسلكية غير قادرة على دعم الطلب المتزايد عليها. الهدف من عملنا هو اقتراح خوارزمية تحسين البحث عن العلف بأشعة مانتا (MRFO) لحل مشكلة وضع مصابيح LED في مكتبة جامعية مع مراعاة معايير التغطية والإنتاجية ومع احترام قيد التكلفة المتزايد مع عدد مصابيح LED المستخدمة.

يتم تقييم خوارزمية MRFO بالمقارنة مع خوارزمية تحسين خوارزميات الحوت (WOA)، محسن الذئب الرمادي (GWO)، خوارزمية الخفافيش (BA) وتحسين سرب الجسيمات (PSO). يتم تنفيذ هذه الدراسة من خلال تغيير عدد مصابيح LED وعدد العملاء باتباع سينار يوهين: في السيناريو الأول، نغير عدد مصابيح LED ونحافظ على عدد العملاء ثابتاً. في السيناريو الثاني، نغير عدد العملاء الاحتفاظ بعدد المصابيح ثابتاً. بناءً على النتائج الجيدة التي تم الحصول عليها في السيناريوهات المختلفة، نتحقق من صحة اختيار خوارزمية MRFO.

يؤكد التحقق التجريبي لهذه الدراسة الأداء الرائع للتواصل من قبل البصريات اللاسلكية وضمان إنتاجية هائلة لكل مستخدم.

**الكلمات المفتاحية:** اتصالات الضوء المرئي (VLC)، تحسين البحث عن العلف بأشعة مانتا (MRFO)، الثنائيات الباعثة لضوء (LED)، جهاز الكشف الضوئي (PD)، التحسينات.

# Table des matières

Introduction Générale . . . . .	0
<b>1 Etat de l'art sur la communication par lumière visible</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Historique . . . . .	4
1.3 Qu'est-ce qu'une technologie VLC ? . . . . .	5
1.4 Architecture VLC . . . . .	6
1.4.1 La couche MAC (Medium Access Control) . . . . .	8
1.4.1.1 Rôle de la couche MAC . . . . .	8
1.4.1.2 Les services des couches MAC aux couches supérieures . . . . .	8
1.4.1.3 Les services de la couche Physique à la couche MAC . . . . .	8
1.4.1.4 Structure de la trame MAC . . . . .	9
1.4.2 Couche physique . . . . .	9
1.4.2.1 Phy I (outdoor) . . . . .	9
1.4.2.2 Phy I (indoor) . . . . .	10
1.4.2.3 Phy III (Émetteur-récepteur optique multiple) . . . . .	10
1.4.2.4 Types de multiplexage . . . . .	10
1.4.2.5 Structure de la trame PHY . . . . .	10
1.5 Normalisation de la VLC . . . . .	11
1.6 Les applications VLC . . . . .	12
1.6.1 Les applications en milieu extérieur (outdoor) . . . . .	12
1.6.1.1 Milieu sous-marin . . . . .	12
1.6.1.2 Véhicule . . . . .	13
1.6.1.3 Les mines souterraines . . . . .	13
1.6.2 Applications en milieu intérieur (indoor) . . . . .	14
1.6.2.1 Li-Fi . . . . .	14
1.6.2.2 Localisation . . . . .	14
1.6.2.3 Créer des lieux intelligents . . . . .	14
1.6.2.4 Aviation . . . . .	15
1.6.2.5 Milieu Hospitalier . . . . .	15
1.6.2.6 Environnement dangereux . . . . .	15
1.7 Principales approches des mécanismes d'accès multiple . . . . .	16
1.7.1 Accès multiple par répartition dans le temps(TDMA) . . . . .	16
1.7.2 Accès multiple par répartition de codes(CDMA) . . . . .	16
1.7.3 Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) . . . . .	17
1.7.4 Accès multiple par répartition dans l'espace . . . . .	18

1.7.5	Accès multiple par détection de porteuse/détection de collision et évitement de cache (CSMA/CD-HA) . . . . .	18
1.8	Les modulations dans le domaine VLC . . . . .	18
1.8.1	Phy I et Phy II . . . . .	18
1.8.1.1	Modulation OOK(On-Off Keying) . . . . .	18
1.8.1.2	Modulation VPPM (Variable Pulse Position Modulation) . . . . .	19
1.8.2	Phy III . . . . .	19
1.8.2.1	Modulation CSk (Color Shift Keying) . . . . .	19
1.8.3	La modulation OFDM (Orthogonal Frequency-Divison Multiplexing) . . . . .	20
1.9	Avantages et inconvénients de la VLC . . . . .	20
1.9.1	Les avantages . . . . .	20
1.9.2	Les inconvénients . . . . .	21
1.10	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Modélisation des canaux pour VLC</b> . . . . .	<b>22</b>
2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Théorie de base de photométrie . . . . .	22
2.2.1	Flux lumineux . . . . .	22
2.2.2	Intensité lumineuse . . . . .	23
2.2.3	Éclairage . . . . .	23
2.2.4	Luminance . . . . .	23
2.2.5	Radiateur de Lambert : . . . . .	23
2.3	Modélisation des canaux pour les communications par lumière visible . . . . .	24
2.3.1	LOS . . . . .	24
2.3.2	NLOS . . . . .	25
2.4	Caractéristiques des émetteurs à LED . . . . .	26
2.4.1	Les caractéristiques de puissance des émetteurs à LED . . . . .	26
2.4.2	Mode de rayonnement . . . . .	26
2.4.3	LED inorganique pour une lumière blanche . . . . .	27
2.4.3.1	Les LEDs bleues avec phosphore . . . . .	27
2.4.3.2	Les LEDs Rouges-Vertes-Bleues (RVB) (en anglais Red-Green-Blue (RGB)) . . . . .	27
2.5	Systèmes de communication à lumière visible . . . . .	27
2.5.1	Les caractéristiques d'éclairage des émetteurs à LEDs . . . . .	28
2.5.2	Caractéristiques des récepteurs . . . . .	29
2.6	Description des canaux de communication par lumière visible . . . . .	29
2.6.1	Modèle de canal proposé par Lee et Al . . . . .	29
2.6.2	Modèle de canal proposé par Rajbhandari et Al . . . . .	30
2.6.3	Modèle proposé par Ding De-qiang et Al . . . . .	30
2.6.4	Modèle de canal proposé par Zhou Zhou et Al . . . . .	30
2.6.5	Modèle d'intégration de sphère . . . . .	30
2.7	Modélisation du bruit en VLC . . . . .	31
2.7.1	Bruit optique ambiant . . . . .	31
2.7.2	Bruit optique ambiant . . . . .	31

2.8	Conclusion . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Méthode D'optimisation</b>	<b>33</b>
3.1	Introduction . . . . .	33
3.2	Définition de l'optimisation . . . . .	33
3.2.1	Formulation mathématique . . . . .	34
3.3	Domaines d'application . . . . .	34
3.4	Notions et concepts relatifs à l'optimisation . . . . .	35
3.4.1	Optimum global et l'optimum local . . . . .	35
3.4.2	Exploitation et exploration . . . . .	35
3.4.3	Espace d'état . . . . .	35
3.4.4	Les variables . . . . .	35
3.4.5	La fonction objectif . . . . .	35
3.4.6	Contraintes . . . . .	36
3.5	Classification des problèmes d'optimisation . . . . .	36
3.5.1	Classification selon la complexité du problème d'optimisation . . . . .	36
3.5.1.1	Problème de complexité $P$ . . . . .	36
3.5.1.2	Problème de complexité $NP$ . . . . .	36
3.5.1.3	Problème de complexité $NP$ -Complet . . . . .	36
3.5.2	Classification avec et sans contraintes . . . . .	36
3.5.3	Classification des problèmes d'optimisation selon la nature des problèmes . . . . .	36
3.5.3.1	Problèmes d'optimisation continue . . . . .	36
3.5.3.2	Problèmes d'optimisation discrète . . . . .	37
3.5.4	Classification des problèmes d'optimisation selon le nombre d'optimums . . . . .	37
3.5.4.1	Optimums uni-modaux . . . . .	37
3.5.4.2	Optimums multimodaux . . . . .	37
3.5.5	Classification des problèmes d'optimisation selon le type de la fonction objectif . . . . .	37
3.5.5.1	Problème d'optimisation mono-objectif . . . . .	37
3.5.5.2	Problème d'optimisation multi-objectif . . . . .	37
3.6	Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation . . . . .	38
3.6.1	Les algorithmes approximatifs . . . . .	39
3.6.1.1	Heuristiques . . . . .	39
3.6.1.2	Méta-heuristiques . . . . .	39
3.7	Classification des méta-heuristiques . . . . .	40
3.7.1	Méta-heuristiques à solution unique . . . . .	40
3.7.1.1	La méthode de descente : . . . . .	40
3.7.1.2	Recuit simulé : . . . . .	40
3.7.1.3	Recherche Tabou : . . . . .	41
3.7.2	Méta-heuristiques à population de solution . . . . .	41
3.7.2.1	Les algorithmes évolutionnaires : . . . . .	42
3.7.2.1.1	Algorithme génétique : . . . . .	42
3.7.2.1.2	La programmation évolutionnaire : . . . . .	43
3.7.2.1.3	La programmation génétique : . . . . .	43
3.7.2.2	Intelligence en essais . . . . .	44

3.7.2.2.1	L'algorithme des essais particules . . . . .	45
3.7.2.2.2	L'algorithme des essais de lucioles (Firefly Algorithm) : . .	45
3.8	L'algorithme des essais des Manta Rays Foraging Optimization Algorithm (MRFO) .	46
3.8.1	Les stratégies de recherche de nourriture simulées par MFRO . . . . .	47
3.8.1.1	La recherche en chaîne . . . . .	47
3.8.1.2	La recherche en cyclone . . . . .	47
3.8.1.3	La recherche en saut périlleux . . . . .	48
3.8.2	Approche générale de l'algorithme MRFO . . . . .	49
3.9	Conclusion . . . . .	51

<b>4</b>	<b>Implémentation de MRFO pour la résolution du problème d'emplacement des LEDs</b>	<b>52</b>
4.1	Introduction . . . . .	52
4.2	Description du système d'étude . . . . .	52
4.3	Formulation du problème de déploiement des LEDs . . . . .	53
4.4	La fonction objectif . . . . .	54
4.5	Résultats des simulations . . . . .	54
4.5.1	L'impact de la variation des LEDs en fonction de 80 clients . . . . .	55
4.5.2	L'impact de la variation des clients en fonction de 20 LEDs . . . . .	60
4.5.3	L'étude de la convergence . . . . .	63
4.6	Conclusion . . . . .	67
	<b>Conclusion Générale</b> . . . . .	<b>68</b>

# Table des figures

1.1	Schéma de l'évolution de la VLC au fil des siècles [3] . . . . .	4
1.2	l'inventeur Alexandre Graham Bell et un exemple d'anciennes méthodes utilisant la communication par lumière [3]. . . . .	4
1.3	Feu tricolore utilisant la communication par lumière [6] . . . . .	5
1.4	Spectre de la lumière visible [7] . . . . .	5
1.5	Schéma de l'Architecture VLC [8] . . . . .	6
1.6	Schéma de l'Architecture VLC [1] . . . . .	7
1.7	Les topologies prises en charge par MAC dans le standard IEEE 802.15.7 [11] . . . . .	8
1.8	Structure de la trame MAC [13] . . . . .	9
1.9	Multiplexage de la couche PHY [13] . . . . .	10
1.10	Structure de la trame PHY [13] . . . . .	10
1.11	Application sous-marine[19] . . . . .	12
1.12	Application entre véhicules [20] . . . . .	13
1.13	Application dans le domaine minier [21] . . . . .	13
1.14	Application Li-Fi [22] . . . . .	14
1.15	Application de localisation en VLC[1] . . . . .	14
1.16	Application VLC dans le domaine de l'aviation [1] . . . . .	15
1.17	La VLC en milieu hospitalier [23] . . . . .	15
1.18	La VLC dans les milieux dangereux [24] . . . . .	16
1.19	Accès multiple par répartition dans le temps(TDMA) [26] . . . . .	16
1.20	Accès multiple par répartition de codes(CDMA) [27] . . . . .	17
1.21	Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) [28] . . . . .	17
1.22	Modulation On-Off Keying (OOK) [29] . . . . .	19
1.23	Modulation VPPM (Variable Pulse Position Modulation) [30] . . . . .	19
1.24	Modulation CSK (Color Shift Keying) [31] . . . . .	20
2.1	Schéma d'un radiateur de Lambert [37]. . . . .	24
2.2	Illustration d'un lien LOS entre un émetteur et un récepteur [14]. . . . .	25
2.3	Illustration d'un lien NLOS entre un émetteur et un récepteur [5] . . . . .	26
2.4	Génération d'une lumière blanche [5]. . . . .	27
2.5	Système de la VLC. . . . .	28
2.6	Schéma sur la Géométrie de la liaison LOS et du chemin réfléchi[14] . . . . .	28
2.7	Le spectre de puissance des différentes sources de bruits en fonction de la longueur d'onde de la communication [43]. . . . .	31
2.8	Densité spectrale de puissance unilatérale de bruit en fonction de la fréquence du signal optique [43]. . . . .	32

3.1	Représentation graphique d'un objectif en 2D.[45]	34
3.2	Classification des problèmes d'optimisation.	38
3.3	Classification des méthodes de résolution des problèmes d'optimisation.	39
3.4	Principe d'un algorithme évolutionnaire [48]	42
3.5	La phase de croisement [59]	42
3.6	La phase de mutation [59]	43
3.7	Intelligence en essais[63]	44
3.8	Illustration des essais particules[64]	45
3.9	Illustration de l'algorithme Firefly [66]	46
3.10	Stratégie d'alimentation de la chaîne de raies manta[62]	46
3.11	Pseudo-code de l'algorithme MRFO[62]	50
4.1	Système VLC intérieur typique	53
4.2	Histogramme de la couverture	56
4.3	Histogramme du débit	57
4.4	Histogramme du fitness	57
4.5	Position des LEDs en utilisant MRFO	58
4.6	Position des LEDs en utilisant WOA	58
4.7	Position des LEDs en utilisant GWO	59
4.8	Position des LEDs en utilisant BAT	59
4.9	Position des LEDs en utilisant PSO	59
4.10	Histogramme de la couverture	61
4.11	Histogramme du débit	62
4.12	Histogramme du fitness	62
4.13	Convergence avec 8 LEDs	64
4.14	Convergence avec 12 LEDs	64
4.15	Convergence avec 20 LEDs	65
4.16	Convergence avec 24 LEDs	65
4.17	Convergence avec 40 clients	66
4.18	Convergence avec 60 clients	66

# Liste des tableaux

4.1	Variation des LEDs en fonction de 80 clients . . . . .	55
4.2	Variation des clients en fonction de 20 LEDs . . . . .	60
4.3	Analyse de convergence entre les algorithmes MRFO, WOA, GWO, BAT, et PSO. . .	63

# Liste des abréviations

## A

**ADC** : Analog Digital Converter.

## B

**BA** : BAT Algorithm.

## C

**CAN** : Convertisseur Analogique Numérique.

**CSK** : Color Shift Keying.

## D

**DAC** : Digital to Analog.

## F

**FOV** : Field Of View.

## G

**GPS** : Global Positioning System.

**GWO** : Gray Wolf Optimizer.

## I

**I2V** : Infrastructure à Véhicule.

**IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**IOT** : Internet Of Things.

## J

**JEITA** : Japan Electronics and Information Technology Industries Association.

## L

**LED** : Light Emitting Device.

**Li-Fi** : Light Fidelity.

**LOS** : Line Of Sight.

## M

**MAC** : Medium Access Control.

**MCPS-SAP** : MAC Common Part Sublayer.

**MFR** : MAC Footer.

**MHR** : MAC Header.

**MLME-SAP** : Mac Layer Management Entity.

**MRFO** : Manta Rays Foraging Optimization.

## N

**NLOS** : No Line Of Sight.

## O

**OFDM** : Orthogonal Frequency Division.

**OOK** : On-Off Keying.

**OWC** : Optical Wireless Communication.

## P

**PD** : Photo-Diode.

**PD-SAP** : Physique Data Service.

**PHR** : Physical Layer Header.

**PIN** : Positive Intrinsic Negative diode.

**PLME-SAP** : Physique Layer Management Entity.

**PPM** : Pulse Position Modulation.

**Pr** : Puissance reçue.

**PSO** : Particule Swarm Optimization.

**Pt** : Puissance transmise.

**PHY** : Physical Layer.

## Q

**QAM** : Amplitude en Quadrature.

## R

**RF** : Radio Fréquence.

**RGB** : Red Green Blue.

## S

**SNR** : Signal Noise Ratio.

**SSL** : Solid State Lighting.

## T

**TCA** : Transconductance.

**TDMA** : Time Division Multiple Access.

**TIA** : Transimpedance.

## U

**UTROV** : Un Tethered Remotely Operated Vehicle.

## V

**V2I** : Véhicule à Infrastructure.

**V2V** : Véhicule à Véhicule.

**VLC** : Visible Light Communication.

**VLCC** : Visible Light Communication Consortium.

**VPAN** : VLC Personal Area Network.

**VPPM** : Variable Pulse Position Modulation.

## W

**Wi-Fi** : Wireless Fidelity.

**WOA** : Whale Optimization Algorithm.

# Introduction Générale

Les évolutions technologiques des systèmes de communication sans fils ont connu un essor important de manière exponentielle ces dernières années. Ces communications s'imposent d'une façon indéniable dans notre vie quotidienne permettant un accès permanent à des objets connectés.

En 2020, la pandémie du Covid-19 a encore fait augmenter le besoin d'être connecté par l'adoption de la méthode du télé-travail utilisée par la majorité des entreprises, administration et établissements scolaires et universitaires.

Le problème majeur des communications sans fils basées sur les ondes radiofréquences (RF) est la bande passante limitée. La communication par lumière visible (VLC) s'avère la solution la plus appropriée pour le résoudre. VLC est une technologie basée sur l'utilisation des diodes électroluminescentes (Light-Emitting Diode (LEDs)) pour la transmission des données. Elle est caractérisée par sa bande passante élevée, sécurité accrue, immunité aux interférences et faible coût ce qui la rend une alternative révolutionnaire à la communication RF. VLC peut être utilisée dans des communications intérieures (Indoor), Extérieures (Outdoor), sousmarines (Underwater) et Sous-sol(Underground). L'intérêt croissant de cette technologie a donné lieu à de nombreuses activités de recherche. Une des contraintes des systèmes de communications VLC est le problème de modélisation et planification des LEDs pour maximiser la couverture et assurer une connectivité entre les utilisateurs. Les méthodes approchées basées sur les métaheuristiques sont appliquées pour palier à ce problème.

L'objectif principal de notre travail est de proposer l'algorithme Manta Rays Foraging Optimization (MRFO) pour résoudre le problème de déploiement des LEDs dans un milieu intérieur (bibliothèque universitaire) en tenant compte des paramètres de couverture et de débit tout en respectant la contrainte du coût proportionnel au nombre des LEDs utilisées. L'algorithme proposé MRFO est évalué en comparaison avec les algorithmes Whale Optimizationn Algorithm (WOA), Grey Wolf Optimizer (GWO), BAT Algorithm (BA) et Particule Swarm Optimization (PSO).

Notre étude est basée sur deux scénarios (variant le nombre de LEDs et le nombre d'utilisateurs) : Dans le premier scénario, nous varions le nombre des LEDs et nous gardons le nombre de clients fixe. Dans le deuxième scénario, nous varions le nombre des clients en gardant le nombre de LEDs fixe.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres représentés comme suit :

Dans le **premier chapitre**, nous présentons un état de l'art sur la communication par lumière visible dans lequel nous introduisons la technologie VLC, son architecture (émetteur, récepteur et canal optique) avec les différents types de modulation. Par la suite, nous expliquons les domaines d'application de cette technologie ainsi que ses avantages et inconvénients.

Dans le **deuxième chapitre**, nous nous basons sur la modulation des canaux pour la VLC en présentant les principes de base de la photométrie, nous abordons les caractéristiques des émetteurs et récepteurs et les différents modèles de LEDs utilisées. Nous terminons avec une modélisation du bruit pour la communication optique sans fil.



Dans le **troisième chapitre**, nous traitons le problème d'optimisation, les notions et concepts relatifs à ce sujet et la classification des problèmes d'optimisation selon différents critères, ainsi que leurs méthodes de résolution en se basant sur les métaheuristiques avec leurs classes à (solution unique et à population de solutions).

Dans le **quatrième chapitre**, nous présentons notre approche basée sur l'algorithme MRFO pour la résolution du problème du positionnement des LEDs. Nous évaluons ensuite sa performance et nous comparons ses caractéristiques avec les algorithmes WOA, GWO, BAT et PSO.

Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives pour d'éventuelles améliorations et une poursuite de ce travail.

# Chapitre 1

## Etat de l'art sur la communication par lumière visible

### 1.1 Introduction

Le nombre d'appareils mobiles dans le monde a considérablement augmenté ces dernières années. Parmi ces appareils, nous citons les smartphones, les tablettes ...etc, qui sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne.

La communication RF est actuellement la meilleure solution pour la communication sans fil en raison de son niveau de maturité et sa large acceptation. Cependant, cette technologie a ses inconvénients, tels que la bande passante limitée et les interférences. Parallèlement, le développement des dispositifs d'éclairage à semi-conducteurs (SSL) en particulier des diodes électroluminescentes (LED) ont connu une croissance énorme et sont connues pour leur efficacité et une durée de vie qui dépasse de loin les sources lumineuses classiques. En outre, les LEDs ont commencé à être utilisées dans de plus en plus d'applications d'éclairage et il est attendu que dans un avenir proche, elles remplaceront complètement les sources d'éclairage traditionnelles.

Parmi les avantages des LEDs sont capables d'offrir une communication rapide ce qui permet de les utiliser non seulement pour l'éclairage, mais aussi pour la communication.

La communication à la lumière visible (VLC) est une technologie de communication alternative au RF qui utilise les LEDs comme émetteur et les photodétecteurs comme récepteur en utilisant la portion visible du spectre lumineux (380-780 THz).

L'objectif de cette technologie est d'utiliser des moyens d'éclairage existants et les valoriser pour la transmission d'informations.

Le principe de la VLC est apparu en 1880, mais les grandes applications publiques commencent seulement à émerger [1]. La communication VLC a le potentiel de fournir des données sans fil haut débit (supérieur au Gbit/s) à bas prix même si cette alternative est une nouvelle technologie, elle a connu un développement rapide, ce qui est une preuve de son immense potentiel. En seulement six ans, le débit de données maximal est passé de 80 Mbit/s en 2008 à 3000 Mbit/s en 2014 [2].

## 1.2 Historique

Malgré le récent intérêt pour la VLC, des études impliquant des systèmes de communication basés sur la lumière peuvent être trouvés sur les siècles passés. La lumière a été un moyen de communication utilisé par l'être humain, citons comme exemple les signaux de fumée utilisés par les indiens d'Amérique ou encore le signal lumineux envoyé entre deux bateaux. Ces techniques permettent la transmission rapide et efficace d'informations importante.

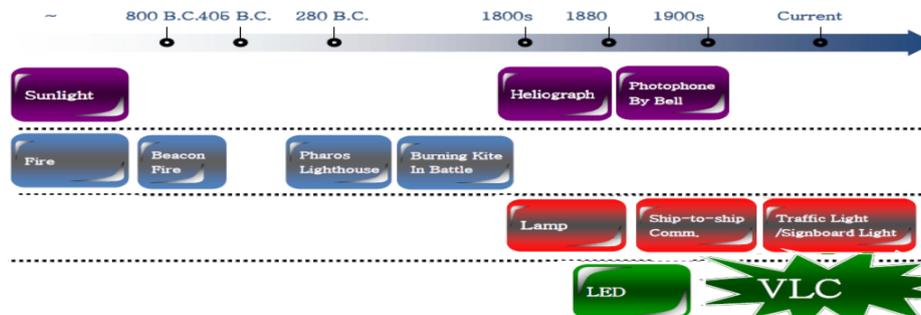


FIGURE 1.1 – Schéma de l'évolution de la VLC au fil des siècles [3]

Ce n'est qu'en 1880, que le premier véritable dispositif de communication par l'optique sans fil a émergé et cela avec l'invention du photophone d'Alexandre Graham Bell. Similaire aux téléphones modernes, cet appareil à l'aide d'un système de miroir plan flexible la voix était modulée, la variation de fréquence du signal permettait de créer une alternative au niveau de la surface réfléchissante, modulant ainsi la lumière incidente du soleil. Au niveau du récepteur grâce à la combinaison des cellules de sélénium avec un miroir concentrateur se faisait le décodage de l'information reçue. Le dispositif pouvait envoyer et recevoir un signal à plus de 200 m de distance [4].



FIGURE 1.2 – l'inventeur Alexandre Graham Bell et un exemple d'anciennes méthodes utilisant la communication par lumière [3].

Malgré des premiers résultats prometteurs l'appareil fut très vite concurrencé par l'invention du télégraphe en 1894 par Guglielmo Marconi. Cette technologie permettant de couvrir de plus grandes distances, le photophone fut remplacé par les radiofréquences RF [4]. Au début des années 2000, les LEDs ont d'abord été envisagées pour des expériences utilisant VLC. On utilisait une LED blanche pour l'éclairage et la communication dans un environnement intérieur, atteignant un débit jusqu'à 400 Mbps. Après ce travail, des chercheurs ont innové de nouvelles techniques de modulation et de nouvelle technologie LED, une étape importante dans l'histoire de la communication par lumière visible a été

franchie en 2011. Actuellement, VLC est largement étudiée par de grands noms de l'industrie et de l'académie, tels que la NASA, Disney et Phillips 4 ont des produits et des recherches dans ce domaine [5].



FIGURE 1.3 – Feu tricolore utilisant la communication par lumière [6]

### 1.3 Qu'est-ce qu'une technologie VLC ?

La technologie VLC est un sous-ensemble des communications sans fil optique, utilisant le spectre de la lumière visible (400-800 nm) avec la capacité d'offrir un énorme débit de transmission avec une grande vitesse entre la mise en marche et l'arrêt des sources d'éclairage, ainsi qu'une forte résistance aux interférences électromagnétique grâce à l'utilisation des sources d'éclairage générales.

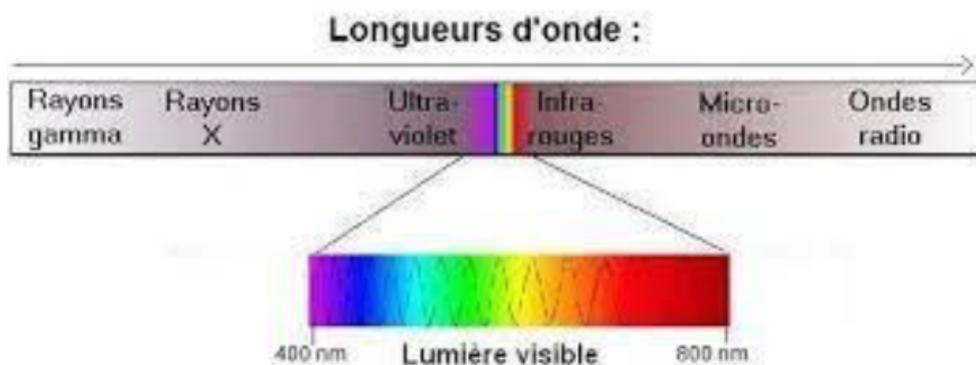


FIGURE 1.4 – Spectre de la lumière visible [7]

La raison pour laquelle la technologie VLC a été créée et développée pour remplacer ou compléter la technologie RF est dû aux problématiques suivantes :

- L'inconvénient majeur est la saturation du spectre électromagnétique associé aux radiofréquences dû à l'explosion du volume des données transmises.
- Fournir à la fois un éclairage et une communication contrairement aux RF ne peuvent fournir qu'une communication.
- L'effet biologique, c'est-à-dire l'impact des ondes électromagnétiques sur notre santé.

La VLC utilise un composant photosensible comme récepteur pour détecter les informations de données envoyées par les sources d'éclairage optique, ces derniers sont des LEDs utilisées pour la transmission des signaux, l'affichage et l'éclairage. Plus particulièrement, les LEDs blanches, car elles offrent une bande passante de modulation plus élevée, une plus grande sensibilité, une durée de vie plus longues, une plus grande luminosité, une taille plus petite, un poids plus léger, une plus grande facilité d'utilisation ainsi qu'un coût et une consommation d'énergie nettement plus faible par rapport aux autres sources (LED).

## 1.4 Architecture VLC

La VLC intègre deux systèmes émetteur et un récepteur séparés physiquement mais connectés via un canal VLC :

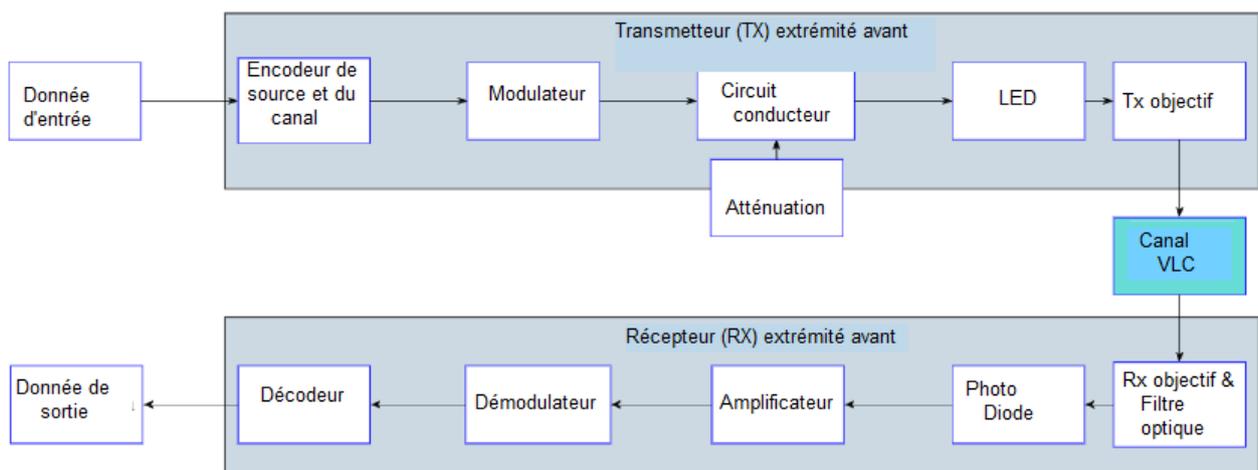


FIGURE 1.5 – Schéma de l'Architecture VLC [8]

### 1. Émetteur :

Dans les systèmes VLC, L'émetteur est la première partie critique qui comporte différents composants ayant des fonctions différentes. Comme le montre la figure 1.5, les données analogiques de la source sont d'abord transmises au "Codeur de source" pour être converties en format numérique, c'est-à-dire en flux de bits "0" et "1". Afin de corriger une partie des erreurs introduites par la dispersion du canal, une redondance des bits de données est nécessaire, ce qui peut être réalisé par l'élément "Codeur de canal" [8].

Les données codées sont ensuite utilisées pour moduler l'intensité du signal optique émis par la source lumineuse à l'aide de l'élément "Modulateur". En général, la technique de modulation la plus simple utilisée dans le système VLC est la modulation d'intensité, mais d'autres schémas de modulation sont également possibles. Le "circuit conducteur" est utilisé pour commander le courant traversant la LED et donc pour contrôler sa luminosité [9].

Lorsque le courant électrique traverse une source lumineuse, il génère une puissance optique sous forme de lumière. En général, les LEDs sont les sources lumineuses les plus couramment utilisées dans les systèmes VLC. Cela est dû à leurs avantages inhérents par rapport aux sources de lumière conventionnelles, tels qu'une faible consommation d'énergie, une longue durée de vie, un bon rapport coût-efficacité et une commutation rapide [8].

## 2. Le canal VLC :

Le signal optique rayonné par la LED, agissant comme un émetteur sans fil, se propage dans le canal optique où le signal lumineux est influencé par de nombreux facteurs tels que l'atténuation, les interférences et le bruit. Il convient en outre de noter qu'à travers le canal, les rayons lumineux peuvent être réfléchis, réfractés ou diffusés en sous-rayons. Au final, le signal VLC résultant est la somme de deux composantes principales, à savoir la composante en visibilité directe (LOS) et la composante Non LOS (NLOS).

Dans le canal LOS, le signal émis par la LED retombe directement sur le récepteur sans toucher aucun objet entre les deux. Dans ce cas, les principaux paramètres qui atténuent le signal émis sont la distance de propagation et les conditions météorologiques (dans le cas d'un canal VLC extérieur). En revanche, dans le canal NLOS, le signal émis atteint le récepteur après avoir été réfléchi/diffusé par les obstacles dans le milieu du canal.

## 3. Récepteur :

Un système récepteur complet se compose de différents éléments, dont le filtre optique, le concentrateur (lentille RX), la photodiode (PD), l'amplificateur, le démodulateur et le décodeur. Comme l'indique la figure 1.5, la lumière reçue après propagation dans le canal est concentrée sur la photodiode via un concentrateur optique afin de capter la quantité maximale de lumière nécessaire à la conversion. Ensuite, les rayons sont passés à travers un filtre optique pour limiter le rayonnement de fond dû à la lumière du soleil et aux sources de lumière artificielle. Ensuite, le PD génère un courant électrique proportionnel à la lumière optique incidente, qui est ensuite amplifié à l'aide d'amplificateur et traité par les étapes de démodulation et de décodage pour obtenir la sortie finale (c'est-à-dire les données d'information) [8].

Les photos détectrices les plus appréciés sont les photodiodes en raison de leur petite taille et grande sensibilité et leur réponse rapide. Les types des photodiodes utilisés : Les diodes PIN (Positive Intrinsic Negative diode) et les photodiodes APD (avalanche photodiode) [10].

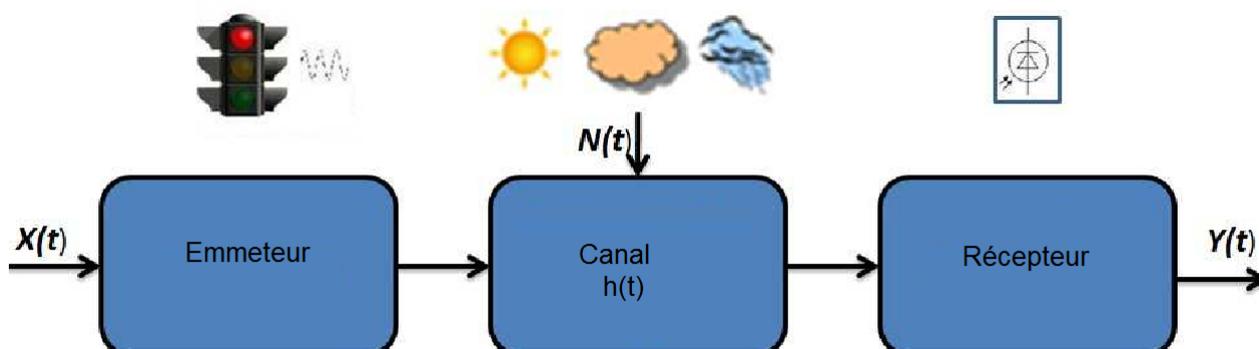


FIGURE 1.6 – Schéma de l'Architecture VLC [1]

L'architecture VLC se compose de trois couches Physique, Mac et Application. Dans le standard IEEE 802.15.7 la couche application n'est pas prise en charge pour plus de simplicité.

### 1.4.1 La couche MAC (Medium Access Control)

Cette couche prend en charge trois topologies peer to peer, Broadcast et étoile. La communication dans la topologie en étoile est effectuée à l'aide d'un contrôleur centralisé tous les nœuds communiquent entre eux passant par le contrôleur, par contre, dans la topologie égale à égale est assuré par les deux nœuds [11].

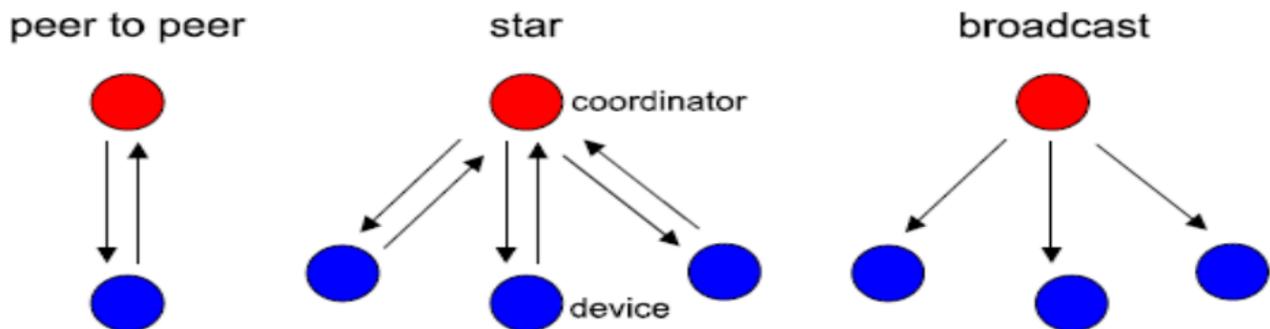


FIGURE 1.7 – Les topologies prises en charge par MAC dans le standard IEEE 802.15.7 [11]

#### 1.4.1.1 Rôle de la couche MAC

- Soutien la mobilité.
- Support de visibilité.
- Support de sécurité.
- Schéma d'atténuation du scintillement.
- Prise en charge de la fonction couleur.
- Gestion du mécanisme d'accès au support.
- Supporte les associations et dissociations au réseau personnel de communication en lumière visible (VPAN, VLC Personal Area Network) [12].

#### 1.4.1.2 Les services des couches MAC aux couches supérieures

- Service de données MCPS-SAP (Mac Common part Sublayer).
- Service de gestion MLME-SAP (Mac Layer Management Entity).

#### 1.4.1.3 Les services de la couche Physique à la couche MAC

- Service de données PD-SAP (physique data service)
- Service de gestion PLME-SAP (Physique Layer Management Entity) [12].

#### 1.4.1.4 Structure de la trame MAC

Frame Control	Sequence Number	Dest. VPAN Identifier	Addressing Fields	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
MHR					MSDU	MFR

FIGURE 1.8 – Structure de la trame MAC [13]

Au niveau des spécifications couche liaison de données, la norme prévoit une structure de trame globale identique quel que soit le mode de la couche physique avec une entête MHR (MAC « Header ») comprenant le contrôle de trame, le numéro de séquence, les informations d'adresse et les informations relatives à la sécurité., une charge utile (« payload ») qui contient des informations spécifiques au type de trame, et un délimiteur de fin MFR (MAC « Footer ») contenant une séquence de contrôle de trame. Selon les modes, les différents champs de cette trame générale diffèrent et ne sont pas nécessairement utilisés. C'est le coordinateur qui active ou non les balises de ces différents champs selon la topologie du réseau.

- La norme définit quatre méthodes d'accès aléatoire : Accès aléatoire avec intervalles de temps prévus (slotted) ou sans (non slotted), et accès multiple avec évitement de collision et détection de porteuse (CSMA / CA) avec intervalles de temps prévus ou non [14].

### 1.4.2 Couche physique

Fournit les spécifications physiques de l'appareil et le support. Trois types d'implémentation physique du VLC sont données dans IEEE 802.15.7 [15]

- La norme définit quatre méthodes d'accès aléatoire : Accès aléatoire avec intervalles de temps prévus (slotted) ou sans (non slotted), et accès multiple avec évitement de collision et détection de porteuse (CSMA / CA) avec intervalles de temps prévus ou non [14].

Fournit les spécifications physiques de l'appareil et le support ; Trois types d'implémentation physique du VLC sont données dans IEEE 802.15.7 [15] :

#### 1.4.2.1 Phy I (outdoor)

Pour l'utilisation en environnement extérieur

- Débits : 11,67-266,6 kbps
- Catégorie : faible
- Les codes utilisés : Les codes convolutionnels & Reed soloman (RS)

### 1.4.2.2 Phy I (indoor)

Pour l'utilisation de l'environnement intérieur & pour atténuer le scintillement et l'équilibre DC

- Débits : 1,25-96 Mbps
- Catégorie : modéré
- Les codes utilisés : Code RLL (limite de longueur de course)

### 1.4.2.3 Phy III (Émetteur-récepteur optique multiple)

- Débits :12-96 Mbps
- Catégorie : modulation CSK

### 1.4.2.4 Types de multiplexage

Les multiplexages par répartition en longueur d'onde (WDM) et par sous porteuse (SCM) réalisent la transmission bidirectionnelle. Le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) et la modulation d'amplitude en Quadrature (QAM) ont été testé pour augmenter le débit.

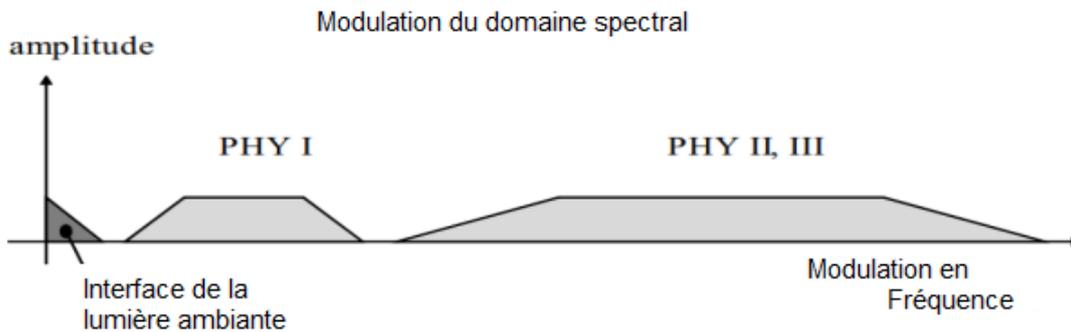


FIGURE 1.9 – Multiplexage de la couche PHY [13]

### 1.4.2.5 Structure de la trame PHY

Preamble	PHY header	HCS (CRC)	Optional fields	PSDU
SHR	PHR			PHY payload

FIGURE 1.10 – Structure de la trame PHY [13]

- L'en-tête de synchronisation (SHR) est composé du préambule utilisé pour obtenir la synchronisation d'horloge.
- L'en-tête est composé d'un bloc PHR d'un champ HCS (Header Check Sequence) et de champs facultatifs. Contient des paramètres indiquant comment les données doivent être transmises, la partie HCS permet de vérifier les erreurs éventuelles et les champs facultatifs permettent de proportionner des informations plus spécifiques.
- Un champ PHY Service Data Unit (PSDU) contient la charge utile de la trame [16].

## 1.5 Normalisation de la VLC

En 2003, un consortium VLC (VLCC) a été formé pour accélérer la recherche et la commercialisation de VLC. Le VLCC a proposé deux normes en 2007 JEITA CP-1221 (système VCL) et JEITA CP-1222 (système d'identification VL) qui a ensuite été accepté par l'électronique et les technologies de l'information au Japon association professionnelle (JEITA). Le CP-1223 a été introduit en tant que système de balise VLC en 2013. Ces deux normes ont deux faible débits de données allant jusqu'à 4.8 Kbps [17].

Les VLCs doivent relever certains défis qui existent :

- L'intégration des VLCs avec les normes de communications déjà existantes tel que le WIFI.
- Les questions des interférences avec les sources de lumière ambiante.
- Les problèmes de mobilité tel que le transfert doit être correctement pris en compte dans les VLCs.
- Amélioration des performances du système de communication en spécifiant des schémas de correction d'erreurs directs.
- Les interférences entre les différents dispositifs utilisant les VLCs sont attendues à l'avenir en raison de l'augmentation future du nombre de ceux-ci.

Pour résoudre les problèmes mentionnés ci-dessus une normalisation des VLCs a été menée par VLC Consortium au Japon et IEEE. L'IEEE 802.15.7 est la norme complétée par l'IEEE pour les couches Physique et Mac, cette norme vise [17] :

- L'offre d'accès à plusieurs centaines de bandes THz.
- L'offre d'une immunité contre les interférences électromagnétiques.
- La communication qui complète le service supplémentaire à l'infrastructure de lumière visible existante.
- Les spécifications de la couche Phy tels que la cartographie optique, le temps de rotation (transmetteur-récepteur) TX-RX, le temps de rotation RX-TX et l'atténuation du scintillement et de la variation.

IEEE 802.15.7 fournit une référence minimale pour le développement de nouveaux produits. Les trois différentes catégories des dispositifs pris en compte pour la VLC sont les véhicules, les mobiles et les infrastructures.

La norme JEITA CP-1221 vise [17] :

- Évite les interférences entre les appareils VLC.
- Propose une longueur d'onde de 380-750 nm.
- Utilise la plage de fréquence 1 pour mettre en œuvre un système d'identification de la lumière visible.

- Utilise la plage de fréquence 2 une lampe fluorescente à onduleur (Cette plage n'est pas adaptée à la communication VLC).
- La plage de fréquence 3 est utilisée pour la communication à haut débit.(Dans JEITA CP-1222 une fréquence de sous-porteuse de 28,8 KHz avec un débit de transmission de 4,8Kbps est utilisée.
- Pour la correction des erreurs, un contrôleur de redondance cyclique a été retenu.

## 1.6 Les applications VLC

La technologie VLC a de nombreuses applications dans lesquelles il pourrait s'intégrer. Dans certaines applications, VLC semble être le seul choix, alors que dans d'autres elle pourrait être une solution complémentaire pour les communications RF, améliorant la performance globale. Ci-après, quelques-unes des applications les plus représentatives envisagées pour VLC sont discutés [1] :

### 1.6.1 Les applications en milieu extérieur (outdoor)

Concernant les applications extérieures, il existe un domaine où la technologie VLC propose une solution performante là où la technologie RF n'en apporte pas.

#### 1.6.1.1 Milieu sous-marin

Les ondes RF ne voyagent pas bien dans l'eau de mer en raison de sa bonne conductivité. Par conséquent, la communication VLC doit être utilisée dans les réseaux de communication sous-marins. L'Un Tethered Remotely Operated Vehicle(UTROV) est une autre application du VLC dans la communication sous-marine. Les différents métiers qui peuvent être effectués à l'aide d'UTROV comprennent la maintenance de l'observation des océans et possibilité de déploiement des navires. La figure ci-dessous illustre le fonctionnement de cette application, le volet de droite montre la communication de l'UTROV utilisant le canal optique vers une infrastructure fixe au fond de la mer. Au centre, la communication est réalisée par UTROV en utilisant le canal optique avec un navire basé sur l'infrastructure de relais. Le volet de gauche montre la communication de l'UTROV utilisant des communications sous-marines à faible bande passante [18].



FIGURE 1.11 – Application sous-marine[19]

### 1.6.1.2 Véhicule

VLC peut être utilisée pour la communication véhicule en raison de la présence des feux du véhicule et de l'infrastructure des feux de circulation existante. Le projet de communication de sécurité comprend un avertissement coopératif de collision avant une détection de pré-collision, exemple : un frein électronique d'urgence...etc. Toutes les applications hautement prioritaires nécessitent des joignable avec une latence entrainement faible [18], dans lequel chaque véhicule peut devenir conscient à des obstacles et dangers qui l'entourent lui permettant ainsi d'agir soit de manière autonome soit en avertissant les utilisateurs dans les alentours.

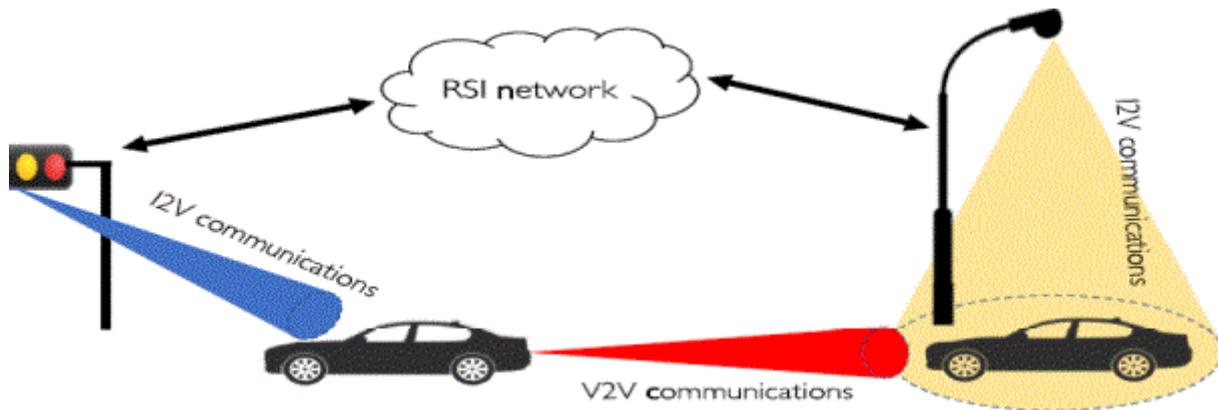


FIGURE 1.12 – Application entre véhicules [20]

### 1.6.1.3 Les mines souterraines

L'utilisation de la technologie VLC présente plusieurs avantages par rapport aux autres techniques de communication avec ou sans fil. En raison de ses caractéristiques, elle est parfaitement applicable aux environnements miniers.

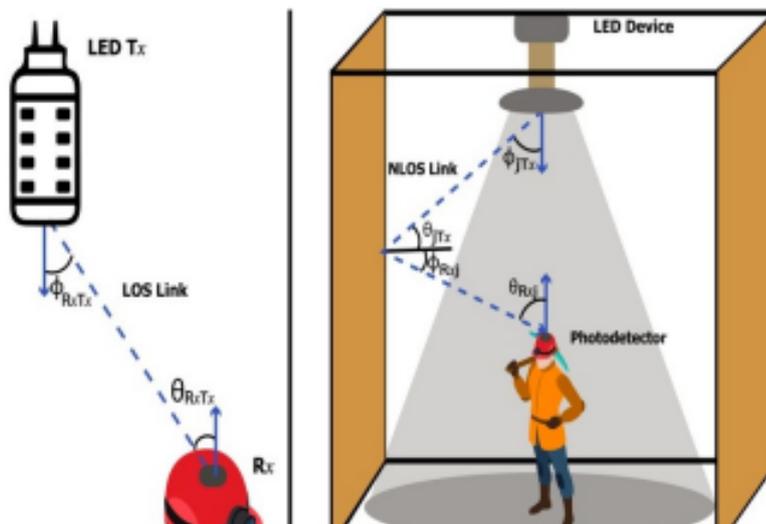


FIGURE 1.13 – Application dans le domaine minier [21]

## 1.6.2 Applications en milieu intérieur (indoor)

### 1.6.2.1 Li-Fi

Le Li-Fi est un système de communication sans fil à lumière visible, il est analogue au Wi-Fi qui utilise la fréquence radio pour la communication. Les signaux Wi-Fi ont le problème d'interférence avec d'autres signaux RF tels que son interférence avec l'équipement de navigation du pilote dans les avions. Ainsi, dans les zones sensibles à rayonnement électromagnétique (comme les avions) Le Li-Fi peut être la meilleure solution. Un Li-Fi prend également en charge l'Internet des objets (IoT). Une vitesse jusqu'à 10 Gbits/s est obtenue en utilisant le Li-Fi, soit 250 fois plus que la vitesse du haut débit ultra-rapide [18].

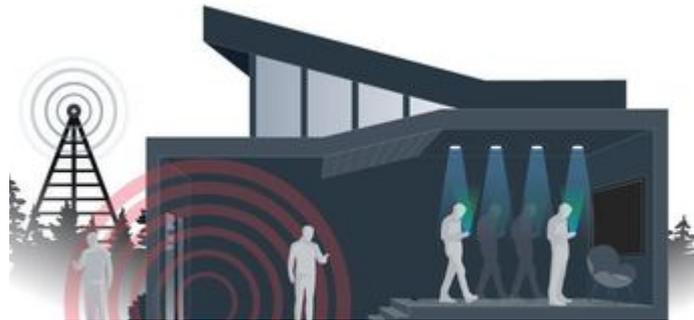


FIGURE 1.14 – Application Li-Fi [22]

### 1.6.2.2 Localisation

VLC peut fournir une localisation intérieure très efficace en déterminant la force du signal reçu ou le temps de vol et en utilisant la technique de triangulation, VLC est capable de fournir une localisation au centimètre près. Dans ce type d'applications, VLC est très pratique car le GPS classique ne peut pas fonctionner à l'intérieur des bâtiments. Un tel scénario, où VLC est utilisée pour la localisation intérieure, la localisation est également possible en fournissant l'ID de la lampe, qui comprend ses coordonnées [1].

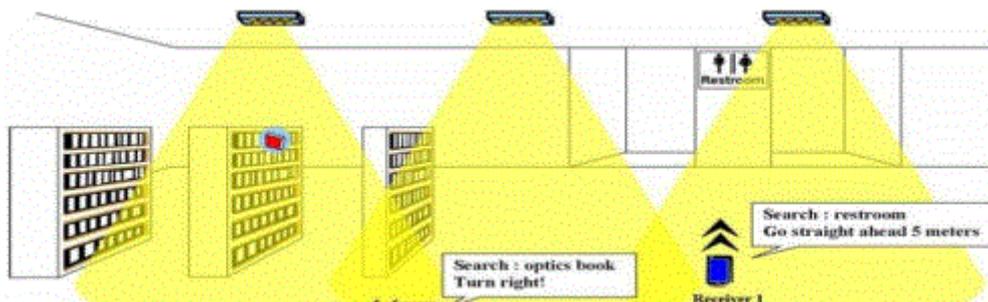


FIGURE 1.15 – Application de localisation en VLC[1]

### 1.6.2.3 Créer des lieux intelligents

VLC pourrait également être utilisé pour créer des lieux intelligents comme dans les musées, en fournissant des informations géolocalisées information. De cette façon, les informations sur les expositions peuvent être fournies aux smartphones des utilisateurs ou tablettes en utilisant la lumière intérieure [1].

#### 1.6.2.4 Aviation

Les ondes radios ne peuvent pas être utilisées donc on utilise la VLC pour éviter ces ondes et de plus cela réduira les coûts de la construction de l'avion et son poids.



FIGURE 1.16 – Application VLC dans le domaine de l'aviation [1]

#### 1.6.2.5 Milieu Hospitalier

Dans les hôpitaux certains équipements sont susceptibles d'interférer avec les ondes radio, l'utilisation du VLC présente de nombreux avantages dans ce domaine [13].



FIGURE 1.17 – La VLC en milieu hospitalier [23]

#### 1.6.2.6 Environnement dangereux

Dans des environnements tels que les usines pétrochimiques, les mines, etc, les radios fréquence sont potentiellement dangereuses car il existe des risques d'explosion [13].

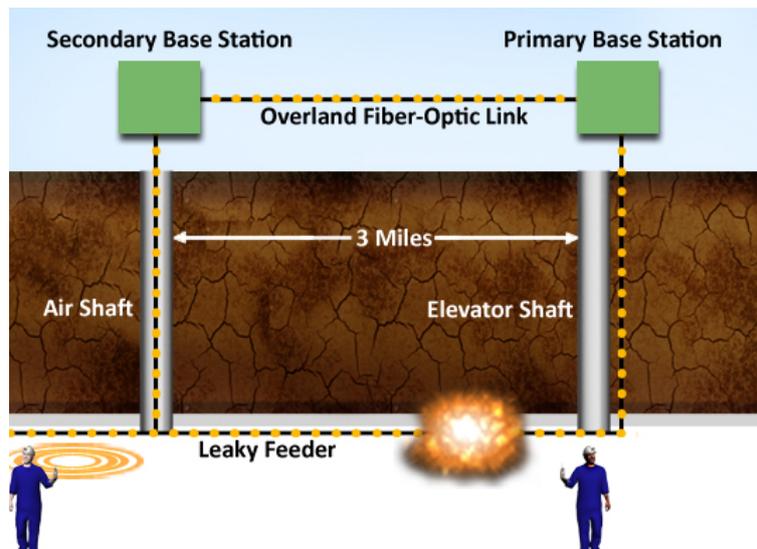


FIGURE 1.18 – La VLC dans les milieux dangereux [24]

## 1.7 Principales approches des mécanismes d'accès multiple

### 1.7.1 Accès multiple par répartition dans le temps(TDMA)

La technique TDMA est basée sur la répartition des ressources en temps, c'est un mécanisme d'accès multiple traditionnel et fonctionne en divisant le signal en plusieurs créneaux, les utilisateurs partagent la même bande passante, et émettent les données à transmettre dans les différents intervalles de temps (time slots) qui leurs sont alloué. Afin de ne pas engendrer d'Interférence d'Accès Multiple IAM (Multiple Access Interferences : MAI), il est impératif que chaque signal respecte strictement l'intervalle de temps qui lui est accordé pour sa transmission. Les récepteurs doivent aussi respecter les intervalles de temps qui leurs sont associés pour reconstituer correctement les séquences d'information qui leurs sont destinées [25].

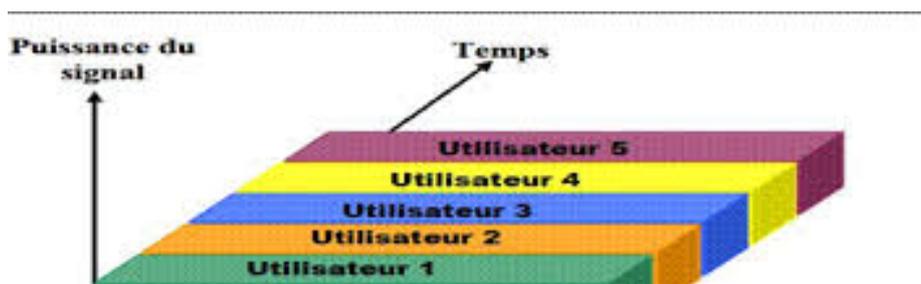


FIGURE 1.19 – Accès multiple par répartition dans le temps(TDMA) [26]

### 1.7.2 Accès multiple par répartition de codes(CDMA)

La CDMA est une technique d'étalement de spectre utilisée dans un premier temps par les militaires grâce à sa résistance aux interférences et pour le niveau de sécurité qu'elle offre [25]. CDMA consiste en des codes orthogonaux (OCC) qui sont distribués afin de permettre à différents utilisateurs d'accéder au même canal. Dans le système OCDMA-VLC un code est attribué à chaque dispositif afin que les

données puissent être codées dans le domaine temporel par l'intermédiaire des états d'activation et de désactivation des LEDs [25].

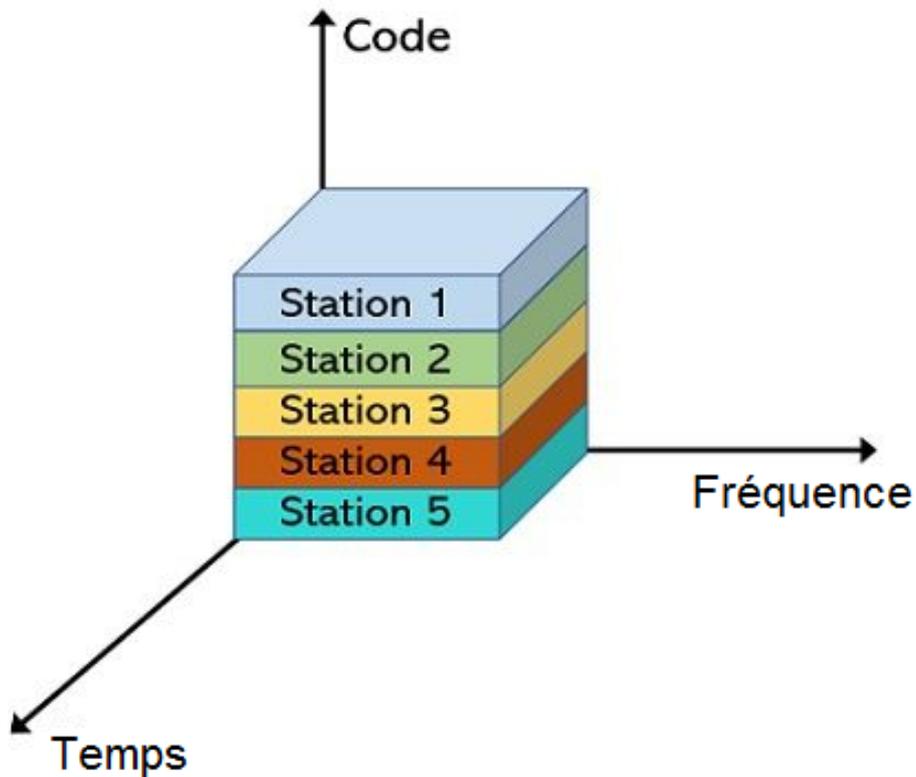


FIGURE 1.20 – Accès multiple par répartition de codes(CDMA) [27]

### 1.7.3 Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA)

L'Accès Multiple par Répartition de Fréquences, est une technique de multiplexage largement utilisée dans les systèmes de communications radiofréquences. C'est la méthode d'accès multiples la plus ancienne. Elle consiste à transmettre les signaux provenant de N utilisateurs différents sur des bandes de fréquences distinctes [25]. Les principaux défis de la mise en œuvre de ce protocole dans les systèmes VLC concernant l'efficacité énergétique et la complexité du décodage.

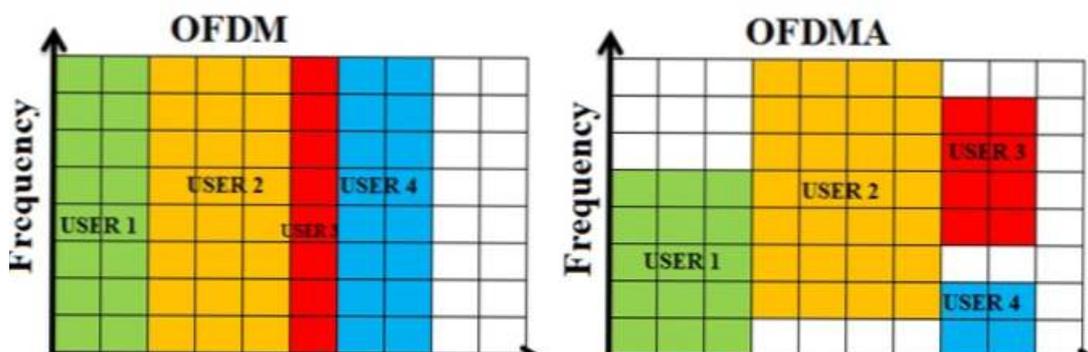


FIGURE 1.21 – Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) [28]

### 1.7.4 Accès multiple par répartition dans l'espace

L'émetteur génère plusieurs signaux en fonction de la position des utilisateurs actifs. Le fait que les émetteurs dans les scénarios VLC soient fortement basés sur la direction (LEDs) est un avantage pour l'adoption de l'accès multiple par répartition dans l'espace [25].

### 1.7.5 Accès multiple par détection de porteuse/détection de collision et évitement de cache (CSMA/CD-HA)

Ce protocole garantit une utilisation équitable des canaux entre tous les nœuds VLC connectés au réseau et réduit l'impact des collisions et des nœuds cachés.

## 1.8 Les modulations dans le domaine VLC

La sélection d'une modulation en particulier se fait selon deux critères :

1. Besoin en éclairage : Différentes activités nécessitent des éclairages différents, tel que 30-100 lux requis pour des activités visuelles normales dans les lieux publics. Il existe une relation non linéaire entre la lumière mesurée et la lumière perçue donnée ci-dessous [19] :

$$\text{lumière perçue (\%)} = 100 * \frac{\sqrt{\text{lumière mesurée(\%)}}}{\sqrt{100}} \quad (1.1)$$

2. Adaptation à l'effet de scintillement : Les changements de la lumière mesurée doivent être effectués de manière à ne pas entraîner de fluctuations perceptible par l'homme. La communication doit être effectuée à un taux plus rapide que 200 Hz pour éviter des effets nocifs [19].

Dans le standard IEEE802.15.7 différents types de modulation sont proposés et se trouvent dans la couche physique.

### 1.8.1 Phy I et Phy II

Sont définis pour une source lumineuse unique, elles prennent en charge les modulations :

#### 1.8.1.1 Modulation OOK(On-Off Keying)

Est une technique dans laquelle le "1" représente l'état "ON" et le "0" correspond à l'état 'OFF'. Pour OOK la norme IEEE 802.15.7 utilise le code Manchester pour que la période des impulsions positives soit identique à celle des impulsions négatives [1].

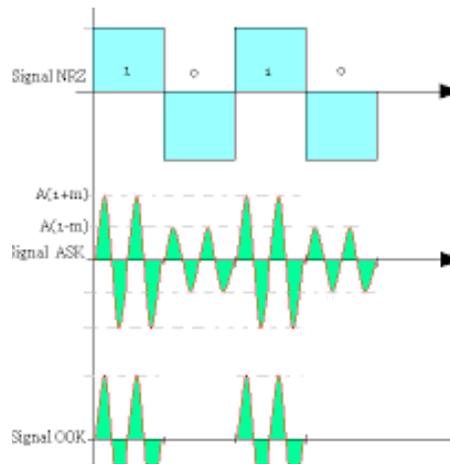


FIGURE 1.22 – Modulation On-Off Keying (OOK) [29]

### 1.8.1.2 Modulation VPPM (Variable Pulse Position Modulation)

La VPPM est développée spécifiquement pour le VLC. Cette méthode utilise deux types de modulation différents : la modulation de position d'impulsion (PPM) et la modulation de largeur d'impulsion (PWM). En modulation PPM l'information est représentée par la position de l'impulsion dans le temps. La variante PPM introduit en plus la variation de largeur d'impulsion en fonction du niveau d'intensité lumineuse. Alors :

- La modulation VPPM permet de s'affranchir des problèmes de scintillement.
- La technique PWM permet de contrôler l'intensité lumineuse [4].

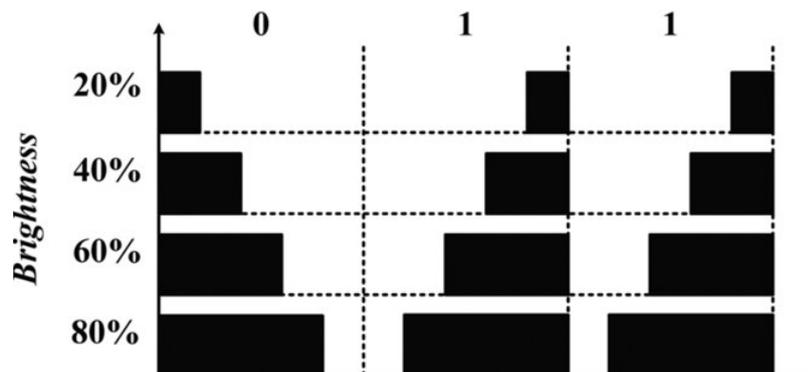


FIGURE 1.23 – Modulation VPPM (Variable Pulse Position Modulation) [30]

## 1.8.2 Phy III

Utilise plusieurs sources optiques à plusieurs fréquences (couleurs). La modulation prise en charge :

### 1.8.2.1 Modulation CSk (Color Shift Keying)

En CSK, le signal est modulé en fonction de l'intensité des trois couleurs qui composent un type de LED connu sous le nom de multi-chip. Cette LED est composée de trois puces LED ou plus, généralement rouges, verte et bleue. Ces trois couleurs, ensemble, sont utilisées pour générer une lumière blanche. Cette méthode est caractérisée par :

- Peut fournir des débits de données allant jusqu'à 96 Mb/s [40].
- Produit la lumière blanche.

- Contrairement aux autres modulations les symboles sont ici sélectionnés de manière à ce que l'émission lumineuse reste constante.
- Permet de s'affranchir des problèmes de scintillement [5].

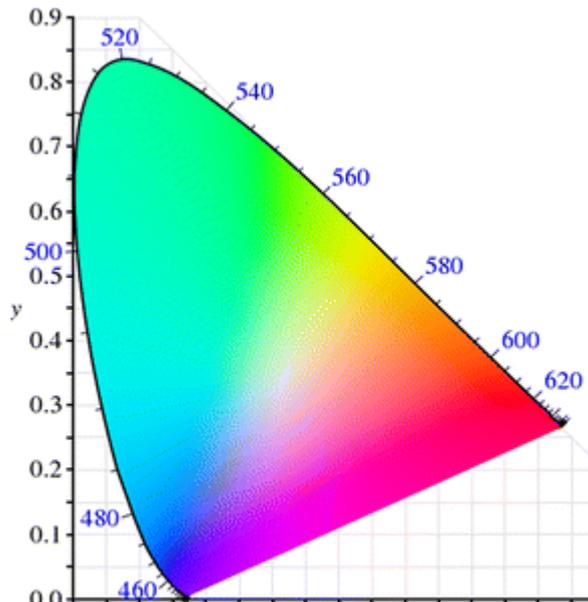


FIGURE 1.24 – Modulation CSK (Color Shift Keying) [31]

Les trois systèmes peuvent coexister en offrant :

- Une atténuation de scintillement.
- Une prise en charge de gradation.
- Permettent un compromis entre les débits de données et les plages dégradation [5].

### 1.8.3 La modulation OFDM (Orthogonal Frequency-Divison Multiplexing)

- Le principe de cette modulation est de considérer que les données sont envoyées sur plusieurs canaux en parallèle en utilisant différentes porteuse ; le temps de chaque symbole correspond à chaque sous porteuse est bien plus grand que son équivalent pour une porteuse unique.
- Répond au mieux aux problématiques de limitation de la bande passante.
- Dans le système IM/DD les signaux portant l'information doivent être des réels positifs.
- Malgré les nombreux avantages la mise en œuvre de cette modulation est complexe augmentant ainsi le prix des systèmes utilisant cette méthode [4].

## 1.9 Avantages et inconvénients de la VLC

### 1.9.1 Les avantages

La communication par lumière visible est connue par ses nombreux avantages, citons à titre d'exemple certaines d'entre elles :

- Augmentation de la bande passante : contrairement aux RF qui se limitent sur une bande passante de quelque GHz la VLC s'étend sur plusieurs THz (430 THz à 790 THz) ce qui permet de résoudre le problème de la congestion du spectre RF, limitant de plus en plus le déploiement de nouveaux appareils et réseaux de communications.

- Absence d'interférences : l'absence de génération de perturbations électromagnétiques. L'utilisation d'ondes lumineuses permet en effet de s'affranchir des problèmes de perturbation qui se posent dans le domaine RF [4].
- Sécurisé : vu que les rayons lumineux restent confinés dans leur environnement et ne traversent pas les objets opaques cela augmente le niveau de sécurité.
- Absence de risques pour la santé : contrairement aux RF qui utilisent les ondes électromagnétiques qui néfaste à la santé humaine, la VLC est épargné de ce problème grâce à l'utilisation des rayons lumineux.
- Économique : la VLC permet de combiner les fonctions de communications et d'éclairage, donc s'appuie sur des émetteurs disséminés un peu partout dans l'environnement avec la condition que l'ampoule soit une LED qui est caractérisée par son faible coût.

### 1.9.2 Les inconvénients

Comme toute technologie la VLC présente quelques inconvénients parmi eux nous citons :

- Interférence et bruit : d'autres sources de lumière artificielles et naturelles, telles que les lampes fluorescentes, à incandescence et solaires, créent un bruit de fond et des interférences car elles partagent la même bande de longueur d'onde que la transmission VLC. Il faut supprimer ces interférences dans la bande pour augmenter le rapport signal sur bruit parasite (SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise) au niveau du récepteur.
- l'impact de la puissance optique émise : dans le domaine de l'infrarouge ou de l'ultraviolet, cela se manifeste par une limitation en puissance liée au danger de ce type de rayonnement sur la rétine ou sur la peau. Dans le domaine du visible, cette limitation est liée à la notion d'éblouissement car le signal émis dépend de l'éclairement fourni par la source. On note également que si on éteint totalement la source lumineuse, on ne peut émettre aucun signal [4].
- Effet de scintillement : en effet, il est possible de voir apparaître des effets de scintillements lors de l'envoi d'informations. Cet effet peut être dû, par exemple, à une longue suite d'états où la lumière est éteinte, créant ainsi une très grande discontinuité du signal optique. Ceci a pour effet de rendre perceptible le changement d'état de la source, conduisant à un inconfort visuel et même parfois à des nausées. Il existe néanmoins de nombreuses méthodes au niveau de la modulation du signal permettant de résoudre ce problème [4].
- Problème de blocage : vu que les rayons lumineux ne traversent pas les objets opaques l'information prévenant de l'émetteur n'arrive pas au récepteur.

## 1.10 Conclusion

À travers ce chapitre nous nous sommes intéressés à la communication par lumière visible dans lequel nous avons présenté les principales bases constituant l'architecture de la technologie de la communication par optique sans fil ; Ces caractéristiques avantageuses prouvent par des arguments que la VLC est une alternative perfectionniste aux techniques traditionnelles de la communication par radio fréquence malgré certains inconvénients qui peuvent être résolu au cours de son développement.

## Chapitre 2

# Modélisation des canaux pour VLC

### 2.1 Introduction

La communication par la lumière visible (VLC) est un sous-ensemble de la communication optique sans fil (OWC) basée à l'origine sur la lumière des diodes électroluminescentes (LED) pour la transmission de données de manière imperceptible à la vision humaine. Grâce à sa large bande passante, sa haute sécurité et son faible coût. La VLC devient une alternative révolutionnaire à la Radio Fréquence (RF). Il existe de nombreuses similitudes entre les canaux VLC et les canaux de la communication infrarouge, sauf qu'elles utilisent différents supports de communication.

Ce chapitre présente une étude complète sur les techniques de modélisation des canaux VLC, décrit les principaux composants du canal VLC et donne les différents modèles des canaux utilisés en intérieur.

### 2.2 Théorie de base de photométrie

Le signal optique émis par la LED, agit comme un Émetteur sans fil et se propage à travers le canal optique où le signal lumineux est influencé par ces facteurs : le flux lumineux, l'intensité lumineuse, l'éclairement, luminance et le radiateur de Lambert.

#### 2.2.1 Flux lumineux

Le flux lumineux est la mesure de la luminosité d'une source lumineuse en terme d'énergie émise. Le flux lumineux, en unités SI, est mesuré en lumen (lm). Il s'agit d'une mesure de l'énergie libérée sous forme de lumière visible à partir d'une source produisant de la lumière. Le flux lumineux est souvent un critère de comparaison des ampoules, il est défini par [32,33]

$$\Phi = \int P(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (2.1)$$

Dont :  $\lambda$  : la longueur d'onde

$d\lambda$  : le flux radial

$P(\lambda)$  : fonction du flux radial

$V(\lambda)$  : l'efficacité lumineuse spectrale.

$d\lambda$  : le flux radial il est donné comme suit :  $dP = P(\lambda)d\lambda$

Le flux radial total devient donc :  $P = \int P(\lambda)d\lambda$

### 2.2.2 Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse est une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz dont l'intensité énergétique dans cette direction est  $1/683$  watt par stéradian dans une direction donnée [33,34].

Cette unité est utilisée pour quantifier la quantité de lumière fournie par une source directive. Elle ne dépend pas de la distance d'observation.

L'intensité lumineuse est définie par :

$$I = d\Phi/d\Omega \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Éclairement

L'éclairement représente la densité du flux lumineux reçu par un objet région. Il est exprimé en lux (lx).

$$E = \varphi/S \text{ en lx} \quad (2.3)$$

Dont :  $\varphi$  représente le flux lumineux et  $S$  représente la surface de la zone d'éclairage .

Si la source d'éclairage uniforme est un domaine très large, l'éclairement moyen  $E_0$  est le flux lumineux total  $\varphi$  divisée par la surface totale  $S$ .

### 2.2.4 Luminance

La luminance  $L(\Phi)$  est le flux lumineux par unité de surface projetée par unité d'angle solide, cette une grandeur Correspond à la perception visuelle de la luminosité de surface défini par [35,36] :

$$L(\varphi) = \frac{I(\varphi)}{dS \cos \varphi} \quad (2.4)$$

Dont :  $I$  : intensité lumineuse de la source.

$dS$  : surface réelle de la source.

$\varphi$  : angle sous lequel est vue cette source.

### 2.2.5 Radiateur de Lambert :

La loi de Lambert ou la loi du cosinus de Lambert énonce que l'intensité de rayonnement observée à partir d'un radiateur diffuse idéal est directement proportionnelle au cosinus de l'angle  $\theta$  entre la direction de lumière incidente et la surface normale.

L'intensité lumineuse est définie par :

$$I = I_0 \cos(\theta) \quad (2.5)$$

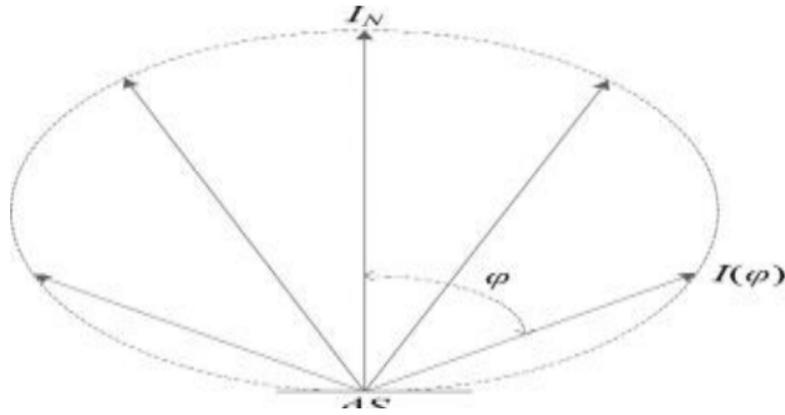


FIGURE 2.1 – Schéma d'un radiateur de Lambert [37].

## 2.3 Modélisation des canaux pour les communications par lumière visible

Les caractéristiques du canal sans fil optique peuvent varier considérablement en fonction du canal sans fil optique toutes les technologies de communication au sein des OWC partagent des conceptions de liens communes. Cependant, certains liens ne s'appliquent qu'à des scénarios spécifiques, il est pratique de classer les configurations de liaison OWC selon trois critères. Premièrement, le degré de directionnalité de l'OTx et de l'ORx. Deuxièmement, l'existence d'un chemin LoS ininterrompu entre l'OTx et l'ORx. Troisièmement, l'angle de divergence OTx et le FoV de l'ORx[38]. Il existe deux schémas de configuration de liaison de base pour l'intérieur du système OWC : le LOS et NLOS.

### 2.3.1 LOS

Le dirigé Liaison optique LOS utilise un angle de divergence très étroit émetteur et un récepteur à champ de vision étroit (FOV), il offre la perte de chemin minimale et des débits de données plus élevés ; cependant au coût d'une mobilité limitée et d'un alignement rigoureux des liaisons. Dans les études précédentes, sans erreur pratique des systèmes OWC intérieurs jusqu'à 12,5 Gb/s ont été démontrés dans une liaison LOS dirigée [39].

Comme l'émetteur est considéré Lambertien généralisé, son intensité rayonnée est donnée par l'équation suivante :

$$R_0(\varphi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\varphi) \quad (2.6)$$

Dont :  $\varphi$  : Angle de rayonnement de la LED.

$m$  : l'ordre généralisé Lambertien de l'émetteur. Lorsque  $m=1$ , on dit que l'émetteur est « Lambertien » [4].

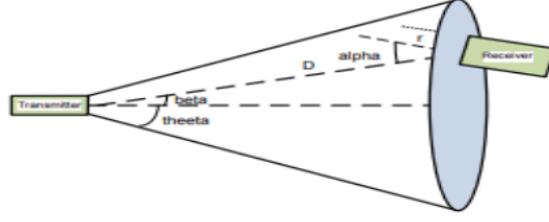


FIGURE 2.2 – Illustration d’un lien LOS entre un émetteur et un récepteur [14].

L’une des caractéristiques les plus critiques d’un système VLC est le gain en courant continu (CC) du canal. Il renvoie le rapport signal/bruit réalisable pour une puissance d’émission fixe et peut être exprimé comme suit [8] :

$$H(0) = \int_0^{\infty} h(t)dt \quad (2.7)$$

$$\text{Dont : } H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d^2} \cos^m \Phi T_s(\psi)g(\psi) \cos \psi & , 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & 0 \geq \psi_c \end{cases} \quad (2.8)$$

Dont :  $A_{PD}$  représente la surface PD.

$m$  est le lambertien numéro de mode.

$d$  désigne la distance des LED au point Rx.

$T_s(\psi)$  est le filtre optique gain.

$g(\psi)$  est le gain du concentrateur optique.

### 2.3.2 NLOS

NLOS offre une excellente mobilité mais souffre de la perte de trajet élevée et de la dispersion par multiples trajets, qui conduit finalement à la limitation de la bande passante de transmission. La liaison LOS non dirigée utilise des émetteurs grands angles et ses récepteurs sont particulièrement utilisés pour les terminaux mobiles. Cependant, peu d’attention a été donnée aux liaisons LOS non dirigées avec de grandes zones de couverture nécessaire pour les applications intérieures OWC, où la réflectivité des murs et du plafond ne peut être ignorée. Il existe un certain nombre d’études menées sur la dispersion par trajets multiples caractéristiques des canaux intérieurs OWC pour les systèmes diffus. Dans toutes les études, la source lumineuse lambertienne a été adoptée, négligent donc l’optimisation de l’émetteur caractéristique en termes de diagramme de rayonnement [38].

Sur l’éventualité d’une réflexion sur une surface Lambertienne nous pouvons spécifier la RI  $hn \text{ los}(t)$  pour toutes les contributions pour la première réflexion dans  $N$  éléments réfléchissants [4] :

$$hn \text{ los}(t)(1) = \frac{A_{phy} (m+1)}{2\pi^2} \sum_{j=1}^{N_R} \rho_j \cos^m(\Phi_{1j}) \cos(\Phi_{2j}) \frac{\cos(\Psi_{1j}) \cos(\Psi_{2j})}{d_{1j}^2 d_{2j}^2} \Delta A \cdot \delta\left(t - \frac{d_{1j} + d_{2j}}{c}\right) \quad (2.9)$$

Dont :  $\phi_{1j}$  : l’angle d’irradiation de source.

$\psi_{2j}$  est l’angle d’incidence au niveau de la surface du récepteur.

$\phi_{2j}$  et  $\psi_{1j}$  sont respectivement les angles d’irradiation et d’incidence par rapport à l’élément de surface.

$\rho_j$  : la réflectivité de l’élément de surface de taille  $\Delta A$ .

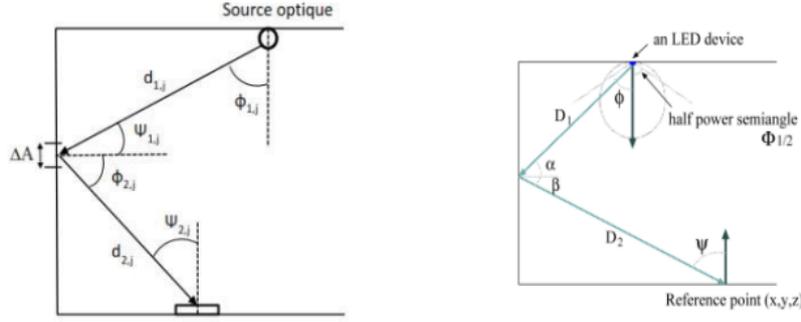


FIGURE 2.3 – Illustration d'un lien NLOS entre un émetteur et un récepteur [5]

## 2.4 Caractéristiques des émetteurs à LED

L'éclairage a parcouru un long chemin depuis les feux et les bougies Jusqu'à la LED, la durée de vie et l'efficacité lumineuse des lampes à LED sont nettement supérieures à celles de toutes les technologies d'éclairage traditionnelles.

La LED est un dispositif semi-conducteur à l'état solide qui a la capacité de transformer directement l'énergie électrique en énergie lumineuse, les LEDs sont utilisées comme émetteurs dans les systèmes VLC [40].

### 2.4.1 Les caractéristiques de puissance des émetteurs à LED

Dans la VLC, les LEDs sont le composant clé utilisées à la fois pour l'éclairage intérieur et la communication. La caractéristique de transfert des LEDs entraîne des contraintes de puissance optique uniques imposées aux signaux transmis, la puissance ( $P_t$ ) émise est obtenue par [41] :

$$P_t = \int P_t(\lambda) d\Lambda \quad (2.10)$$

Dont  $P_t(\lambda)$  est une fonction de la puissance du spectre sur la longueur d'onde.

### 2.4.2 Mode de rayonnement

La LED est également appelée un dispositif à grande surface éclairée car une LED diffuse son énergie lumineuse dans toutes les directions, plutôt que de générer un faisceau directionnel qui est lié à sa propre conception d'ouverture.

Il n'est pas nécessaire de limiter strictement la puissance d'émission des LEDs pour des raisons de sécurité puisque cette puissance ne cause aucun problème à la rétine de l'œil humain, ce qui est différent de la source lumineuse à diode laser et elles sont donc mieux adaptées aux applications intérieures.

La Fonction d'intensité de l'énergie de rayonnement suit les lois de Lambert, comme le montre l'équation suivante [37] :

$$R(\varphi) = \frac{(m+1)}{2\pi} p_t \cos^m(\varphi) \quad (2.11)$$

Avec :  $R(\varphi)$  est l'intensité de rayonnement,  $m$  exprime l'index de Lambert d'une source de lumière LED, et  $\varphi$  représente l'angle entre la direction d'émission de la lumière et la source de lumière normale

### 2.4.3 LED inorganique pour une lumière blanche

Traditionnellement, l'éclairage de la pièce est réalisé avec des LEDs de lumière blanche. Elle est constituée d'un mélange hétérogène de toutes les couleurs composant le spectre visible. Actuellement, il est très difficile à partir d'une LED seule de générer une lumière blanche. Donc, on utilise principalement deux types de méthodes [4] :

#### 2.4.3.1 Les LEDs bleues avec phosphore

Une LED à conversion de phosphore utilise une seule puce LED bleue en nitrure d'indium et de gallium pour pomper un revêtement de phosphore en grenat d'yttrium et d'aluminium. Le phosphore convertit une partie de la lumière bleue en vert, jaune et rouge du spectre, tandis que l'autre partie de la lumière bleue s'échappe, donc le mélange produit du blanc. En fonction de la quantité de phosphore, la lumière blanche produite par les LEDs à conversion de phosphore peut être classée comme blanc chaud, blanc neutre ou blanc froid, et elles sont caractérisées par une température de couleur corrélée [4].

#### 2.4.3.2 Les LEDs Rouges-Vertes-Bleues (RVB) (en anglais Red-Green-Blue (RGB))

L'approche "multi puces" utilise au moins trois puces à LED émettant différentes couleurs, généralement rouge, vert et bleu (RGB), pour produire une lumière blanche. En fonction de l'intensité lumineuse des différentes puces, il est aussi possible de contrôler les couleurs.

Les LEDs multi puces ont un indice de rendu des couleurs inférieur à celui des pcLED. Les LEDs à conversion de phosphore sont moins chères et moins complexes que ces LEDs multi puces, mais elles ont une largeur de bande limitée, en raison de la faible conversion du phosphore [40].

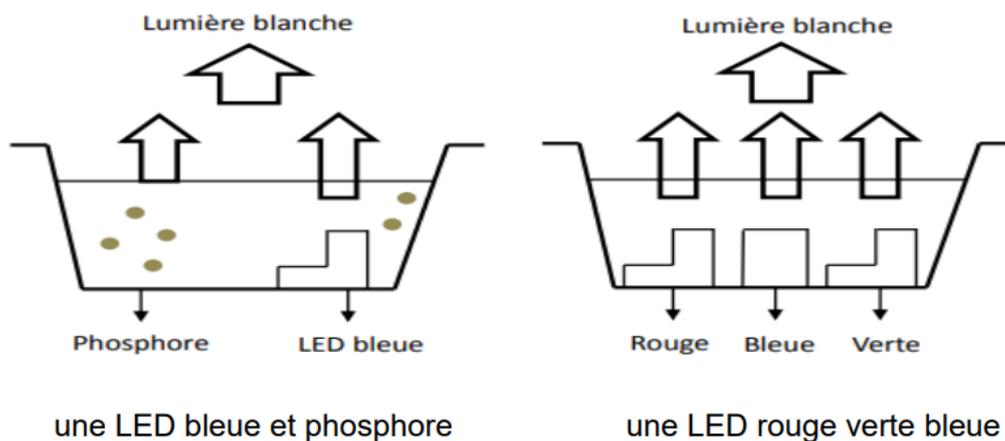


FIGURE 2.4 – Génération d'une lumière blanche [5].

## 2.5 Systèmes de communication à lumière visible

Dans les systèmes VLC, les LEDs sont généralement utilisées comme sources lumineuses pour émettre le signal lumineux souhaité. Le signal optique émis peut diffuser dans l'espace libre vers un récepteur, communément appelé photo-détecteur. Le récepteur collecte non seulement le signal lumineux souhaité, mais également d'autres signaux lumineux (appelés bruit lumineux). Cela dégrade la qualité de la communication VLC, nous pouvons utiliser des filtres optiques pour réduire l'effet du

bruit optique de la lumière ambiante. Habituellement, les concentrateurs optiques sont utilisés pour améliorer le rapport signal sur bruit du récepteur-concentrateurs optiques et pour améliorer le rapport signal sur bruit du récepteur.

Le modèle de base du canal est donné par[37] :

$$Y(t) = X(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (2.12)$$

La sortie  $Y(t)$  de ce système LTI est en fait le courant photoélectrique produit par la photodiode. L'entrée  $X(t)$  est le photo-courant équivalent théoriquement transmis par la source lumineuse.

La première source de distorsion introduite par le canal FSO est l'atténuation due à la réponse impulsionnelle du canal  $h(t)$ ,

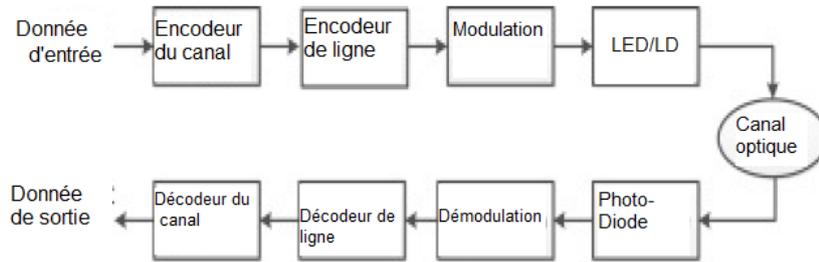


FIGURE 2.5 – Système de la VLC.

En effet, La fonction du circuit Line Encoder est la conversion des signaux électriques en signaux optiques. Après le codage de ligne, une modulation est effectuée et enfin les données sont envoyées à la LED pour la transmission via le canal optique.

Dès que le photo-détecteur reçoit le signal lumineux le signal sera démodulé et décodé par un circuit décodeur de ligne (Line Decoder), qui convertit le signal optique en un signal électrique [37].

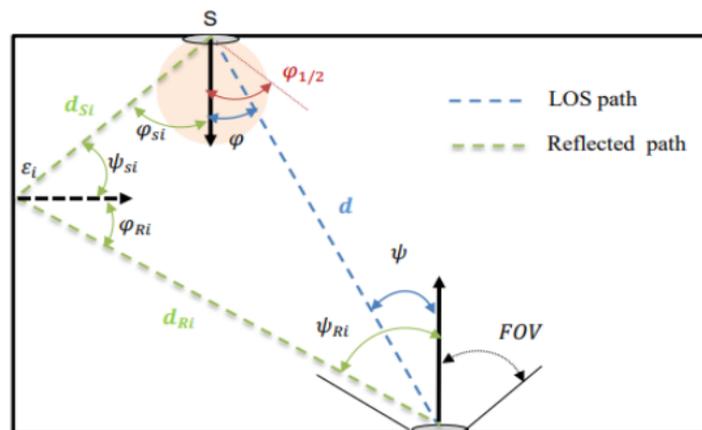


FIGURE 2.6 – Schéma sur la Géométrie de la liaison LOS et du chemin réfléchi[14]

### 2.5.1 Les caractéristiques d'éclairage des émetteurs à LEDs

L'éclairage fait référence à la luminosité d'une surface éclairée par une source lumineuse. Plus précisément, il peut être défini comme le flux lumineux par unité de surface. Si l'on ne tient pas compte

des effets de bord, l'éclairement horizontal peut être donné par :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I(\varphi)}{r^2} \quad (2.13)$$

Dont :  $I(\varphi)$  est l'intensité lumineuse dans la direction  $\varphi$ .  $r$  est la distance entre la source lumineuse et le récepteur de l'angle spatial [37].

## 2.5.2 Caractéristiques des récepteurs

Dans les systèmes VLC, l'élément central d'un récepteur est un photo-détecteur. Ce composant convertit les signaux optiques reçus en signaux électriques. Sur la base des travaux publiés dans la littérature, on sait que les principaux paramètres associés à la zone physique du récepteur sont la photodiode, le champ de vision du récepteur, la réactivité d'un détecteur, et ainsi de suite.

D'une manière générale, le récepteur utilisera la technique d'assemblage pour supprimer le bruit de la lumière parasite, tout en permettant une détection optimale des signaux optiques souhaités.

En outre, le récepteur comprend souvent un filtre de lumière, un concentrateur optique, une lentille optique et un amplificateur connecté à son extrémité arrière.

Un récepteur doit avoir une grande zone de réception pour assurer un bilan de liaison suffisamment élevé. Nous pouvons utiliser un concentrateur optique pour y parvenir.

Un concentrateur optique peut améliorer de manière significative la zone effective de réception du signal, fournir un gain effectif sans bruit, augmenter le gain de réception d'un récepteur et éviter d'utiliser une plus grande surface de photo-détecteur. Cette conception est également importante pour obtenir une optimisation du bilan de puissance et peut améliorer la distance de transmission entre les récepteurs [37].

Dans une application intérieure classique, le gain d'un concentrateur optique peut être calculé comme suit :

$$g(\theta) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi C} & 0 \leq \theta \leq \Psi C \\ 0 & \theta > \Psi C \end{cases} \quad (2.14)$$

Où  $c$  désigne le champ de vision ou « Field of View » FOV du récepteur,  $n$  représente l'indice de réflexion d'un concentrateur optique et  $\theta$  est l'angle d'incidence du rayonnement lumineux.

## 2.6 Description des canaux de communication par lumière visible

Les systèmes intérieurs VLC sont considérés comme optiques dans un espace confiné pour comprendre les caractéristiques du canal de lumière visible pour la conception d'un système de communication haute performance, nous devons comprendre la nature du canal VLC intérieur [37].

### 2.6.1 Modèle de canal proposé par Lee et AL

En 2010, Lee et al ont établi un modèle de canal VLC basé sur la communication infrarouge. Qui a été largement utilisé dans les systèmes VLC aujourd'hui en tenant compte du fait qu'un environnement intérieur est stable, nous supposons que le bruit dans le modèle Lee est un bruit blanc Gaussien. Ils ont considéré les propagations directes et réfléchies et ont dérivé l'expression mathématique de la fonction

de réponse impulsionnelle du canal pour décrire les caractéristiques du canal.

$$h(t) = \sum_{N=1}^{N_{led}} \sum_{k=0}^{k=\infty} h(k)(t; P) \quad (2.15)$$

Ce modèle de canal présente des avantages qui sont : plus grande bande passante, réflectivité inférieure, modèle est largement utilisé ; mais le nombre de LED n'est pas déterminé [37].

### 2.6.2 Modèle de canal proposé par Rajbhandari et Al

Rajbhandari et Al ont analysé les performances d'égalisation d'un canal optique diffus intérieur utilisant ANN dans le système PPM. Le modèle de canal qu'ils ont utilisé était basé sur un modèle de canal de communication infrarouge établi par Carruthers et Kahn et al. En supposant que le canal soit invariant dans le temps, Carruthers et Kahn ont proposé un modèle de rebond de plafond dans les liaisons sans fil à lumière diffusée à l'intérieur. Ce modèle de canal est invariant dans le temps qui est un critère avantageux.

### 2.6.3 Modèle proposé par Ding De-qiang et Al

En 2010, Ding De-qiang et al ont proposé un modèle de canal intérieur VLC basé sur un algorithme de simulation rapide à traçage rapide de rayons qui fonctionne sur la base d'un modèle de réflexion Lambert-Phong classique et peut être utilisé pour étudier les canaux à trajets multiples. Parmi les avantages de ce modèle nous trouverons le canal LOS et NLOS et il est utile pour comprendre les approches de modélisation.

La réponse impulsionnelle d'un canal dans la littérature est donnée par [37] :

$$H_{VLC}(t) = h_{los}(t) + h_{Nlos}(t) \quad (2.16)$$

### 2.6.4 Modèle de canal proposé par Zhou Zhou et Al

Zhou Zhou et Al ont construit un modèle de canal VLC intérieur basé sur leur propre système expérimental développé en 2014 typiquement adapté à la communication sans fil. ils ont spécifiquement analysé l'impact du modèle de canal optique intérieur sur un système VLC en termes de taux d'erreur binaire induit par des réflexions multiples et ont expliqué que les exigences pour la transmission de données à haut débit Mbps ou Gbps ne peut pas être satisfaite si l'on considère une seule réflexion ou au plus trois réflexions comme cela est effectué traditionnellement [37].

### 2.6.5 Modèle d'intégration de sphère

Le modèle de sphère d'intégration a été utilisé à l'origine dans la communication infrarouge et la caractéristique la plus importante du modèle est que le même gain de signal diffusé est supposé dans toute la pièce par contre ce modèle doit prendre en compte de nouveaux facteurs dans les systèmes VLC.

## 2.7 Modélisation du bruit en VLC

Le canal optique dans la communication par lumière visible peut être parasité par deux sources de bruits : le bruit optique ambiant provenant des sources lumineuses comme le soleil et les lampes ainsi qu'au bruit thermique généré par les éléments résistifs du récepteur[42].

### 2.7.1 Bruit optique ambiant

Retrouver majoritairement dans la communication optique sans fil pour un milieu indoor, le bruit optique ambiant provient de la lumière du soleil, la lumière émise par une lampe à incandescence et par les lampes fluorescentes. On peut noter que la puissance de bruit dépend principalement de la longueur d'onde et cela justifie l'importance du choix de la longueur d'onde dans la conception des systèmes de communications optiques sans fil, comme le montre la figure ci-dessous :

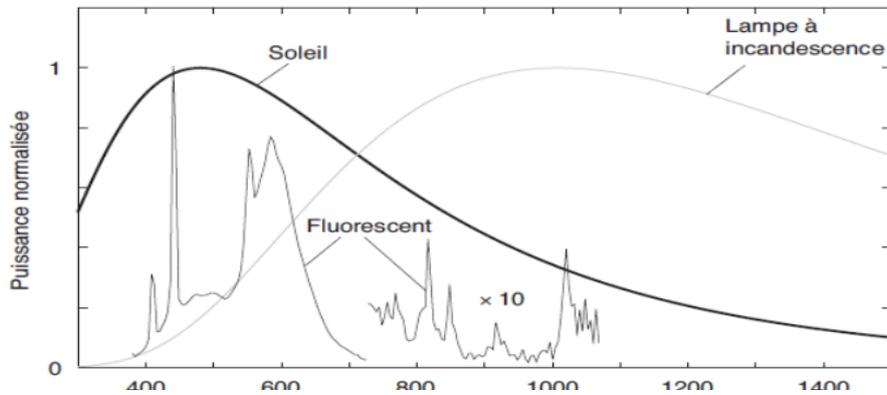


FIGURE 2.7 – Le spectre de puissance des différentes sources de bruits en fonction de la longueur d'onde de la communication [43].

L'expression de la variance du bruit ambiant est donnée par [42] :

$$\sigma_{\text{ambiant}}^2 = 2q (I_{rx} + I_{\text{rambient}}) B_n \quad (2.17)$$

Dont :  $q$  est la charge élémentaire de l'électron,

$I_{rx}$  et  $I_{\text{rambient}}$  sont respectivement le courant du signal généré par la photodiode et le courant de la lumière ambiante

$B_n = I_2$  et  $R_b$  avec  $I_2$  est le facteur de la bande passante du bruit et  $R_b$  e débit

### 2.7.2 Bruit optique ambiant

Le bruit thermique est un bruit généré par la résistivité des circuits électroniques du récepteur. Le préamplificateur est le composant récepteur qui est la principale source de ce type de bruit, ils sont couramment utilisés dans les récepteurs pour les signaux reçus, en particulier lorsque les photodiodes de réception sont des photodiodes PIN. Parmi les différents préamplificateurs, le préamplificateur transimpédance qui interfère avec la résistance de sortie et avec le transistor à effet de champ est le préamplificateur qui produit le minimum. Avec la bonne sélection du circuit électronique du récepteur, il est possible de minimiser ce type de bruit et ainsi de le rendre insignifiant par rapport au bruit ambiant [43].

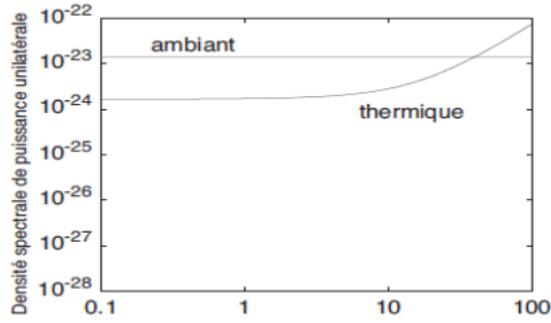


FIGURE 2.8 – Densité spectrale de puissance unilatérale de bruit en fonction de la fréquence du signal optique [43].

la variance du bruit thermique s'exprime par [42] :

$$\sigma_{\text{thermique}}^2 = \frac{8\pi n K T_k A R_b I_2 B^2}{G} + \frac{16\pi^2 n^2 K T_k \Gamma R_b^2 A^2 I_3 B^3}{g_m} \quad (2.18)$$

Dont :  $K$  est la constante de Boltzmann,  $T_k$  est la température absolue,  $G$  le gain en tension de circuit en boucle ouvert,  $\Gamma$  est le facteur de bruit du transistor FET égale à 1.5,  $n$  la capacitance de la photodiode par unité de surface et  $g_m$  la transconductance

La variance du bruit total est alors la somme de celles du bruit optique ambiant et du bruit thermique, les deux correspondant à un bruit blanc Gaussien [4] :

$$\sigma^2 \text{ noise} = \sigma^2 \text{ shot} + \sigma^2 \text{ thermal} \quad (2.19)$$

## 2.8 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et la description des canaux dans la communication par lumière visible et les caractéristiques des émetteurs et récepteurs avec les différents modèles de LED utilisées ainsi qu'aux bruits qui peuvent parasiter le canal VLC.

# Chapitre 3

## Méthode D'optimisation

### 3.1 Introduction

L'optimisation est un domaine faisant partie des mathématiques et de l'informatique, elle a été conçue spécialement pour résoudre les problèmes dont les techniques traditionnelles existantes n'ont pas pu être adoptées pour trouver une solution.

Par conséquent, de nombreux domaines tels que : la physique et la biologie ont utilisé l'optimisation pour minimiser, maximiser une fonction dite objectif comportant des paramètres et elle est soumise à des contraintes pour arriver à une solution optimale.

L'optimisation consiste à modéliser le problème en algorithme et utiliser par la suite des méthodes d'optimisation approchées qui sont les heuristiques et les métaheuristiques pour trouver une solution efficace, Ces problèmes sont identifiés par les classes P, NP, NP-complet et NP-difficile.

### 3.2 Définition de l'optimisation

L'optimisation c'est l'art de comprendre un problème réel, et d'être capable de transformer en un modèle mathématique que l'on peut étudier afin d'en extraire les propriétés structurelles et de caractériser les solutions du problème. En outre, c'est l'art d'exploiter cette caractérisation afin de déterminer des algorithmes qui les calculent, mais aussi de mettre en évidence les limites sur l'efficacité et l'efficacité de ces algorithmes.

Pour résoudre un problème d'optimisation, il est nécessaire de passer par trois étapes d'études particulières : Premièrement, l'analyse du problème : qui consiste à mettre en avant les contraintes du problème qui seront modélisées, par la suite se fait la représentation informatique qui sert à définir et coder l'ensemble des solutions réalisables. Deuxièmement, la fonction objectif à optimiser : dans laquelle il est primordiale d'avoir une bonne maîtrise du problème. Troisièmement, le choix de la méthode de résolution : qui permet d'apporter une solution optimale par rapport à la fonction d'évaluation à partir de la représentation du problème dans l'espace de recherche. [44]

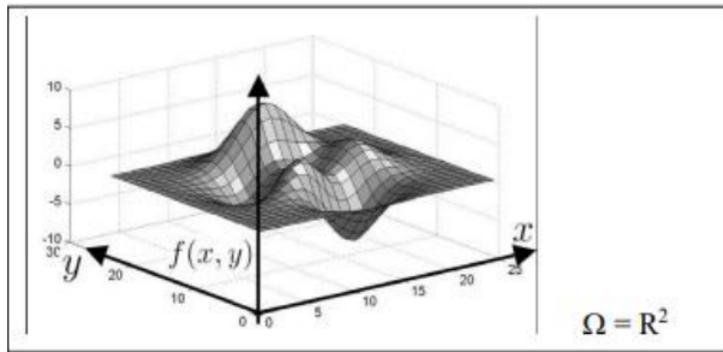


FIGURE 3.1 – Représentation graphique d'un objectif en 2D.[45]

### 3.2.1 Formulation mathématique

Soit  $X$  l'ensemble des solutions au problème d'optimisation.  $X$  Peut-être un ensemble à  $n$  dimensions, ou un ensemble binaire :

—  $X = \{0, 1\}^n$  ou valeurs réelles.

—  $X \in \mathbb{R}^n \dots$  etc.

Dont : Le domaine  $X$  est l'espace de recherche.

Considérons un problème d'optimisation défini par la fonction  $f$  appelée func (ou cost fonction, fonction d'erreur, fonction objectif) et qui est défini pour évaluer la qualité des solutions candidates dans  $X$  sur un problème donné :  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$

Une optimisation de problème consiste à trouver une solution qui maximise ou minimise la fonction objectif  $f$  telle que :

$\forall Y \in X : f(X) > f(Y)$  pour la maximisation.

$\forall Y \in X : f(X) < f(Y)$  pour la minimisation.

### 3.3 Domaines d'application

Les problèmes d'optimisation combinatoires sont appliqués dans plusieurs domaines, parmi eux on trouve [46] :

- Services publics : hôpitaux, transport public, informatique.
- Industrie : automobile, aviation, énergie, télécommunication, production.
- Finances : gestion de portefeuille.
- Militaire : gestion des ressources, logistique.
- L'économie : planification de projets, organisation d'activités, affectation de tâches, les problèmes de transport.
- L'informatique : conception de programmes, implémentation des systèmes informatiques.
- La sociologie : modélisation et étude de phénomènes sociaux.

## 3.4 Notions et concepts relatifs à l'optimisation

La formulation des problèmes d'optimisation est encore très ambiguë du fait de la variété des vocabulaires comme (Optimum global et local, l'exploitation et l'exploration, l'espace d'état, les variables, fonction d'état, contraintes) et des possibles confusions qui peuvent en résulter.[47]

### 3.4.1 Optimum global et l'optimum local

L'optimum représente la solution de la fonction objectif qu'on veut maximiser ou minimiser. On parle d'optimum global lorsqu'on cherche la meilleure solution possible, par contre si on cherche des solutions intermédiaires dans un sous-espace restreint de l'espace d'état on parle alors de l'optimum local.[48]

On dit que  $x$  est minimiseur ou maximiseur local de  $f$  sur  $D \subset \mathbb{R}^n$  lorsque  $x \in D$  et il existe un voisinage  $V$  tel que :

$$\forall y \in D \cap V, \quad f(x) \leq f(y) \quad (3.1)$$

$$\forall y \in D \cap V, \quad f(x) \geq f(y) \quad (3.2)$$

Dont  $f(x)$  est l'optimum local de  $f$  sur  $D$ .

On dit que  $x$  est minimiseur ou maximiseur global de  $f$  sur  $D \subset \mathbb{R}^n$  lorsque  $x \in D$  et il existe un voisinage  $V$  tel que :

$$\forall y \in D, \quad f(x) \leq f(y) \quad (3.3)$$

$$\forall y \in D, \quad f(x) \geq f(y) \quad (3.4)$$

Dont  $f(x)$  est l'optimum global de  $f$  sur  $D$ .

### 3.4.2 Exploitation et exploration

Les algorithmes d'optimisation nécessitent deux stratégies pour trouver l'optimum global : l'exploitation et l'exploration. L'exploitation : permet d'exploiter la connaissance acquise aux points visités pour trouver le meilleur point et elle affine la solution trouvée grâce à l'augmentation de la précision de l'optimum. L'exploration : est utilisée pour la recherche des régions inexplorées de l'espace d'état et localise l'optimum global de façon imprécise[49].

### 3.4.3 Espace d'état

L'espace de l'état est un espace qui regroupe les différents domaines de définitions représentant les variables présentes dans le problème.

### 3.4.4 Les variables

Nous avons différentes natures de variables de conception ou de décision (réelle, entière, booléenne, etc.) qui expriment des données qualitatives ou quantitatives constituant le problème.

### 3.4.5 La fonction objectif

Dite aussi fonction coût, elle comporte des paramètres du problème d'optimisation à minimiser ou à maximiser généralement soumise à des contraintes [50].

### 3.4.6 Contraintes

Représentent un ensemble de restrictions à respecter obligatoirement pour satisfaire une solution acceptable au problème.

## 3.5 Classification des problèmes d'optimisation

Les problèmes d'optimisation sont classés selon des types différents, nous citons une classification selon : la complexité des problèmes, classification avec et sans contraintes, la nature des problèmes, le nombre d'optimums, le type de la fonction objectif.

### 3.5.1 Classification selon la complexité du problème d'optimisation

Dans cette catégorie nous trouvons trois classes de problèmes définie suite à la difficulté de l'algorithme utilisé, nous citons problème d'optimisation de complexité  $P$ , complexité  $NP$  et  $NP$ -complet.

#### 3.5.1.1 Problème de complexité $P$

Contient des problèmes polynomiaux facile à résoudre dont lesquels les algorithmes sont efficaces et connu à travers lesquels on peut construire une machine déterministe dont le temps d'exécution est de complexité polynomiale d'où l'acronyme  $P$  veut dire « Polynomial Time » [50].

#### 3.5.1.2 Problème de complexité $NP$

Les problèmes de cette classe donnent la possibilité de construire une machine de Turing non déterministe dont le temps d'exécution est de complexité polynomiale qui a la capacité de toujours choisir la meilleure séquence d'instructions qui mène à la bonne réponse existante [51].

#### 3.5.1.3 Problème de complexité $NP$ -Complet

C'est un sous-ensemble au sein de l'ensemble des problèmes  $NP$ , dans cette classe si un algorithme polynomial pour un problème  $NP$ -complet est défini une solution polynomiale pour tous les problèmes de la classe  $NP$  est trouvée [51].

### 3.5.2 Classification avec et sans contraintes

Cette classification se base sur l'existence des contraintes sur l'espace d'état. Ces contraintes peuvent être des bornes ou un ensemble d'équation de type égalité ou inégalité, dans le cas d'une contrainte égalité on peut la supprimer dans la fonction objectif en outre, les problèmes avec contraintes sont plus complexes à résoudre et utilisent des algorithmes spécifiques [52].

### 3.5.3 Classification des problèmes d'optimisation selon la nature des problèmes

Les deux classes d'optimisation (optimisation continue et optimisation discrète) sont définies à partir de la nature de l'ensemble de recherche  $X$ .

#### 3.5.3.1 Problèmes d'optimisation continue

Si les éléments d'entrée de l'espace de recherche varie dans le temps donc on parle alors de problème d'optimisation continue [53].

### **3.5.3.2 Problèmes d'optimisation discrète**

Contrairement aux problèmes d'optimisation continue, les problèmes d'optimisation discrète sont plus complexes. On reconnaît l'optimisation discrète par l'ensemble de recherche qui est discret et infini, la représentation de sa fonction objectif forme un nuage de points [53].

### **3.5.4 Classification des problèmes d'optimisation selon le nombre d'optimums**

#### **3.5.4.1 Optimums uni-modaux**

Lorsqu'un espace de recherche ne contient qu'un optimum global on parle alors de problème d'optimisation uni-modale.

#### **3.5.4.2 Optimums multimodaux**

Contrairement à l'optimum uni-modal qui contient qu'un optimum global, l'optimum multimodal en possède plusieurs dans son espace de recherche ce qui donne la facilité de trouver plusieurs optimum globaux.

### **3.5.5 Classification des problèmes d'optimisation selon le type de la fonction objectif**

#### **3.5.5.1 Problème d'optimisation mono-objectif**

Un problème mono-objectif est défini par un ensemble de variables, une fonction objectif et un ensemble de contraintes. Dans ce cas la solution optimale est clairement définie, c'est celle qui a le coût optimal (minimal, maximal). [47,54]

#### **3.5.5.2 Problème d'optimisation multi-objectif**

Contrairement au mono-objectif, un problème multi-objectif est représenté par un ensemble de fonctions objectif, un ensemble de variables et un ensemble de contraintes [47]. Pour rendre un problème multi-objectif plus simple il est possible de transformer des objectifs en contraintes [53].

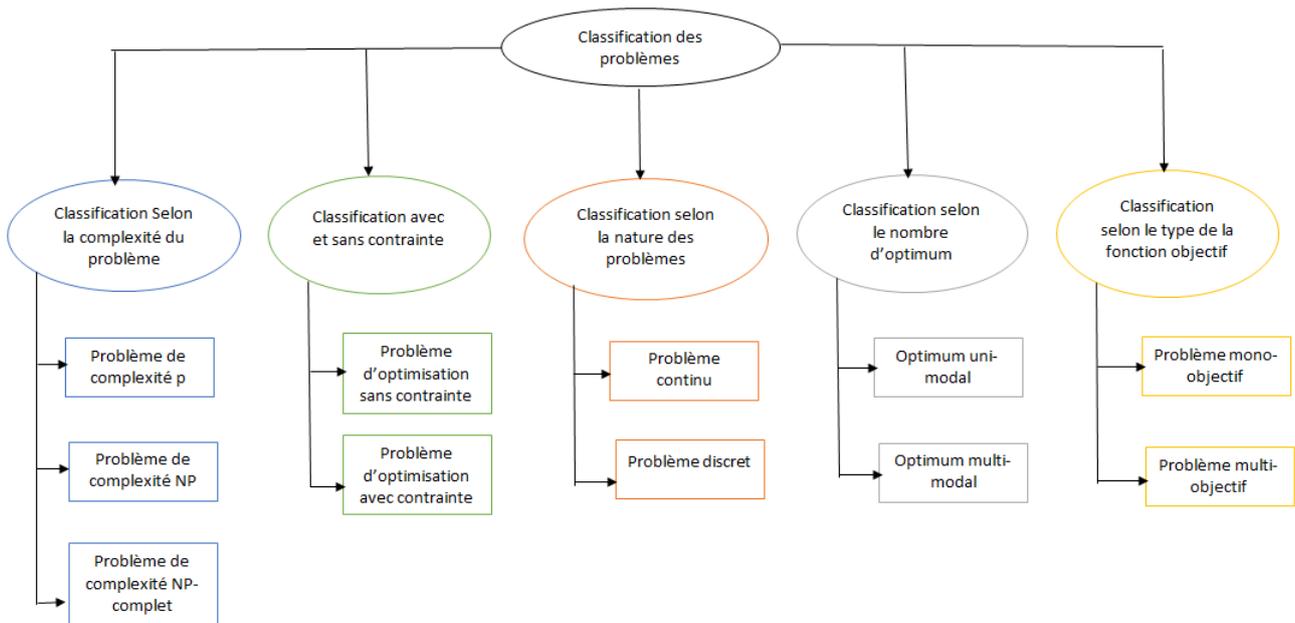


FIGURE 3.2 – Classification des problèmes d'optimisation.

### 3.6 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Il y a deux catégories principales de résolution pour l'optimisation combinatoire, ces catégories sont les méthodes exactes et les méthodes approchées (heuristiques).

Les méthodes exactes permettent de chercher des solutions optimales pour des problèmes de taille raisonnable. Le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution dépend de la taille du problème. Pour ce type de méthodes on décompose le problème en plus petits sous-problèmes plus faciles à résoudre et on combine les résultats jusqu'à arriver à résoudre le problème initial. Parmi ces méthodes on a la méthode par séparation et évaluation (branch and bound).

Par contre, les algorithmes approximatifs rendent la possibilité d'atteindre une solution proche de la solution optimale avec un temps raisonnable. Les méthodes approchées sont fondées principalement sur diverses heuristiques souvent spécifiques à un type de problème, on peut citer des heuristiques très simples comme les algorithmes gloutons ou les approches par amélioration itérative [44].

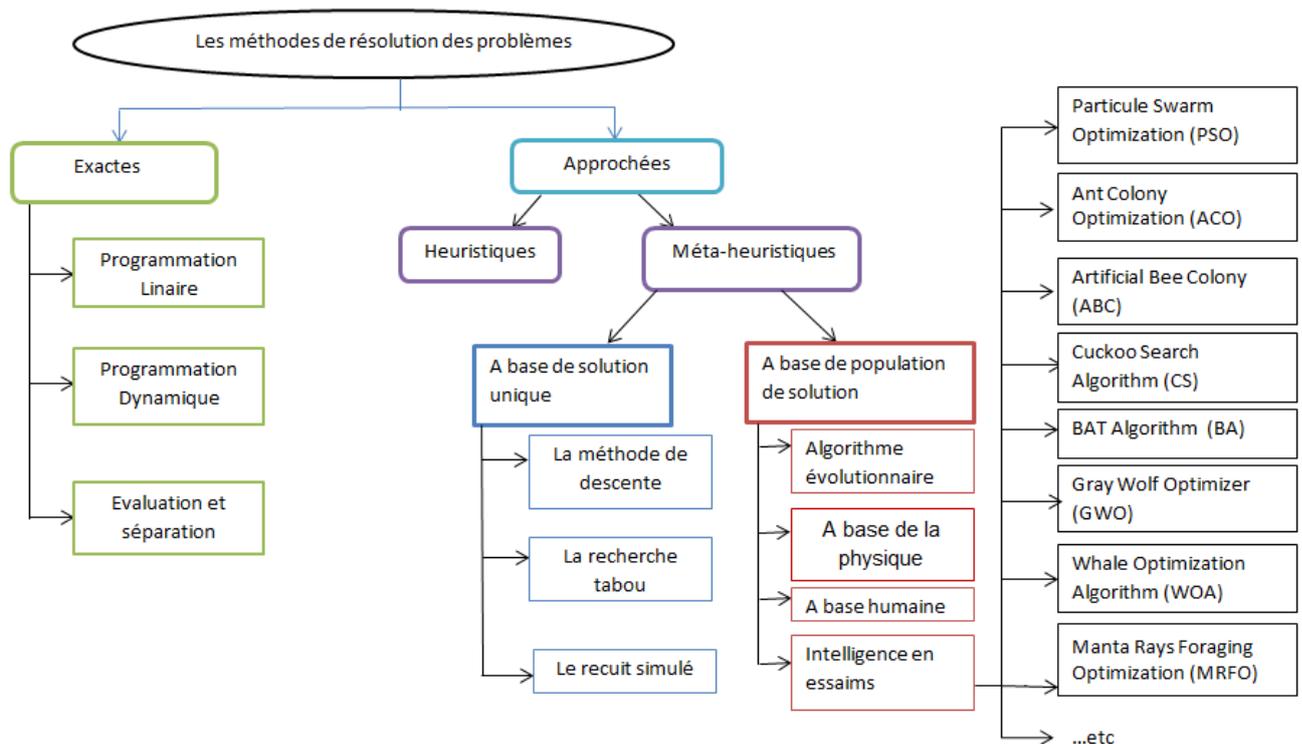


FIGURE 3.3 – Classification des méthodes de résolution des problèmes d’optimisation.

### 3.6.1 Les algorithmes approximatifs

Une méthode approchée (incomplète) est une méthode d’optimisation qui vise à trouver une solution réalisable de la fonction objectif dans un délai raisonnable, mais sans aucune garantie d’optimalité. Le principal avantage de ces méthodes est qu’elles peuvent être appliquées à n’importe quelle classe de problèmes, faciles ou très difficiles. Elles peuvent être classées en deux catégories : heuristiques et méta-heuristiques [55].

#### 3.6.1.1 Heuristiques

Le mot heuristique, dérivé du Grec "heuriskein", signifie découvrir, une heuristique est une règle d’estimation, une stratégie, une méthode ou astuce utilisée pour décider qui parmi plusieurs d’autres plans d’actions promet d’être le plus efficace pour atteindre un certain but.

#### 3.6.1.2 Méta-heuristiques

Le terme méta-heuristique a été introduit par Glover en 1986, pour différencier la recherche avec tabous des autres heuristiques. Une méta-heuristique est un mécanisme itératif qui subordonne et guide une heuristique en combinant intelligemment plusieurs concepts pour explorer et exploiter tout l’espace de recherche.

La particularité qui différencie les méthodes méta-heuristiques des méthodes heuristiques c’est que les méta-heuristiques sont applicables sur de nombreux problèmes ; Pendant que, les heuristiques sont spécifiques à un problème donné.

Les méta-heuristiques se divisent en deux catégories : les méthodes à base de solution unique et les méthodes à base de population de solutions.

## 3.7 Classification des méta-heuristiques

Les méta-heuristiques se divisent en deux classes, classification à solution unique dont laquelle on trouve la méthode de la descente, Recuit simulé, Recherche Tabou et classification à population de solution qui comporte l'intelligence en essaims et l'algorithme évolutionnaire.

### 3.7.1 Méta-heuristiques à solution unique

Aussi appelées méthodes de trajectoire, sont des méthodes itératives qui consistent en une solution initiale et s'en éloignent progressivement formant une trajectoire dans l'espace de recherche [56].

Cette classe comporte la méthode de descente, la méthode du recuit simulé et la recherche Tabou.

#### 3.7.1.1 La méthode de descente :

Cette méthode est issue de la théorie de l'évolution de Darwin, qui consiste à manipuler plusieurs solutions en même temps, leur combinaison forme une nouvelle solution les meilleurs seront prises pour la création de nouvelles solutions ayant pour effet de favoriser les bonnes caractéristiques et par la suite trouver l'optimum global [57]. L'algorithme de descente est décrit comme suit : 2 Dont : l'ensemble  $S$

---

**Algorithm 1** Pseudo-code de la méthode de descente

---

```
1: begin
2: Choisir une solution  $s \in S$ 
3: Déterminer une solution  $s'$  qui minimise  $f$  dans  $N(s)$ ;
4: si  $f(s') < f(s)$  alors poser  $s \leftarrow s'$  et retourner à 2., sinon STOP.
5: end
```

---

est l'ensemble des points pouvant être visités durant la recherche, le voisinage  $N$  donne les règles de déplacement dans cet espace, et la fonction  $f$  induit une topologie sur  $S$ . Pour éviter que cette méthode s'arrête au premier optimum trouvé nous pouvons se déplacer d'une solution  $s$  vers une solution voisine  $s' \in N(S)$  telle que  $f(s') \geq f(s)$ . [58]

#### 3.7.1.2 Recuit simulé :

En anglais Simulated annealing, a été mise en place en 1983 par la société IBM avec les chercheurs S.Kirkpatrick, C.D Gelatt et M.P.Vecchi cette méthode est inspirée du recuit physique en métallurgie reposant sur les lois de la thermodynamique qui consiste à réorganiser la structure cristallographique des métaux en alternant des cycles de refroidissement lent et de réchauffement (recuit). Le recuit simulé explore l'espace de recherche en acceptant des dégradations de solution pour sortir des optima locaux, au fur et à mesure le recuit diminuera l'acceptation des dégradations pour une convergence vers un optimum global. 2

---

**Algorithm 2** Pseudo-code de la méthode recuit simulé

---

- 1: **begin**
- 2: Choisir une solution  $s \in S$  ainsi qu'une température initiale  $T$  ;
- 3: Tant que aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire
- 4: Choisir aléatoirement une solution  $s' \in N(s)$ .
- 5: Générer un nombre réel aléatoire  $r \in [0, 1]$
- 6: Si  $r < p(T, s, s')$  alors poser  $s \leftarrow s'$  ;
- 7: Mettre à jour  $T$  ;
- 8: Fin du tant que
- 9: **end**

---

### 3.7.1.3 Recherche Tabou :

Tabu Search a été proposée en 1986 par Glover, son principe est de choisir la meilleure solution  $s' \in N(s)$  à chaque itération même si  $f(s') > f(s)$ . La recherche tabou a une notion de mémoire, le choix du meilleur voisin de la solution oblige l'algorithme à trouver les optima locaux vu que l'exploration de l'espace de recherche est effectué par la limitation du voisinage de la solution donc ça rend tabou certains mouvement par conséquent, l'algorithme doit consulter l'optimum global. 3

---

**Algorithm 3** Pseudo-code de la méthode recherche tabou

---

- 1: **begin**
- 2: Choisir une solution  $s \in S$ , poser  $T \leftarrow \emptyset$  et  $s^* \leftarrow s$  ;
- 3: Tant que aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire ;
- 4: Déterminer une solution  $s'$  qui minimise  $f$  dans  $NT(S)$  ;
- 5: Si  $f(s') < f(s^*)$  alors poser  $s^* \leftarrow s'$  ;
- 6: Poser  $s \leftarrow s'$  et mettre à jour  $T$  ;
- 7: Fin du tant que
- 8: **end**

---

### 3.7.2 Méta-heuristiques à population de solution

Appelées méthodes évolutives, ces méthodes se basent sur des populations de solutions faisant évoluer une population d'individus selon des règles bien définies [53] ; C'est-à-dire elles partent d'une population de solutions initiales générant ainsi une nouvelle population de solution jusqu'à ce qu'un état donné est satisfaisant. L'algorithme de la méthode évolutive est donné par : 4 On distingue dans

---

**Algorithm 4** Pseudo-code de la méta-heuristique à population de solution

---

- 1: **begin**
- 2: Générer une population initiale d'individus ;
- 3: Tant que aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire ;
- 4: Exécuter une procédure de coopération ;
- 5: Exécuter une procédure d'adaptation individuelle ;
- 6: Fin du tant que
- 7: **end**

---

cette catégorie, les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes d'intelligence en essaim.

### 3.7.2.1 Les algorithmes évolutionnaires :

Les algorithmes évolutifs se basent sur la procédure itérative pour résoudre des problèmes complexes. Chaque itération de l'algorithme correspond à une population de plusieurs individus donnant des solutions potentielles au problème. Cette catégorie regroupe l'algorithme génétique, programmation évolutionnaire, stratégie d'évolution et programmation génétique.

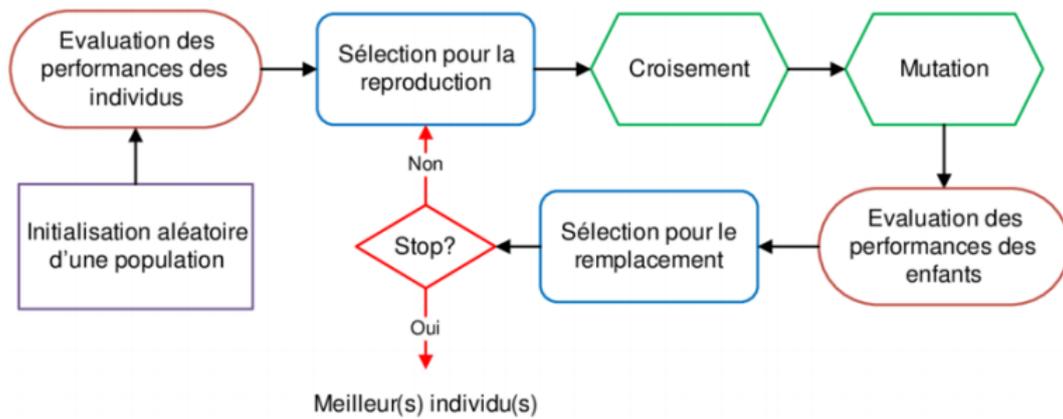


FIGURE 3.4 – Principe d'un algorithme évolutionnaire [48]

**3.7.2.1.1 Algorithme génétique :** L'algorithme génétique a été créé par Holland et Reitman en 1977, cet algorithme est une technique faisant partie des algorithmes évolutionnaire basé sur ces trois étapes ci-dessous [59] :

1. **Étape de sélection :** Nous trouvons dans cette étapes différentes méthode de sélection ; citons : L'algorithme de sélection de roue de roulette, sélection par classement et la sélection par tournoi.
2. **Étape de croisement :** C'est la combinaison des caractéristiques préalablement sélectionnées représentant les parents par la suite une génération d'enfants est faite à partir de cette dernière.

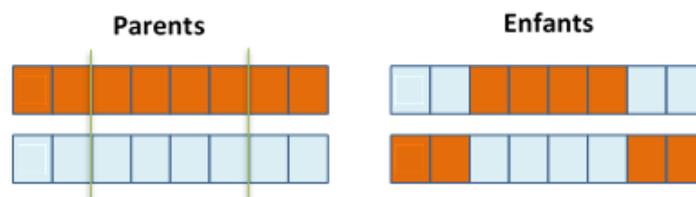


FIGURE 3.5 – La phase de croisement [59]

3. **Étape de mutation :** Se base sur la modification aléatoire d'une partie de l'individu pour atteindre une diversité dans la population. Nous donnons ci-dessous l'un des algorithmes possible pour l'algorithme génétique [58] : 5

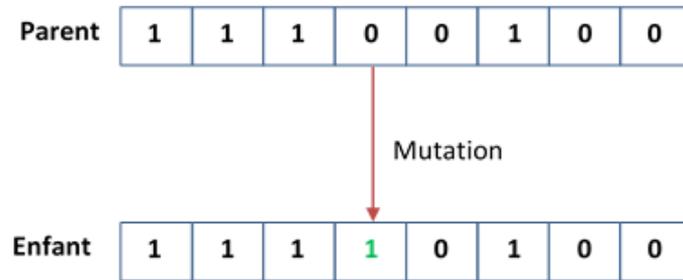


FIGURE 3.6 – La phase de mutation [59]

---

**Algorithm 5** Pseudo-code des algorithmes évolutionnaires

---

- 1: **begin**
  - 2: Générer une population initiale  $P_0$  de  $p \geq 2$  individus et poser  $i \leftarrow 0$ ;
  - 3: Tant que aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire
  - 4: Poser  $i \leftarrow i + 1$  et  $P_i \leftarrow \emptyset$ ;
  - 5: Répéter  $p$  fois les 2 lignes suivantes
  - 6: Créer un enfant  $E$  en croisant 2 individus  $I_1$  et  $I_2$  de  $P_{i-1}$ ;
  - 7: Appliquer un opérateur de mutation à  $E$  et rajouter l'enfant ainsi modifié à  $P_i$ ;
  - 8: Fin du tant que
  - 9: **end**
- 

**3.7.2.1.2 La programmation évolutionnaire :** En anglais EP : Evolutionary Programming a été introduit en 1966 par Fogel ; En premier lieu elle a été conçue pour évaluer les machines à états finis puis a été adopté pour les problèmes d'optimisation. La programmation évolutionnaire contrairement aux autres algorithmes n'utilise que les opérateurs de mutation et de remplacement avec l'absence de l'opérateur de croisement. Pour la résolution des problèmes avec cette programmation une génération aléatoire d'une population avec une taille  $\mu$  et suite à l'opérateur de mutation chaque individu  $i$  génère  $\lambda$  descendants (enfants), la nouvelle génération est formée à partir des parents et des descendants grâce à une opération de sélection naturelle.[60]

**3.7.2.1.3 La programmation génétique :** Au début des années quatre-vingt-dix la programmation génétique a été conçue par John Koza en se basant sur les techniques des algorithmes génétiques pour l'évolution d'une population en arborescence ; la première utilisation d'un algorithme génétique a été faite par Craner en 1985.[59] La programmation génétique utilise les opérations de mutation, croisement et la reproduction ainsi qu'à d'autres opérateurs tels que : la permutation, l'édition et l'encapsulation. 1 La stratégie d'évolution : La stratégie d'évolution SE est une méthode introduite par I.Rechamberg et développé par H.P.Schwefel au cours des années soixante. Les ES génèrent une population descendante (dimension  $\mu$ ) à partir de laquelle des individus sont sélectionnés aléatoirement pour générer une population descendante (dimension  $l - \mu$ ), à partir d'une population de parents (dimension  $\mu$ ) en sélectionnant au hasard des individus.[62] Les populations utilisées par les stratégies d'évolution sont représentées par des vecteurs de dimension fixe, qui représentent les caractéristiques d'une solution optimale. Les ES sont souvent nommées sous la forme  $(\mu, \lambda)$ -ES ou  $(\mu + \lambda)$ -ES qui désigne deux différentes stratégies, dont  $(\mu, \lambda)$ -ES désigne la dimension de l'ensemble de parents produisant un ensemble de descendants de dimension  $\lambda (>= \mu)$ .  $(\mu, \lambda)$ -ES indique que  $\lambda$  vecteurs sont choisis pour former la nouvelle génération parmi les meilleurs vecteurs  $\lambda$ . Pour la stratégie  $(\mu + \lambda)$ -ES, les  $\lambda$  vecteurs de la nouvelle génération sont sélectionnés parmi les meilleurs entre les  $\mu$  parents et leurs  $\lambda$  descendants.[60]

### 3.7.2.2 Intelligence en essaims

L'intelligence en essaim (Swarm intelligence :SI) créée en 1999 par Bonabeau et al est une modélisation mathématique et informatique des phénomènes biologiques rencontrés en éthologie[62]. Les algorithmes utilisant le concept de l'intelligence en essaims se basent sur le comportement des animaux comme : Les oiseaux, chauve-souris et la raie (poissons); Ci-dessous nous allons présenter certains algorithmes d'essaims utilisés comme Firefly et Manta Rays Foraging Optimization (MRFO).

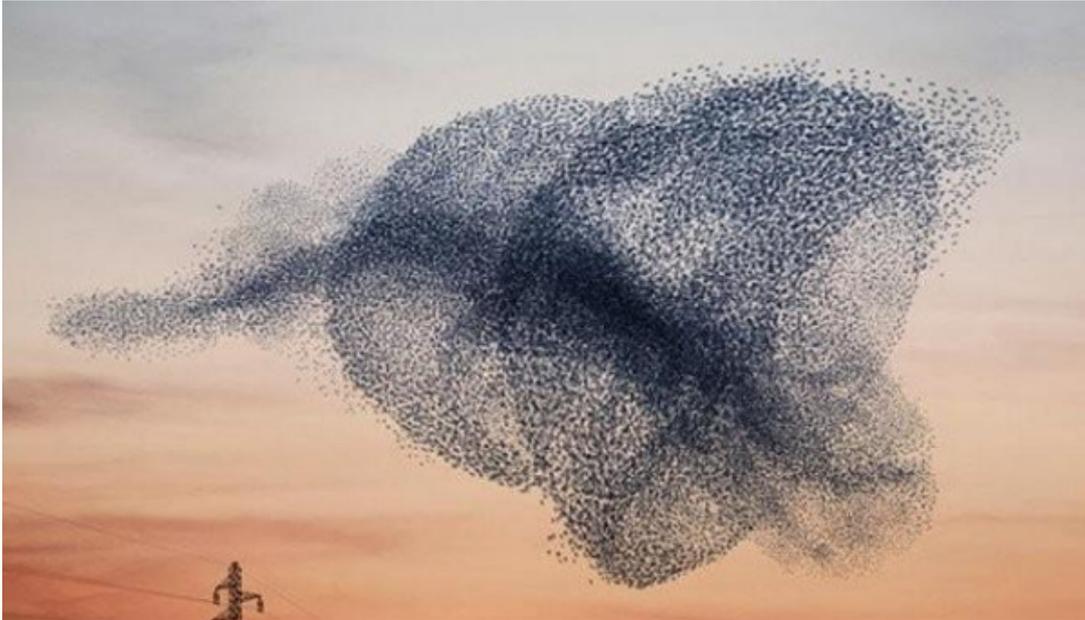


FIGURE 3.7 – Intelligence en essaims[63]

**3.7.2.2.1 L'algorithme des essais particules** Proposé en 1995 par Kennedy et Eberhart l'algorithme des essais particule se base sur la recherche de l'espace d'une fonction objectif en ajustant les trajectoires des particules (individus). Le mouvement des particules se divise en deux composants essentiels, composant stochastique et un autre déterministe. Chaque particule est attirée vers la meilleure solution global  $g \approx \min f(x_i)$  pour  $(i = 1, \dots, N)$  et sa meilleure position  $x_i$  ce processus est fait d'une manière aléatoire et change en fonction de la meilleure position rencontrée. Pour toute particule  $n$  à chaque instant  $t$  des itérations il existe un meilleur emplacement courant. L'objectif de cette méthode est de trouver la meilleure solution à un nombre d'itération bien déterminé[59].

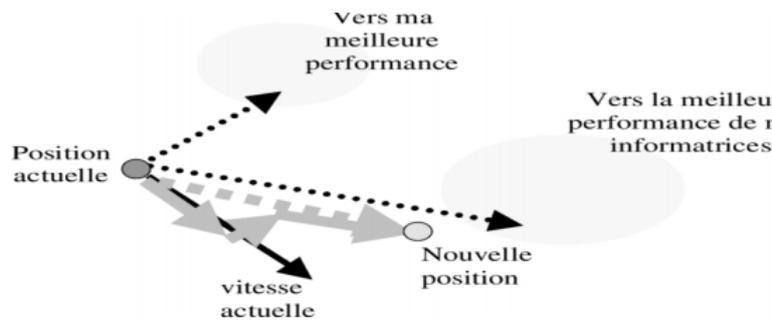


FIGURE 3.8 – Illustration des essais particules[64]

**3.7.2.2.2 L'algorithme des essais de lucioles (Firefly Algorithm) :** L'algorithme des lucioles en anglais Firefly est une méta-heuristique récente développé en 2009 par Xin-She Yang inspiré de la nature, cet algorithme est utilisé pour la résolution des problèmes d'optimisation. Les lucioles ont un mécanisme à base de condensateur, ils libèrent l'énergie sous forme de lumière[65]. Son algorithme est inspiré par l'atténuation de la lumière ; Ci-dessous nous présentons le pseudo-code de l'algorithme Firefly. 6

---

**Algorithm 6** Pseudo-code des essais de lucioles

---

- 1: **begin**
  - 2: Générer une population initiale de lucioles  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ )
  - 3: Déterminer les intensités de lumière  $I_i$  at  $x_i$  via  $f(x_i)$
  - 4: Tant que ( $t < Nbr_{iter}$ ) faire
  - 5: Pour  $i = 1$  à  $n$
  - 6: Pour  $j = 1$  à  $n$
  - 7: Si ( $I_j > I_i$ ) alors
  - 8: Attractivité  $\beta_{i,j}$  varie selon la distance  $r_{i,j}$
  - 9: Déplacer luciole  $I$  vers  $j$  avec l'attractivité  $\beta_{i,j}$
  - 10: Sinon déplacer  $I$  aléatoirement
  - 11: fin si
  - 12: Évaluer la nouvelle solution
  - 13: Mettre à jour l'intensité  $I_i$
  - 14: Vérifier si luciole  $i$  est la meilleure.
  - 15: Fin  $j$  , Fin  $i$
  - 16: Trouver la meilleure luciole en fonction d'objective
  - 17:  $t++$
  - 18: Fait ;Fin procédure
  - 19: **end**
-

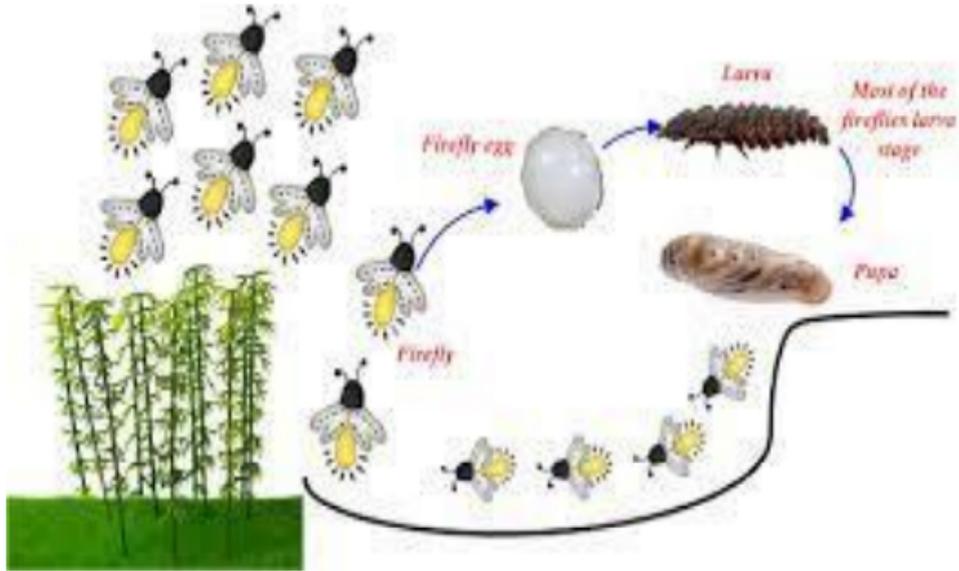


FIGURE 3.9 – Illustration de l’algorithme Firefly [66]

### 3.8 L’algorithme des essais des Manta Rays Foraging Optimization Algorithm (MRFO)

Manta Ray Foraging Optimization Algorithm (MRFO) est une nouvelle métaheuristique inspirée de l’algorithme biologique. L’algorithme MRFO a été utilisé pour la première fois pour optimiser un problème multi-objectifs. L’algorithme MRFO imite l’attitude d’alimentation des raies manta qui incluent la recherche de nourriture en chaîne, en cyclone et en saut périlleux l’utilisation de la nouvelle technique MRFO a un avenir prometteur dans l’optimisation de différents problèmes de système dans différents domaines[62].



FIGURE 3.10 – Stratégie d’alimentation de la chaîne de raies manta[62]

La première étape de l’algorithme MRFO est le positionnement aléatoire des individus en utilisant l’équation suivante[62] :

$$X_{i,j}(:) = Lb_{i,j} + r(:) \cdot (Ub_{i,j} - Lb_{i,j}) \forall i \in N_{pop} \& \& j \in N_{var} \quad (3.5)$$

Dont :  $X_{i,j}(:)$  La position des Manta Rays,  $Lb_{i,j}$  Limite inférieure,  $Ub_{i,j}$  Limite supérieure,  $N_{pop}$  Nombre de population, et  $N_{var}$  Nombre de variables.

### 3.8.1 Les stratégies de recherche de nourriture simulées par MFRO

Les techniques de recherche de nourriture appliquées par les raies manta peuvent être classés en huit types nous citons : le type droit, surface, chaîne, ferroutage, saut périlleux, cyclone, sur le côté et en fond ; mais l'algorithme MRFO ne simule que trois stratégies : la recherche de nourriture en chaîne, en cyclone et en saut périlleux[62].

#### 3.8.1.1 La recherche en chaîne

Le plancton est concentré sur plusieurs zones, les raies manta la recherche et après avoir localisé son emplacement elles nagent directement vers la meilleure position formant une chaîne où se trouve la plus forte concentration de plancton ; les raies changent de position au fur et à mesure de la meilleure position et la mettent à jour en suivant l'équation ci-dessous :

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_i^d(t) + r \cdot (x_{\text{Best}}^d(t) - x_i^d(t)) + \alpha \cdot (x_{\text{Best}}^d(t) - x_i^d(t)) & i = 1 \\ x_i^d(t) + r \cdot (x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \alpha \cdot (x_{\text{Best}}^d(t) - x_i^d(t)) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\alpha = 2 \cdot r \cdot \sqrt{|\log(r)|}$$

Dont :  $x_i^d(t+1)$  La position mise à jour

t : Nombre d'itération

d : La dimension

$x_i^d(t)$  : La position actuelle de l'ième individus

r : Vecteur aléatoire compris entre [0-1]

$\alpha$  : Coefficient de pondération

$x_{\text{Best}}^d(t)$  : La meilleure position

#### 3.8.1.2 La recherche en cyclone

Le mouvement de chaque raie manta est proportionnel à la position de la nourriture et la position de celui devant. Les raies manta s'approchent vers le plancton par un mouvement en spirale ; cette forme de spirale peut être simulée par la formule mathématique suivante :

$$\begin{cases} X_i(t+1) = X_{\text{best}} + r \times (X_{i-1}(t) - X_i(t)) + e^{b\omega} \times \cos(2\pi\omega) \times (X_{\text{best}} - X_i(t)) \\ Y_i(t+1) = Y_{\text{best}} + r \times (Y_{i-1}(t) - Y_i(t)) + e^{b\omega} \times \sin(2\pi\omega) \times (Y_{\text{best}} - Y_i(t)) \end{cases} \quad (3.7)$$

Dont  $\omega$  est un nombre aléatoire étendu entre [0 - 1]. Cette motion est étendue à une formule d'espace n-D qui simule la recherche de la nourriture dans un cyclone, après cette modification, le butinage du cyclone peut s'exprimer comme suit[62] :

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{\text{best}}^d + r \times (x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta \times (x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)) & i = 1 \\ x_{\text{best}}^d + r \times (x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta \times (x_{\text{best}}^d(t) - x_i^d(t)) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\beta = 2e^{r_1 \frac{T_{\text{max}} - t + 1}{T}} \times \sin(2\pi r_1) \quad (3.9)$$

Dont  $\beta$  : Le coefficient de pondération

$T_{\max}$  : Le nombre maximum d'itération

$r_1$  : Nombre aléatoire dans l'intervalle [0-1]

Grâce à la mise à jour des positions faite par les individus en fonction de la position aléatoire des aliments, le butinage du cyclone améliore à la fois l'exploration et l'exploitation.

Une nouvelle position aléatoire est introduite comme nouvelle référence par conséquent, la meilleure position globale est améliorée. Cette partie du processus d'optimisation peut être exprimé par l'équation suivante :

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{\text{rand}}^d + r \times (x_{\text{rand}}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta \times (x_{\text{rand}}^d(t) - x_i^d(t)) & i = 1 \\ x_{\text{rand}}^d + r \times (x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta \times (x_{\text{rand}}^d(t) - x_i^d(t)) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.10)$$

$$x_{\text{rand}}^d = Lb^d + r \times (Ub^d - Lb^d) \quad (3.11)$$

Dont  $x_{\text{rand}}^d$  : Représente la position aléatoire

### 3.8.1.3 La recherche en saut périlleux

La recherche en saut périlleux représente une stratégie d'alimentation individuelle où chaque individu se déplace vers la position du plancton puis fait des culbutes vers la nouvelle position en mettant à jour sa position.

Cette stratégie peut se présenter comme suit [62] :

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + S \times (r_2 \times x_{\text{best}}^d - r_3 \times x_i^d(t)), i = 1, \dots, N \quad (3.12)$$

Dont  $S$  : Facteur de saut périlleux et décide de la plage de saut.

$r_2$  et  $r_3$  : Nombres aléatoire compris dans l'intervalle [0-1]. Chaque individu est libre de se déplacer entre sa position actuelle et la meilleure position globale trouvée jusqu'à présent dans l'espace de recherche, donc l'augmentation du nombre d'itérations diminuera la portée du saut périlleux.

### 3.8.2 Approche générale de l’algorithme MRFO

Le pseudo-code de l’algorithme MRFO est expliqué comme suit[62] :

---

**Algorithm 7** Pseudo-code de la méta-heuristique MRFO

---

- 1: **begin**
  - 2: Formulation du problème d’optimisation et détermination de la limite des bornes.
  - 3: Insertion des paramètres de contrôle, nombre d’itérations (Tmax), nombre de populations (Npop), et le facteur de saut périlleux (S).
  - 4: Positionner initialement les individus au hasard et calcule du fitness de chacun pour déterminer la meilleure solution à ce jour
  - 5: Démarrage de la boucle principale pour  $i = 1 : Npop$ , Si le critère d’arrêt n’est pas satisfait.
  - 6: Si  $Rand > 0,5$ , alors appliquez la recherche de nourriture par cyclone.
    - Si  $t/Tmax < Rand$ , alors mettez à jour l’emplacement à l’aide des équations (3.10)
    - Sinon, mettez à jour l’emplacement à l’aide de l’équation (3.8)
    - fin si.
  - 7: Sinon (si  $Rand < 0,5$ ) appliquer le foraging en chaîne.
    - Mettre à jour l’emplacement à l’aide de l’équation (3.6)
    - Fin si
  - 8: Évaluer la valeur fitness de chaque individu et mettre à jour la position en fonction de la meilleure position.
  - 9: Ensuite, mettez à jour l’emplacement à l’aide de l’équation de recherche de nourriture en saut périlleux (3.12)
  - 10: **end**
-

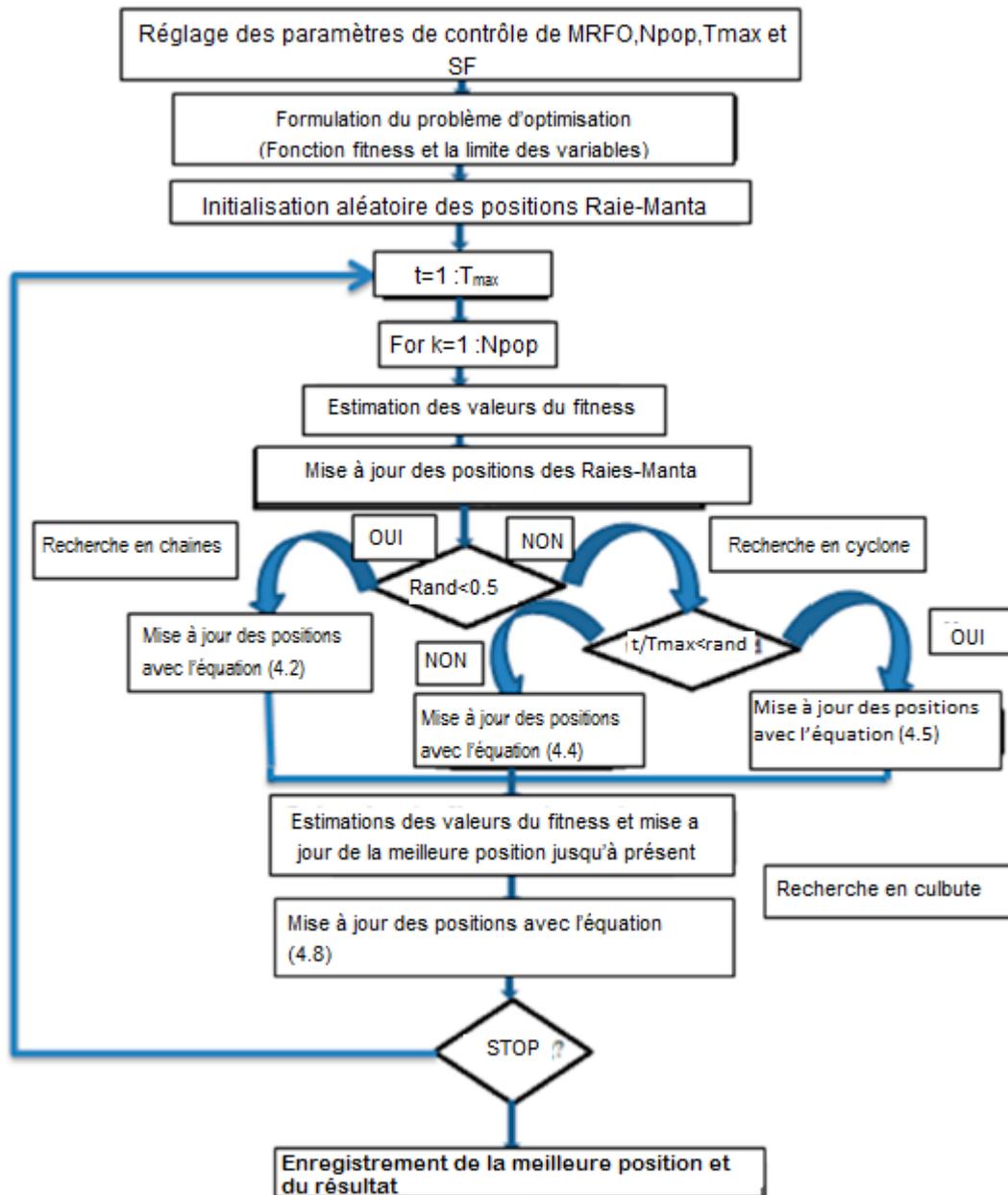


FIGURE 3.11 – Pseudo-code de l’algorithme MRFO[62]

### 3.9 Conclusion

A travers ce chapitre nous avons fait une étude globale sur l'optimisation dans laquelle on a défini en premier lieu, l'optimisation de manière littéraire et mathématique avec ses différents domaines d'application ainsi que ses notions ; Deuxièmement, nous avons classé les problèmes d'optimisation selon des critères bien définies ; Troisièmement, nous avons présenté les différents méthodes de résolution des problèmes d'optimisation ainsi qu'une classification détaillée des métaheuristiques.

## Chapitre 4

# Implémentation de MRFO pour la résolution du problème d’emplacement des LEDs

### 4.1 Introduction

Nous considérons le problème de couverture comme un enjeu crucial pour chaque réseau existant et la communication par lumière visible n’échappe pas à cette règle. Malgré les propriétés de la VLC l’emplacement des LEDs dans un milieu intérieur impose une étude importante pour assurer la bonne couverture des utilisateurs ; cette étude d’emplacement des LEDs est connue pour être un problème NP-difficile. Par conséquent, nous avons eu recours aux méta-heuristiques pour maximiser la couverture grâce aux algorithmes d’optimisation qui fournissent de bons résultats dans un temps d’exécution raisonnable.

### 4.2 Description du système d’étude

Dans ce travail, nous considérons un système VLC intérieur typique dans une bibliothèque universitaire de dimension  $20 \times 20 \times 3$  comme illustré dans la figure 4.1. Cette pièce est équipée de  $M$  diodes électroluminescentes (LED) placées au plafond pour servir de points d’accès optiques (émetteurs) et de  $N$  utilisateurs récepteurs se déplaçant de façon aléatoire dans la pièce.

L’objectif de cette étude est de trouver la disposition optimale des LEDs dans une dimension 3D en variant leur nombre, tout en prenant en considération la puissance transmise  $P_t$  et l’angle de rayonnement ( $\psi$ ) de la LED, pour assurer une couverture maximale. Notre stratégie d’étude se fait en deux étapes :

- **Étape 1** : Nous allons faire varier le nombre des LEDs dans un intervalle allant de 4 à 24 LEDs avec un nombre fixé à 80 clients.
- **Étape 2** : Nous allons faire varier le nombre de clients dans un intervalle de 10 à 100 clients avec un nombre de LED fixé à 20 LEDs.



FIGURE 4.1 – Système VLC intérieur typique

### 4.3 Formulation du problème de déploiement des LEDs

Dans ce mémoire notre objectif principal est de trouver la disposition optimale des LEDs dans un milieu intérieur de dimension  $L \times l \times h$  (fixée au préalable) en fonction de la position des clients en projetant notre problème aux méthodes d'optimisation méta-heuristique (MRFO). Le problème de cette étude consiste en deux objectifs principaux :

- La maximisation de la couverture des clients qui peut être représentée par l'équation ci-dessous

$$\Sigma(G) = \sum_{i=1}^n \left( \max_j \in \{1, \dots, m\} \sigma_{ij} \right) \quad (4.1)$$

où  $\sigma_{ij}$  dénote la variable de couverture représentée comme suit :

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le client } C_i \text{ est couvert par la LED } L_j \\ 0 & \text{Autrement.} \end{cases} \quad (4.2)$$

- La maximisation de débit des clients. Ainsi, définissons SNR le rapport signal/bruit qui est donné par

$$\text{SNR} = \frac{(R \cdot P_r)^2}{\delta_n} \quad (4.3)$$

où :  $R$  est la rétivité,  $\delta_n$  est la densité spectrale du bruit, et  $P_r$  est la puissance reçue qui est donnée par

$$P_r = H(0)P_t \quad (4.4)$$

Dont :  $P_t$  est puissance transmise par la LED.

$H(0)$  : Représente le gain du canal LOS et sa formule est donnée comme suit :

$$\text{Dont : } H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d^2} \cos^m \Phi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi & , 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & 0 \geq \psi_c \end{cases} \quad (4.5)$$

Où :  $\pi$  et  $\psi$  représentent respectivement les angles d'irradiante et d'incidence du rayon optique  
 $d$  : Distance entre la LED et la photodiode (client)

Sur la base de (4.11), le débit peut être estimé comme suit

$$D = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (4.6)$$

Ainsi, notre problème d'optimisation de maximisation peut être formulé comme suit :

$$\Gamma(G) = \max(D) \quad (4.7)$$

#### 4.4 La fonction objectif

Notre méthode cherche à déterminer les meilleurs emplacements pour un nombre donné de LEDs afin de maximiser à la fois la couverture et le débit des utilisateurs. Comme indiqué précédemment, la couverture des utilisateurs correspond au nombre de clients qui sont couverts par au moins une LED, tandis que le débit correspond à la qualité de communication en fonction du nombre de LEDs. Ces métriques sont utilisées pour définir la fonction de fitness  $f$  qui est utilisée pour évaluer la qualité des solutions. La fonction objectif est la suivante :

$$f(x_i) = \lambda \times \frac{\Sigma(G)}{N} + (1 - \lambda) \times \frac{\Gamma(G)}{N \times D_{max}} \quad (4.8)$$

Où  $G$  est le graphe correspondant à la solution  $x_i$  et  $\lambda$  est un paramètre flottant dans la plage  $[0, 1]$  qui contrôle la pertinence des métriques.

Cependant, la première version de MRFO a été conçue pour résoudre un problème de minimisation. Donc, nous devons convertir notre fonction objectif en une fonction de maximisation. Par conséquent, nous avons créé une nouvelle fonction  $g$ , qui se présente comme suit :

$$g = 1 - f(x_i) \quad (4.9)$$

#### 4.5 Résultats des simulations

Dans cette partie, nous étudions les performances de l'algorithme MRFO en résolvant le problème d'emplacement des LEDs dans une bibliothèque universitaire. L'évaluation est effectuée en considérant trois métriques telles que la couverture, débit et fitness. En comparant le résultat obtenu de la couverture, débit et fitness de MRFO avec les algorithmes suivants : WOA, GWO, BAT, PSO. Le MRFO proposé et les quatre algorithmes comparés sont implémentés dans MATLAB. Le nombre de LED varie de 4 à 24 pour couvrir 10 à 100 utilisateurs répartis aléatoirement dans une bibliothèque universitaire rectangulaire de 400 m<sup>2</sup>. Le nombre total d'itérations est de 1000. Les résultats présentés dans cette section sont obtenus après une moyenne de 30 exécutions.

#### 4.5.1 L'impact de la variation des LEDs en fonction de 80 clients

Dans ce scénario, nous étudions l'effet de la variation du nombre de LEDs sur la couverture de l'utilisateur, le débit et le fitness. Ainsi, nous avons varié le nombre des LEDs en six scénarios (4, 8, 12, 16, 20, 24) en fixant le nombre de clients à 80.

TABLE 4.1 – Variation des LEDs en fonction de 80 clients

	<i>LED</i>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>24</b>
<b>Couverture</b>	MRFO	29	<b>47</b>	<b>59</b>	<b>67</b>	72	<b>76</b>
	WOA	26	38	50	56	64	71
	GWO	<b>30</b>	46	56	65	<b>73</b>	74
	BAT	18	34	42	48	57	62
	PSO	24	42	53	61	70	73
<b>Débit (Mb/s)</b>	MRFO	76.81	<b>81.48</b>	<b>83.73</b>	<b>84.36</b>	<b>85.29</b>	<b>85.23</b>
	WOA	<b>83.23</b>	81.39	77.15	79.54	78.81	82.89
	GWO	77.82	78.18	79	80.29	79.96	78.47
	BAT	67.85	64.96	64.61	68.24	66.22	65.97
	PSO	72.78	71.87	74.18	73.74	76.59	74.49
<b>Fitness</b>	MRFO	0.22	0.39	0.51	<b>0.62</b>	<b>0.68</b>	<b>0.74</b>
	WOA	0.21	0.33	0.43	0.51	0.58	0.6
	GWO	<b>0.23</b>	<b>0.41</b>	<b>0.52</b>	0.61	0.68	0.72
	BAT	0.17	0.26	0.35	0.43	0.47	0.54
	PSO	0.17	0.33	0.48	0.54	0.63	0.67

Les résultats obtenus des six scénarios sont présentés dans le tableau 4.1 et les figures 4.2, 4.3, et 4.4.

La figure 4.2 montre l'évolution de la couverture des utilisateurs en faisant varier le nombre de LEDs (de 4 à 24). On observe que le nombre de clients couverts est proportionnel à l'augmentation du nombre de LEDs. Il est également montré l'efficacité de notre approche en termes de couverture par rapport aux autres algorithmes. Plus précisément, MRFO couvre jusqu'à 36.25%, 58.75%, 73.75%, 83.75%, 90% de clients en plus que WOA, GWO, BAT et PSO, respectivement. Nous constatons également qu'avec 24 LED, l'algorithme MRFO couvre 76 clients, ce qui représente 95% des quatre-vingts clients reflétant le meilleur résultat qu'on puisse avoir dans notre étude en tenant compte de la contrainte de coût.

La figure 4.3 montre l'impact de la variation du nombre de LED sur le débit de chaque utilisateur. On constate que le débit de chaque utilisateur augmente avec l'augmentation du nombre de LEDs. Numériquement, cet algorithme offre le meilleur débit par clients de 85.23 Mbit/s avec une amélioration de 2.34 Mbit/s, 6.76 Mbit/s, 19.26 Mbit/s, et 10.74 Mbit/s, en le comparant avec WOA, GWO, BAT et PSO, respectivement.

En terme de fitness, la figure 4.3 montre que la fonction fitness évolue en fonction de l'augmentation du nombre des LEDs. Les résultats obtenus ont confirmé la supériorité de MRFO par rapport à WOA, GWO, BAT et PSO pour la plupart des cas.

Suite à ses résultats illustrés dans le tableau et les histogrammes ci-dessus, nous pouvons souligner et prouver par les figures de la couverture ainsi que celles de la convergence des 8, 12, 20 et 24 LEDs que l'algorithme MRFO donne le meilleur résultat dans la majorité des cas par rapport aux autres algorithmes.

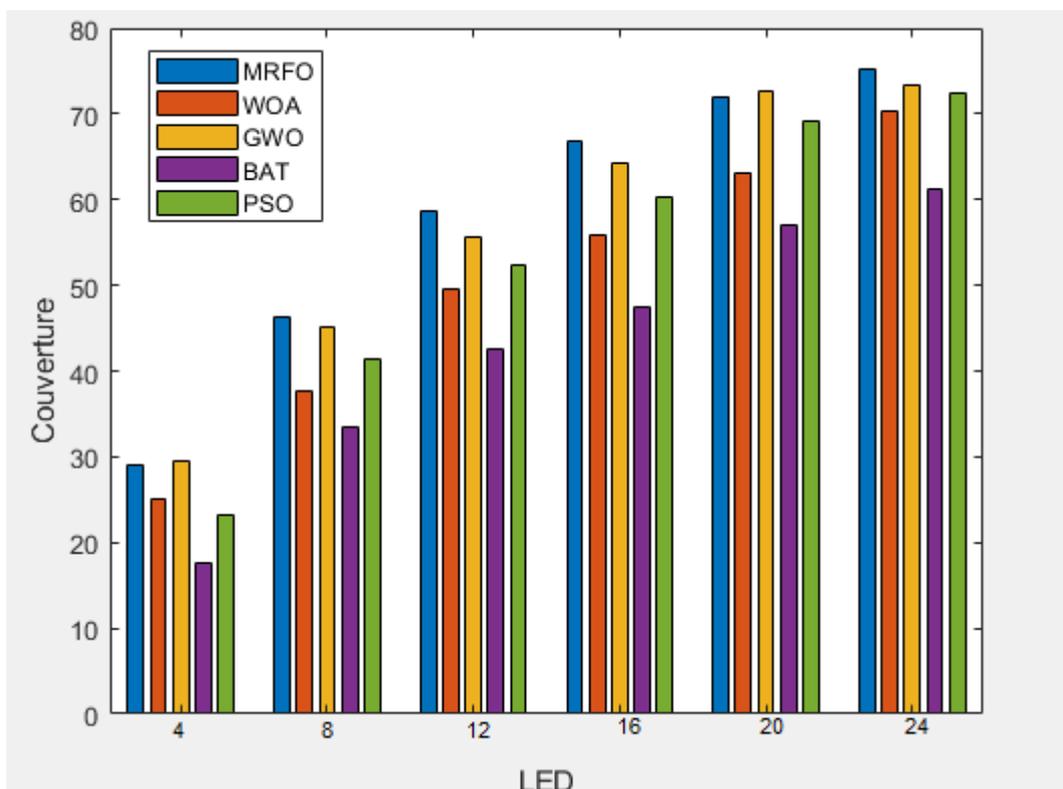


FIGURE 4.2 – Histogramme de la couverture

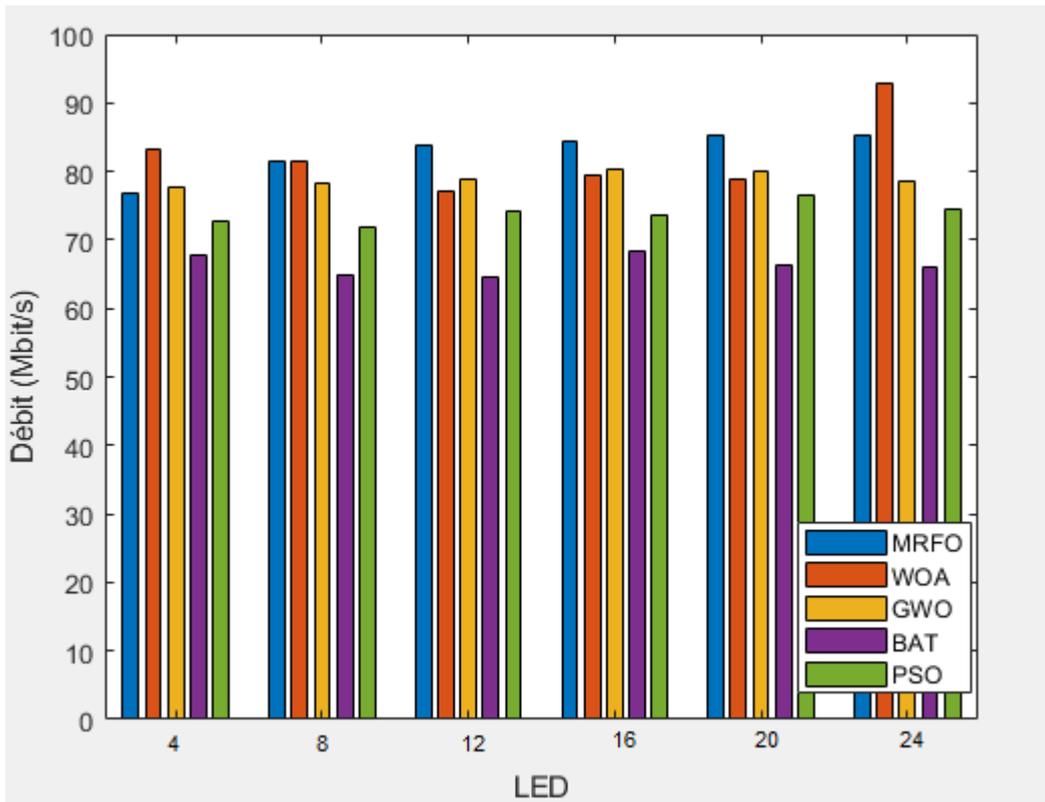


FIGURE 4.3 – Histogramme du débit

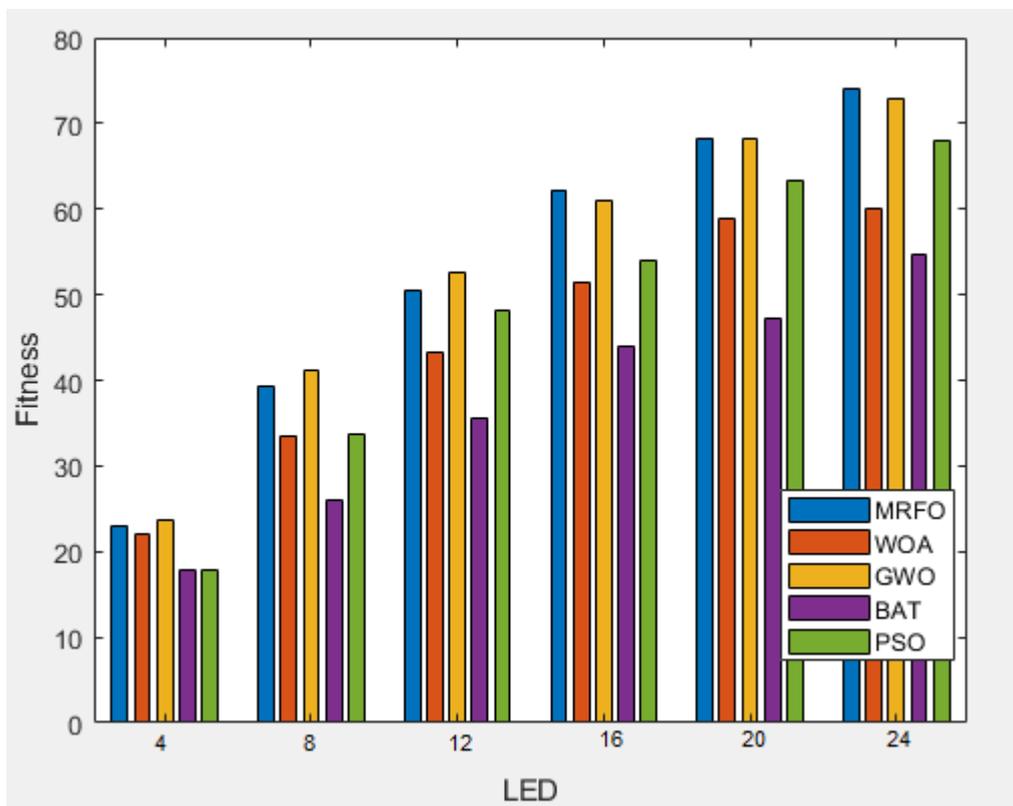


FIGURE 4.4 – Histogramme du fitness

L'illustration de la couverture par les cinq algorithmes est déterminée par les figures ci-dessous dans laquelle nous avons une représentation 3D de la bibliothèque avec un positionnement de 24 LEDs représenté par des points bleus, 80 clients avec des points verts et la zone de couverture est visualisée par des cercles de différentes couleurs. Dans cette représentation, nous remarquons pour les algorithmes WOA, GWO, BAT, PSO que le chevauchement impacte sur la maximisation où nous avons deux LEDs ou plus couvrant la même zone alors qu'il reste des clients non couverts. Par contre pour l'algorithme MRFO, nous constatons un bon positionnement de LEDs couvrant un maximum de clients avec très peu de chevauchement qui pourrait être négligé.

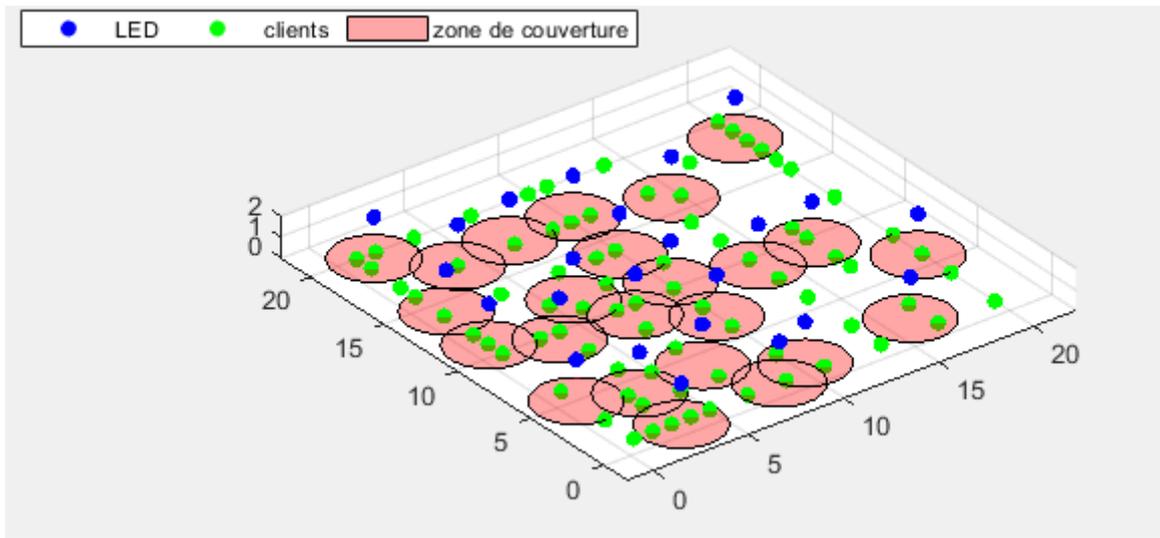


FIGURE 4.5 – Position des LEDs en utilisant MRFO

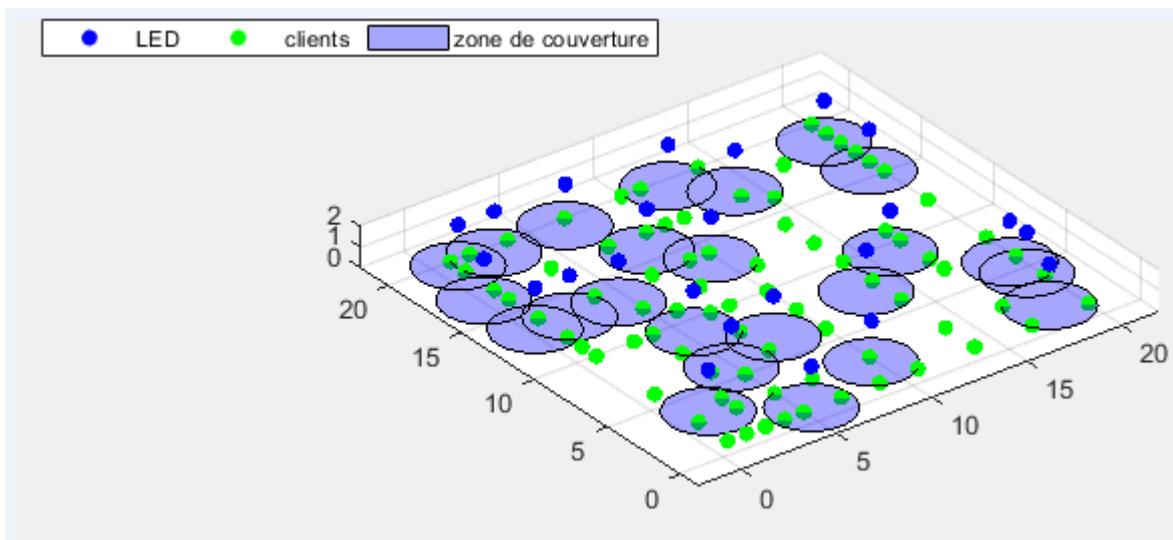


FIGURE 4.6 – Position des LEDs en utilisant WOA

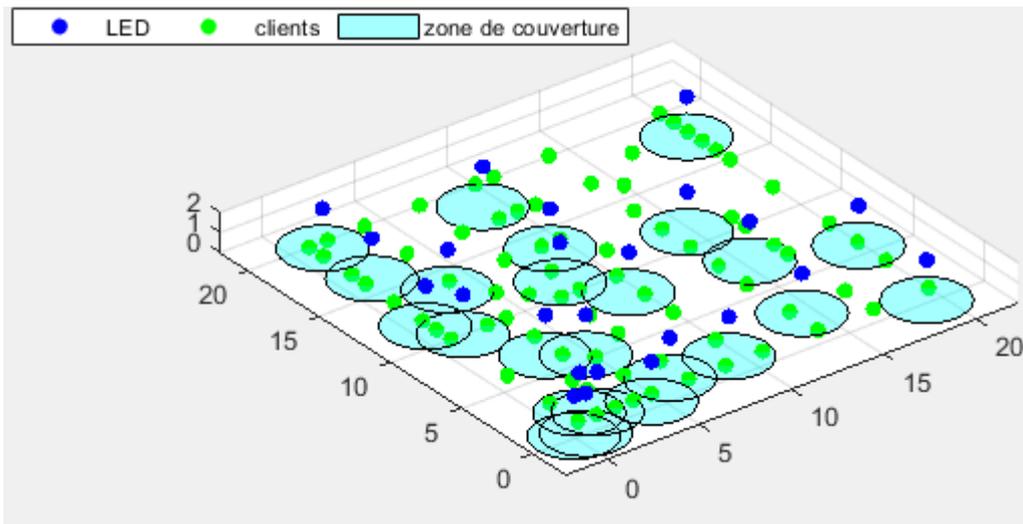


FIGURE 4.7 – Position des LEDs en utilisant GWO

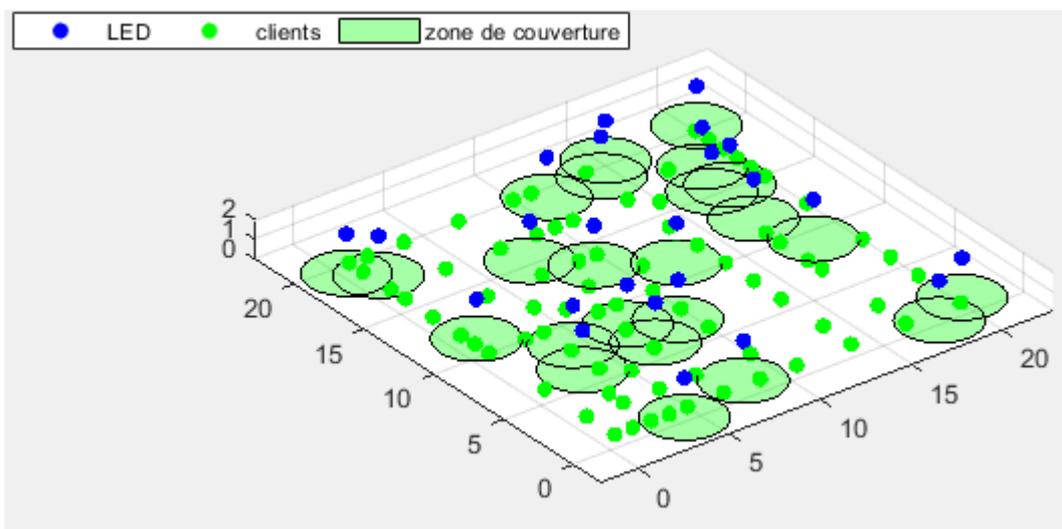


FIGURE 4.8 – Position des LEDs en utilisant BAT

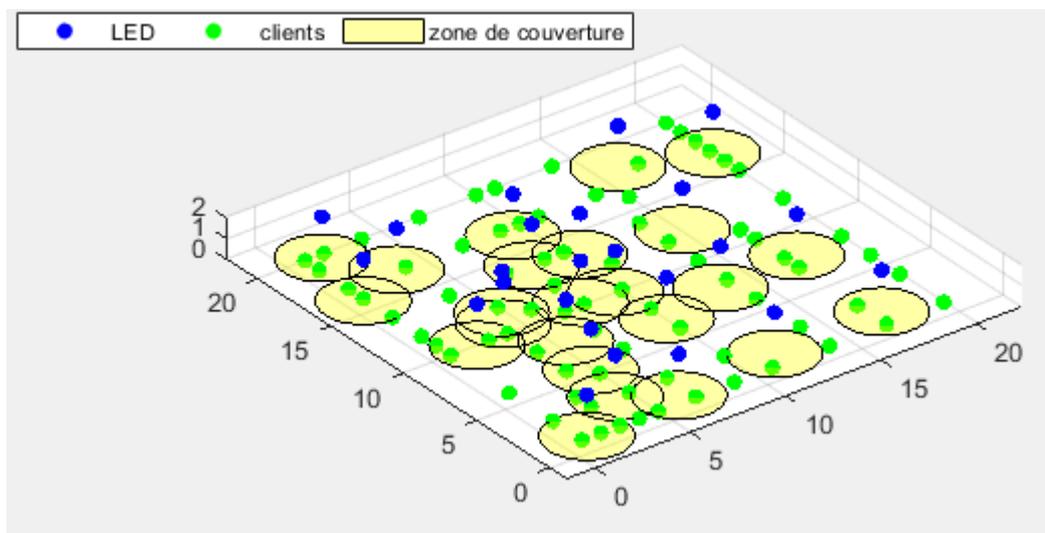


FIGURE 4.9 – Position des LEDs en utilisant PSO

#### 4.5.2 L'impact de la variation des clients en fonction de 20 LEDs

Dans ce scénario, nous étudions l'effet de la variation du nombre des clients sur la couverture des utilisateurs, le débit et le fitness. Ainsi, nous avons varié le nombre des clients en six scénarios (10,20,40,60,80,100) en fixant le nombre de LEDs à 20.

TABLE 4.2 – Variation des clients en fonction de 20 LEDs

	<i>Clients</i>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>Couverture</b>	MRFO	<b>10</b>	<b>20</b>	38	<b>56</b>	72	<b>91</b>
	WOA	10	19	33	48	64	81
	GWO	10	20	32	54	<b>73</b>	90
	BAT	8	17	27	44	60	76
	PSO	10	19	<b>39</b>	51	70	86
<b>Débit (Mb/s)</b>	MRFO	<b>89.39</b>	<b>89.35</b>	<b>89.35</b>	<b>86.51</b>	<b>85.29</b>	<b>84.64</b>
	WOA	89.35	89.33	85.22	78.80	78.81	79.85
	GWO	89.20	88.46	83.68	80.38	79.96	79.03
	BAT	72.81	68.84	67.97	63.65	66.22	64.54
	PSO	88.39	85.57	81.15	74.35	76.59	72.71
<b>Fitness</b>	MRFO	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.80</b>	<b>0.74</b>	<b>0.68</b>	<b>0.69</b>
	WOA	0.91	0.74	0.64	0.60	0.58	0.55
	GWO	1	0.95	0.79	0.7	0.68	0.66
	BAT	0.62	0.58	0.52	0.53	0.47	0.46
	PSO	0.94	0.89	0.73	0.67	0.63	0.62

Les résultats obtenus des six scénarios sont présentés dans le tableau 4.2 et les figures 4.10,4.11,4.12. La figure 4.10 montre l'évolution de la couverture des utilisateurs en faisant varier le nombre des clients (de 10 à 100), contrairement à la variation des LEDs, on observe que le nombre de clients couverts est proportionnel à la diminution du nombre des clients. Il est également montré l'efficacité de notre approche en terme de couverture par rapport aux autres algorithmes ; plus précisément MRFO couvre jusqu'à 100%, 100%, 95%, 93.33%, 90%) de clients en plus que WOA, GWO, BAT et PSO respectivement. Nous constatons également qu'avec 20 LEDs et 100 clients, l'algorithme MRFO couvre 91% des 100 clients reflétant le meilleur résultat qu'on puisse avoir dans ce scénario. Bien que la couverture diminue au fur et à mesure de l'augmentation du nombre des clients MRFO reste le meilleur en le comparant aux autres algorithmes.

La figure 4.11 montre l'impact de la variation du nombre des clients sur le débit de chaque client. On constate que le débit de chaque utilisateur diminue avec l'augmentation du nombre des clients. Numériquement, l'algorithme MRFO offre le meilleur débit par clients 84.64Mbit/s dans le scénario des 100 clients avec une amélioration de 4.79 Mbit/s, 5.61 Mbit/s, 20.1 Mbit/s, 11.93 Mbit/s en le comparant avec WOA, GWO, BAT et PSO, respectivement.

En terme de fitness, la figure 4.12 montre que la fonction fitness diminue en fonction de l'augmentation du nombre des clients. Les résultats obtenus ont confirmé une fois de plus la supériorité de MRFO par rapport à WOA, GWO, BAT et PSO pour la plupart des cas.

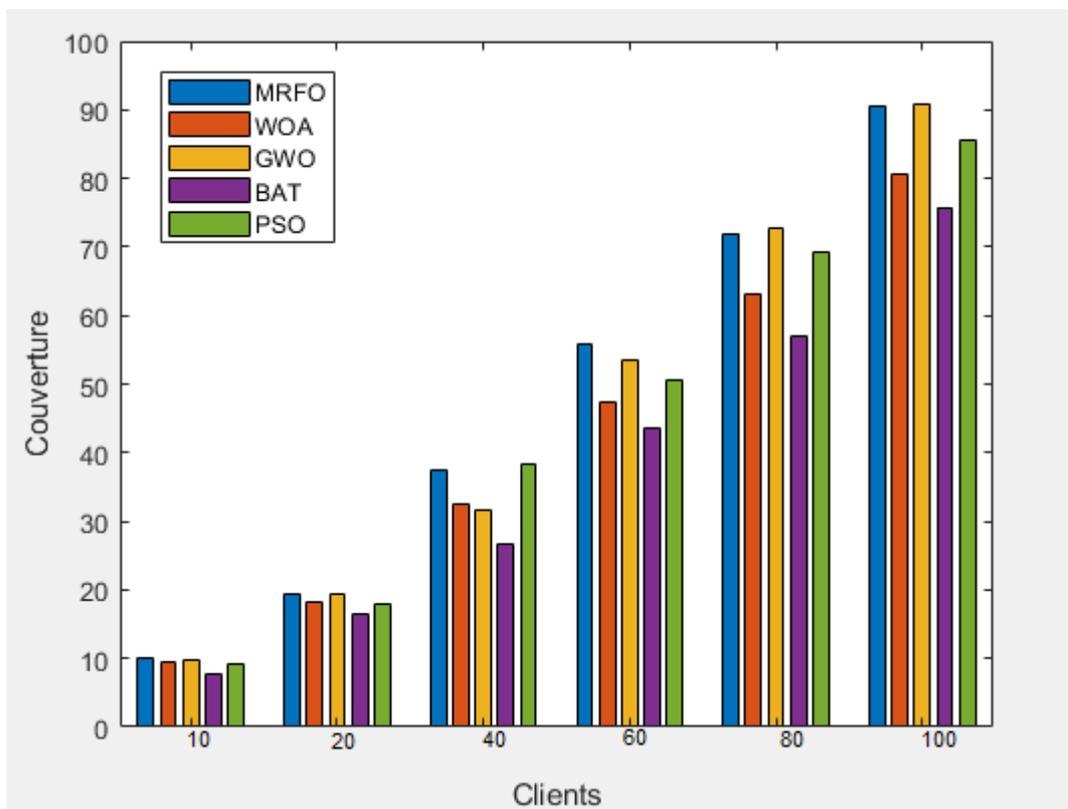


FIGURE 4.10 – Histogramme de la couverture

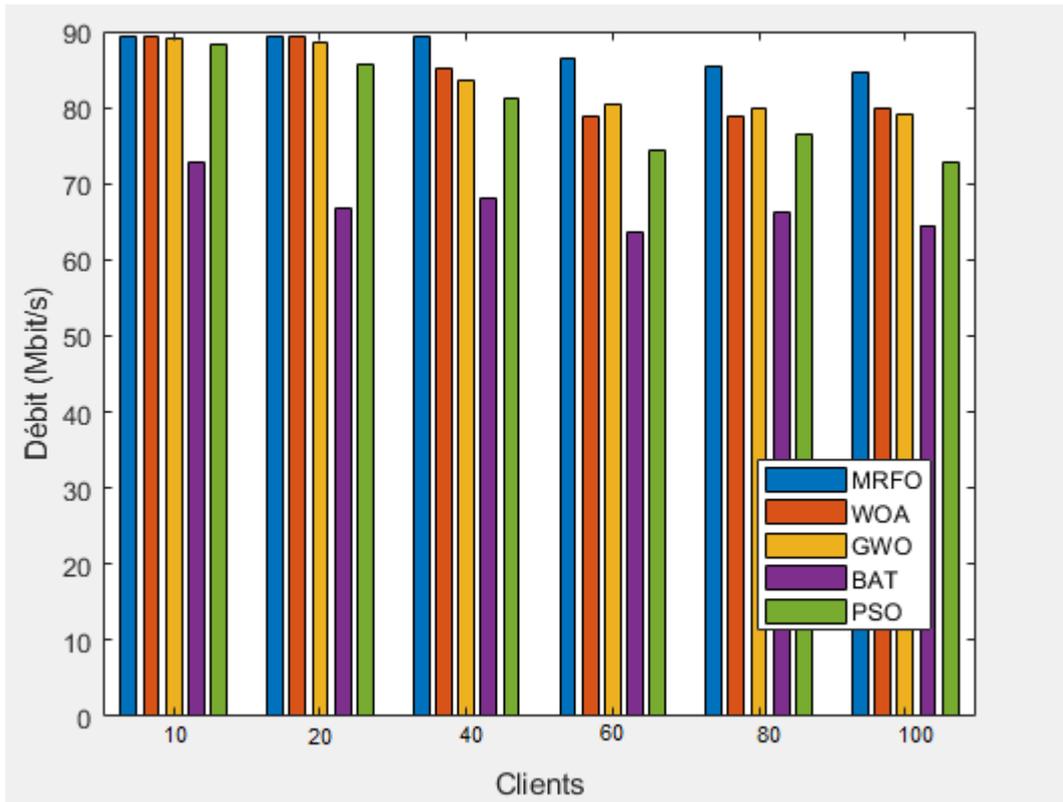


FIGURE 4.11 – Histogramme du débit

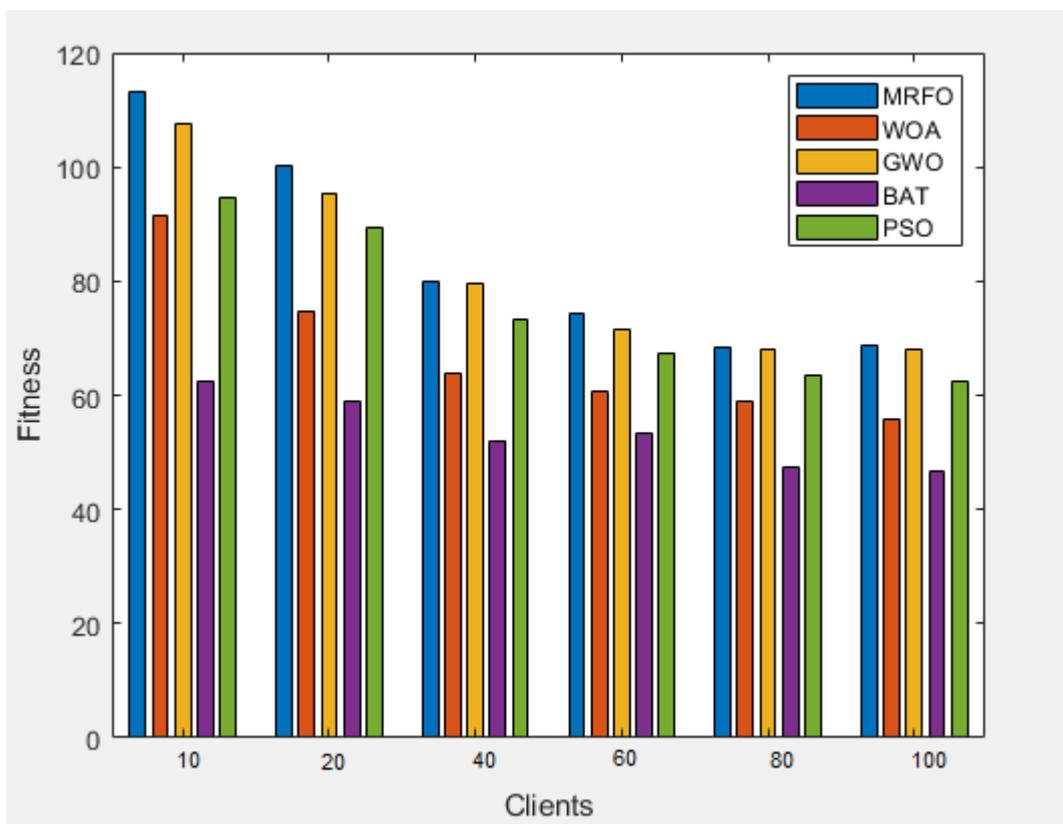


FIGURE 4.12 – Histogramme du fitness

### 4.5.3 L'étude de la convergence

L'étude de la convergence des algorithmes MRFO, WOA, GWO, BAT et PSO est indiquée dans les figures [4.13-4.18] et le tableau 4.3. Le tableau 4.3 montre l'analyse de convergence des algorithmes MRFO, WOA, GWO, BAT et PSO. Le processus d'analyse de convergence est effectué en utilisant six scénarios de tailles différentes. Les courbes sont représentées par des itérations en fonction des valeurs de la fonction objectif (fitness) dans les scénarios 8, 12, 20, 24 LEDs avec 20 clients fixes et le cas de 40 et 60 clients en fonction de 20 LEDs, nous remarquons que l'algorithme BAT converge plus rapidement où il s'arrête à une faible itération en le comparant aux autres algorithmes MRFO, WOA, GWO et PSO, malgré ça BAT produit des résultats peu intéressants. Par contre l'algorithme qui donne les meilleurs résultats est MRFO mieux que WOA, GWO, BAT et PSO puisque c'est un algorithme biologique qui a été créé pour but de donner la meilleure taille et le meilleur emplacement vu qu'il imite l'attitude d'alimentation des raies Manta qui inclut la recherche de nourriture en chaîne, en cyclone et en saut périlleux faisant preuve d'un avenir prometteur dans l'optimisation de différents problèmes.

TABLE 4.3 – Analyse de convergence entre les algorithmes MRFO, WOA, GWO, BAT, et PSO.

Scenarios	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5		Scenario 6	
	Fitness	Iteration	Fitness	Iteration	Fitness	Iteration	Fitness	Iteration	Fitness	Iteration	Fitness	Iteration
MRFO	0.39	784	0.5	995	<b>0.68</b>	831	<b>0.74</b>	982	<b>0.8</b>	1000	<b>0.74</b>	895
WOA	0.33	260	0.43	835	0.58	569	0.6	314	0.64	604	0.6	638
GWO	<b>0.41</b>	994	<b>0.52</b>	1000	0.68	999	0.72	1000	0.79	998	0.7	989
BAT	0.26	10	0.35	932	0.47	4	0.54	18	0.52	24	0.53	7
PSO	0.33	122	0.48	182	0.63	356	0.67	175	0.73	541	0.67	175

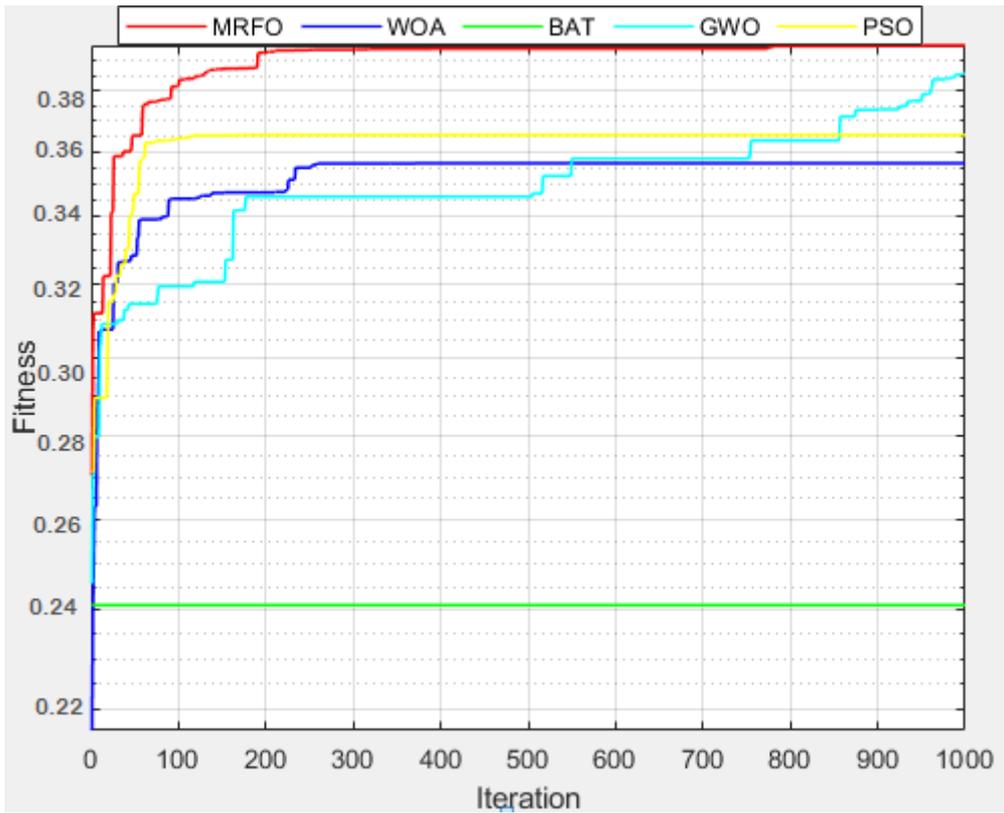


FIGURE 4.13 – Convergence avec 8 LEDs

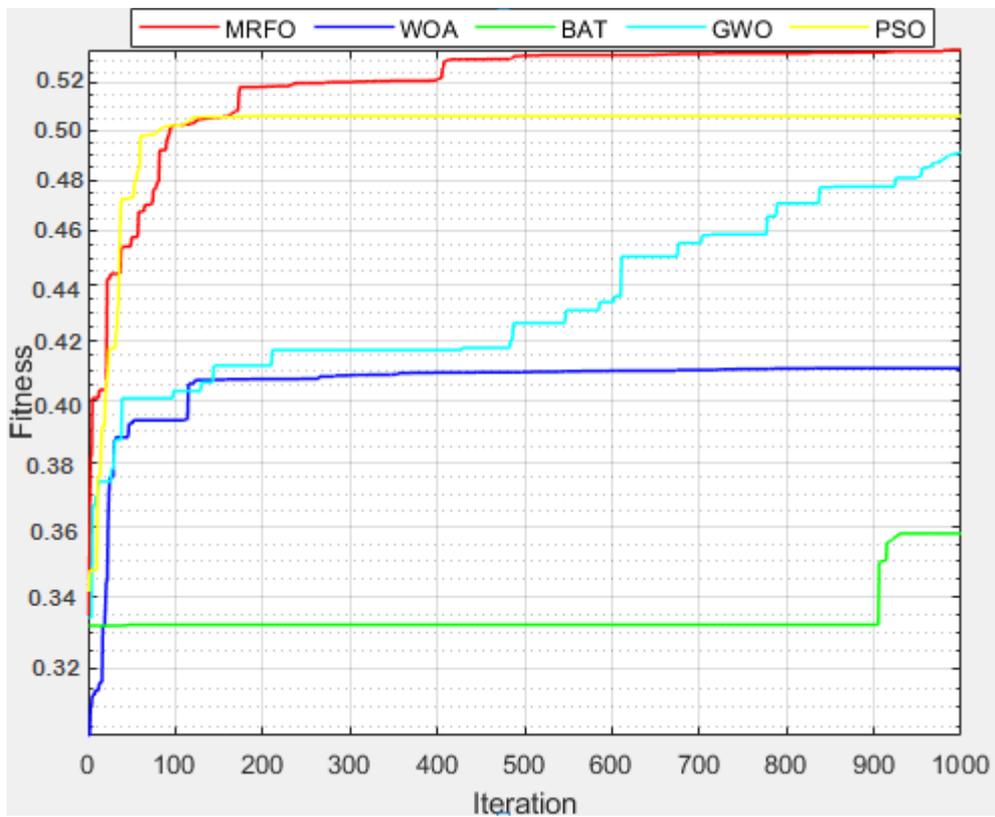


FIGURE 4.14 – Convergence avec 12 LEDs

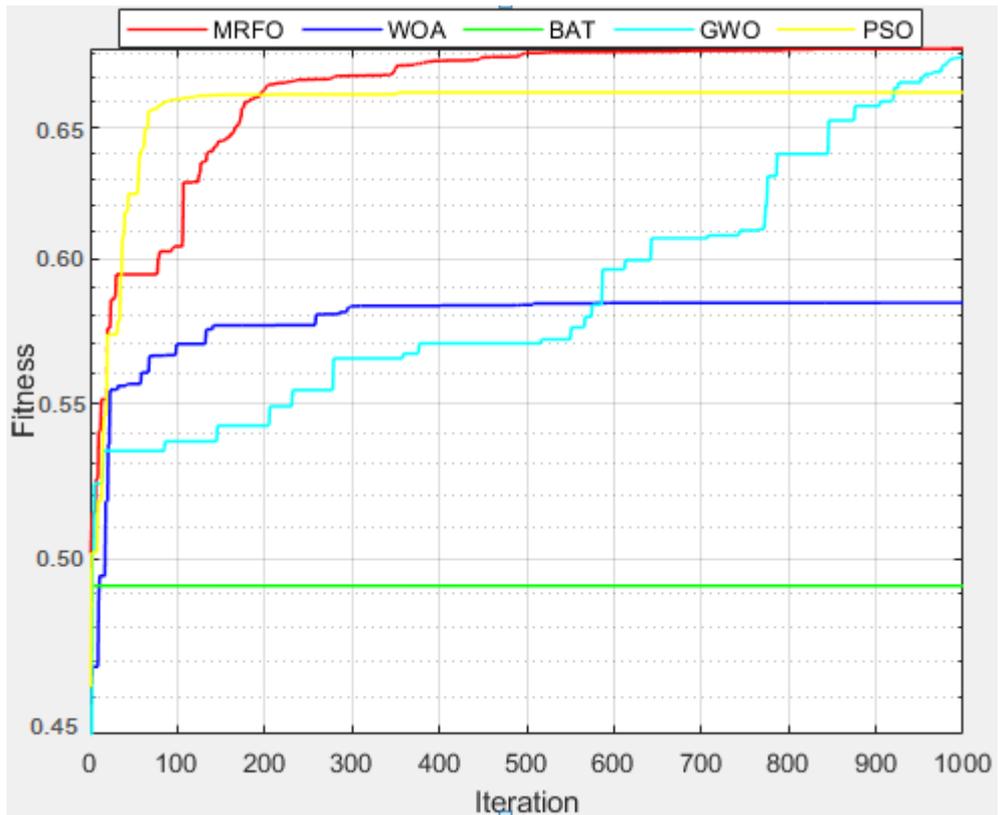


FIGURE 4.15 – Convergence avec 20 LEDs

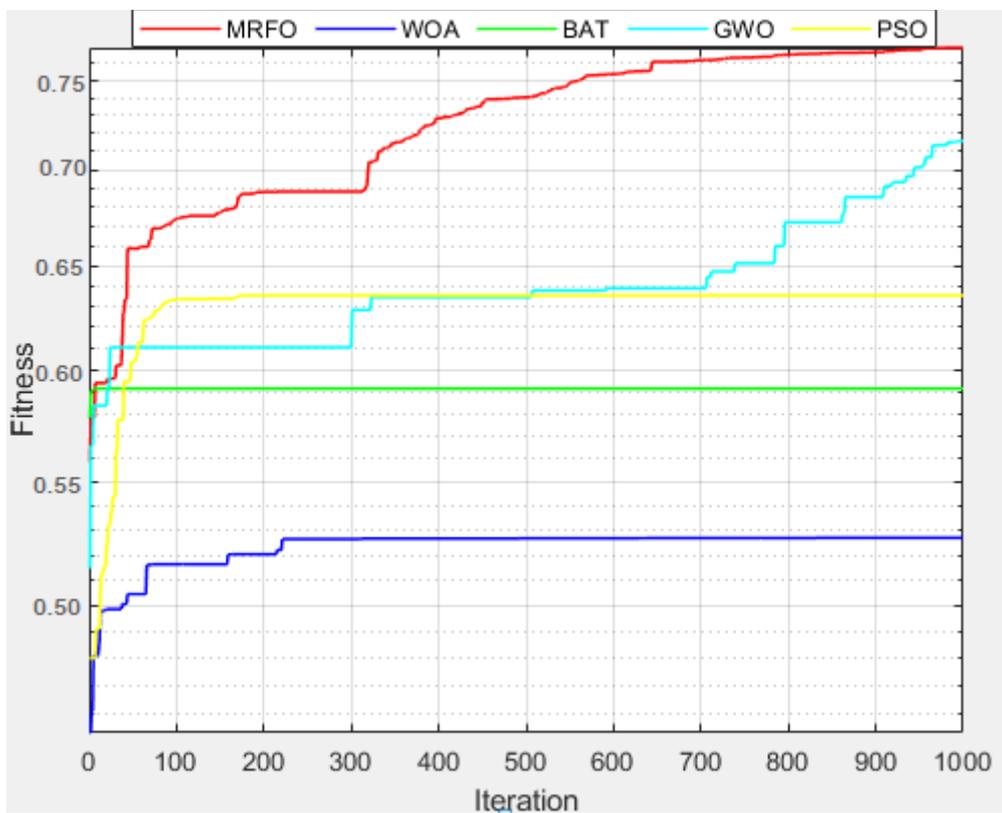


FIGURE 4.16 – Convergence avec 24 LEDs

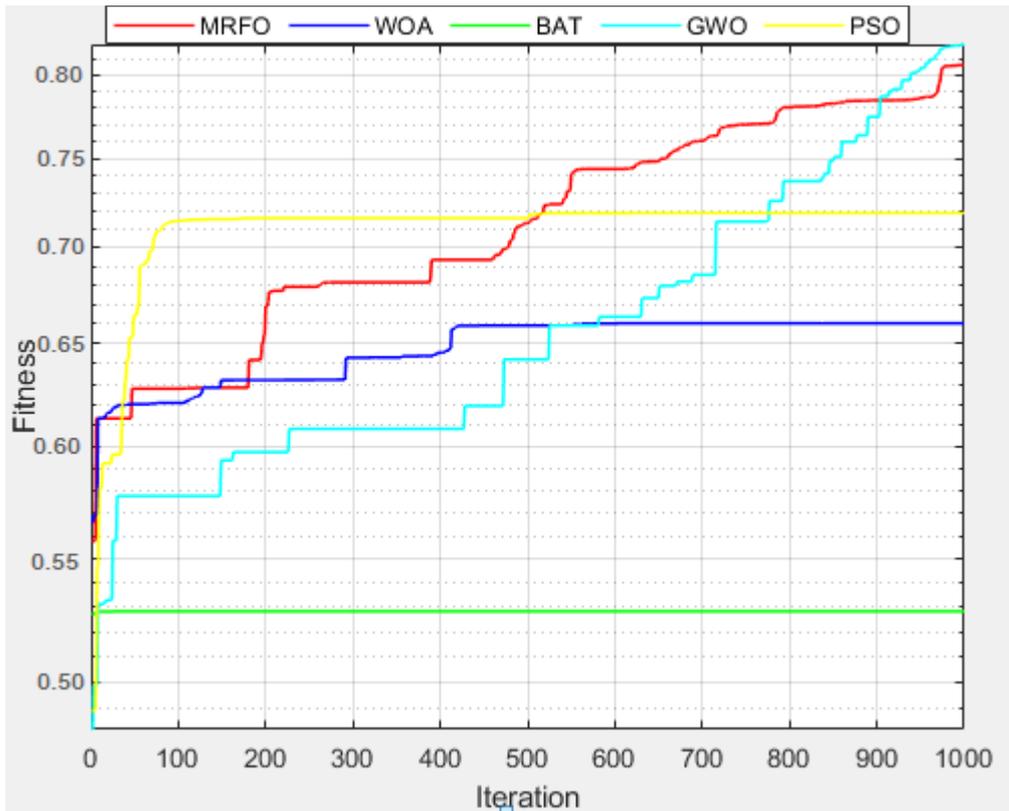


FIGURE 4.17 – Convergence avec 40 clients

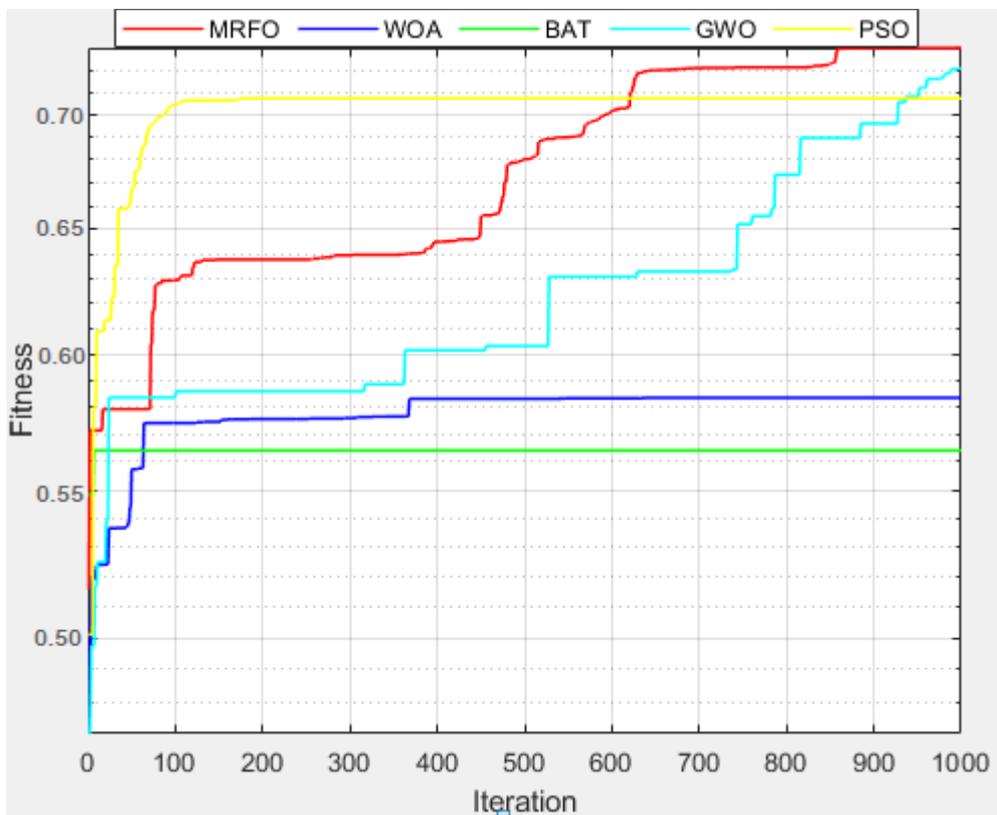


FIGURE 4.18 – Convergence avec 60 clients

## 4.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté les différentes équations utilisées par l'algorithme MRFO avec son pseudo-code nous avons ensuite fait l'étude d'optimisation pour une maximisation de la couverture d'une centaine de clients dans une bibliothèque universitaire dans différents scénarios en utilisant l'algorithme MRFO implémenté sur MATLAB d'abord, nous avons traduit notre problème d'optimisation en une fonction objectif. Ensuite, nous avons comparé les performances de cet algorithme avec cinq autres algorithmes WOA, GWO, BAT, PSO. Finalement, notre étude a été illustrée par des figures d'histogrammes et courbes de convergences montrant l'efficacité de MRFO par rapport aux autres algorithmes.

# Conclusion Générale

La communication par lumière visible est une technologie évolutionnaire basée sur l'utilisation des LEDs pour la transmission des données et les PDs pour leurs réception.

Elle est considérée comme une alternative à la technologie basée sur les ondes RF où une saturation de bande passante est inévitable suite à la forte demande des communications sans fil.

La technologie VLC présente un énorme potentiel et de nombreux avantages dans plusieurs domaines d'application (intérieur, extérieur, sous-sol et sous-marin). Le plus grand défi du milieu intérieur est d'assurer une couverture maximale des clients en choisissant un nombre optimal des LEDs ainsi que leur positionnement.

L'objectif principal de ce travail est d'introduire l'algorithme Manta Rays Foraging Optimization (MRFO) pour résoudre le problème de déploiement des LEDs dans un milieu intérieur (bibliothèque universitaire) en tenant compte des paramètres de couverture et de débit tout en respectant la contrainte du coût proportionnel au nombre des LEDs utilisées.

Notre étude est basée sur deux scénarios (variant le nombre de LEDs et le nombre d'utilisateurs) :

Le premier scénario consiste à varier le nombre des LEDs allant de 4 à 24 LEDs et garder le nombre des clients fixe (80 clients). Pour le deuxième scénario, nous avons varié le nombre des clients dans un intervalle de 10 à 100 en gardant le nombre des LEDs fixe (20 LEDs). Nous avons évalué et comparé les performances de MRFO et ses caractéristiques avec les algorithmes WOA, GWO, BAT et PSO.

Les résultats expérimentaux ont montré que MRFO donne d'excellents résultats en terme de couverture, débit et fitness par rapport aux algorithmes WOA, GWO, BAT et PSO dans la majorité des cas pour les deux scénarios.

La communication par lumière visible a fait preuve d'une grande performance une fois de plus lors de notre étude en assurant un débit supérieur à 80 Mbit/s pour chaque client couvert et ne présente aucun danger pour la santé humaine contrairement à la technologie traditionnelle des radios fréquences, ce qui est très encourageant pour l'émergence vers cette nouvelle technologie.

En perspectives, nous proposons d'étudier le problème d'allocation des ressources des LEDs et l'équilibrage des charges.

Nous suggérons également d'appliquer les algorithmes proposés pour résoudre d'autres problèmes d'optimisation dans le milieu extérieur (Outdoor).

# Bibliographie

- [1] Alin Cailean. *Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (VLC/LiFi). Application au domaine automobile*. PhD thesis, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, 2014.
- [2] Bodor Denis. la base documentaire des Éditions diamond. <https://connect.ed-diamond.com/Hackable/hk-010/communication-par-lumiere-visible-sur-arduino>, 18.01.2016.
- [3] <http://dept.npru.ac.th/vlc/data/files/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%A1%20-%20Visible%20Light%20Communication%20and%20Its%20Applications.pdf>.
- [4] Clement Le Bas. *Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil*. PhD thesis, Limoges, 2017.
- [5] Luiz Eduardo Mendes Matheus, Alex Borges Vieira, Luiz FM Vieira, Marcos AM Vieira, and Omprakash Gnawali. Visible light communication : concepts, applications and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4) :3204–3237, 2019.
- [6] [http://feu.routier.free.fr/sagem-astron.html?fbclid=IwAR1TrEFlwLN3FLX1cQc2XinH\\_LkXHqZ4jXU0Y9jdtbNUb2pLUTbbxe87Ljg](http://feu.routier.free.fr/sagem-astron.html?fbclid=IwAR1TrEFlwLN3FLX1cQc2XinH_LkXHqZ4jXU0Y9jdtbNUb2pLUTbbxe87Ljg),.
- [7] <https://sites.google.com/site/tpehomochromie/i-interaction-lumiere---matiere-la-coloration-d-un-objet/a-les-echanges-energetiques-entre-la-lumiere-et-la-matiere>,.
- [8] Selma Yahia, Yassine Meraihi, Amar Ramdane-Cherif, Asma Benmessaoud Gabis, Dalila Acheli, and Hongyu Guan. A survey of channel modeling techniques for visible light communications. *Journal of Network and Computer Applications*, 194 :103206, 2021.
- [9] Svilen Dimitrov and Harald Haas. *Principles of LED light communications : towards networked Li-Fi*. Cambridge University Press, 2015.
- [10] Taner Cevik and Serdar Yilmaz. An overview of visible light communication systems. *arXiv preprint arXiv :1512.03568*, 2015.
- [11] Armin Makvandi and Yousef S Kaviani. Experimental demonstration of IEEE 802.15.7 MAC layer in visible light communication sensor network. In *2019 2nd West Asian Colloquium on Optical Wireless Communications (WACOWC)*, pages 111–115. IEEE, 2019.
- [12] VERNEZ Jérôme. *Adaptation de la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 à une couche physique Ultra Wide Band*. CSEM, 2003.
- [13] CHERGUI Sofia. *Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (vlc/lifi). application au domaine automobile*. 2019.
- [14] Steve Joumessi Demeffo. *Dispositif communicant par optique sans fil pour les transmissions audio à l'intérieur du cockpit d'un avion*. PhD thesis, Université de Limoges, 2020.

- [15] E Ramadhani and GP Mahardika. The technology of lifi : A brief introduction. In *IOP conference series : materials science and engineering*, volume 325, page 012013. IOP Publishing, 2018.
- [16] Judit Bravo Alba. Development of embedded transmitter for visible light communication system for indoor environment. Master’s thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [17] Saeed Ur Rehman, Shakir Ullah, Peter Han Joo Chong, Sira Yongchareon, and Dan Komosny. Visible light communication : a system perspective—overview and challenges. *Sensors*, 19(5) :1153, 2019.
- [18] Haibo Zhang, Qing Huang, Fangwei Li, and Jiang Zhu. Digital communications and networks. 2016.
- [19] Latif Ullah Khan. Visible light communication : Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3(2) :78–88, 2017.
- [20] AFFOUNE Oussama and NAIDJA Abderaouf. Visible light communication. 2020.
- [21] Fawad Javaid, Anyi Wang, Muhammad Usman Sana, Asif Husain, and Imran Ashraf. Characteristic study of visible light communication and influence of coal dust particles in underground coal mines. *Electronics*, 10(8) :883, 2021.
- [22] [https://www.the-ambient.com/features/li-fi-smart-home-explained-harald-haas-371?fbclid=IwAR2EFscUxv-cx0VkfQHrAIajgI3t1\\_xgynAGLfSm2FDtZ7r8YDAZ\\_fhzaOY,](https://www.the-ambient.com/features/li-fi-smart-home-explained-harald-haas-371?fbclid=IwAR2EFscUxv-cx0VkfQHrAIajgI3t1_xgynAGLfSm2FDtZ7r8YDAZ_fhzaOY,)
- [23] <https://maisonsaine.ca/actualites/le-lifi-linternet-sans-fil-a-del,>
- [24] <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/emergencymanagementandresponse/commtracking/commtrackingtutorial1.html,>
- [25] Latifa Hacini. Schémas hybrides d’acquisition adaptative de codes pn pour des communications ds-cdma dans un canal rayleigh. *Mémoire Pour l’obtention du Diplôme de Magister Option : Traitement du Signal Université Mentouri Constantine Faculté des sciences de l’ingénieur Département d’électronique. Année Juin, 2012.*
- [26] [https://www.congovirtuel.com/page\\_rapport\\_travaux/page\\_memoire\\_kashama2020.php,](https://www.congovirtuel.com/page_rapport_travaux/page_memoire_kashama2020.php,)
- [27] [https://www.congovirtuel.com/page\\_rapport\\_travaux/page\\_memoire\\_kashama2020.php,](https://www.congovirtuel.com/page_rapport_travaux/page_memoire_kashama2020.php,)
- [28] <https://fr.sawakinome.com/articles/access-network-communication/difference-between-ofdm-and-ofdma.html,>
- [29] <https://www.mongsukulu.com/index.php/contenu/informatique-et-reseaux/telecommunications/704-transmission-numerique-sur-frequence-porteuse?start=1,>
- [30] Cihun-Siyong Gong, Yu-Chen Lee, Jyun-Liang Lai, Chueh-Hao Yu, Li Huang, and Chia-Yen Yang. The high-efficiency led driver for visible light communication applications. *Scientific Reports*, 6 :30991, 08 2016.
- [31] David Steel, Ayesha Karimi, and Kathryn White. An evaluation of two heavier-than-water internal limiting membrane-specific dyes during macular hole surgery. *Albrecht von Graeæes Archiv für Ophthalmologie*, 254, 07 2016.
- [32] [https://www.techopedia.com/definition/16724/luminous-flux.](https://www.techopedia.com/definition/16724/luminous-flux)
- [33] [https://atelierimageparis8.files.wordpress.com/2017/04/cours5.pdf.](https://atelierimageparis8.files.wordpress.com/2017/04/cours5.pdf)
- [34] [https://leclairage.fr/tm-photometrie/.](https://leclairage.fr/tm-photometrie/)
- [35] Robert E Levin. Luminance—a tutorial paper. *Journal of the SMPTE*, 77(10) :1005–1011, 1968.

- [36] [https://stringfixer.com/fr/Lambert's\\_cosine\\_law](https://stringfixer.com/fr/Lambert's_cosine_law).
- [37] Yang Qiu, Hsiao-Hwa Chen, and Wei-Xiao Meng. Channel modeling for visible light communications—a survey. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(14) :2016–2034, 2016.
- [38] Ahmed Al-Kinani, Cheng-Xiang Wang, Li Zhou, and Wensheng Zhang. Optical wireless communication channel measurements and models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3) :1939–1962, 2018.
- [39] Dehao Wu, Zabih Ghassemlooy, Hoa Le Minh, Sujan Rajbhandari, and Anthony C Boucouvalas. Improvement of the transmission bandwidth for indoor optical wireless communication systems using a diffused gaussian beam. *IEEE communications letters*, 16(8) :1316–1319, 2012.
- [40] Dilukshan Karunatilaka, Fahad Zafar, Vineetha Kalavally, and Rajendran Parthiban. Led based indoor visible light communications : State of the art. *IEEE communications surveys & tutorials*, 17(3) :1649–1678, 2015.
- [41] Baolong Li, Jiaheng Wang, Rong Zhang, Hong Shen, Chunming Zhao, and Lajos Hanzo. Multiuser mimo transceiver design for indoor downlink visible light communication under per-led optical power constraints. *IEEE Photonics Journal*, 7(4) :1–15, 2015.
- [42] Abdou-latifou KORODOWOU. Codage du canal en treillis dans un systeme de communication vlc. 2017.
- [43] Seyed Sina Torkestani. *Contribution à l'étude d'un réseau de communications optiques sans fils indoor-application à la télésurveillance en milieu hospitalier*. PhD thesis, Thèse de l'université de Limoges, France, 2012.
- [44] L SAID. *Méthodes bio-inspirées hybrides pour la résolution de problèmes complexes*. PhD thesis, Thèse Doctorat en Sciences en Informatique, Université Constantine 2 . . . , 2013.
- [45] Ali Kattan and Rosni Abdullah. Training of feed-forward neural networks for pattern-classification applications using music inspired algorithm. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 9, 01 2011.
- [46] Allaoua HEMMAK. Support de cours d'optimisation combinatoire focus sur les méthodes de résolution approchée. 2017.
- [47] Hanaa Hachimi. *Hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications*. PhD thesis, INSA de Rouen ; École Mohammadia d'ingénieurs (Rabat, Maroc), 2013.
- [48] Ilhem Boussaid. Improvement of metaheuristics for continuous optimization. 06 2013.
- [49] Omessaad HaJJI. Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. application à la conception des dispositifs électrotechniques. *Mémoire de thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille*, 2003.
- [50] [https://savoir.ensam.eu/moodle/pluginfile.php/29051/mod\\_resource/content/1/CM1.pdf](https://savoir.ensam.eu/moodle/pluginfile.php/29051/mod_resource/content/1/CM1.pdf).
- [51] Fatiha Troudi. Résolution du problème de l'emploi du temps.
- [52] [https://scenari5.mines-albi.fr/Optimisation/fr/co/0Intro\\_Classification.html](https://scenari5.mines-albi.fr/Optimisation/fr/co/0Intro_Classification.html).
- [53] <https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/mod/resource/view.php?id=751>.
- [54] Samir Mahdi. Optimisation multiobjectif par un nouveau schéma de coopération méta/exacte. 2007.

- [55] Amira Gherboudj. Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques. *Université de Constantine2*, 2013.
- [56] Ilhem Boussaid. *Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue*. PhD thesis, Paris Est, 2013.
- [57] <https://www.eurodecision.com/algorithmes/recherche-operationnelle-optimisation/heuristiques-meta-heuristiques>.
- [58] Alain Hertz. *LES MÉTA-HEURISTIQUES : quelques conseils pour en faire bon usage*. Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions, 2005.
- [59] Miloud Mihoubi et al. *Une métaheuristique hybride pour le problème d'optimisation dans les réseaux de Capteurs sans fils*. PhD thesis, 2021.
- [60] Oussama El Gerari. Contribution à l'amélioration des techniques de la programmation génétique. Littoral, 2011.
- [61] David E Godberg. Genetic algorithms in search. *Optimization, and Machine Learning*, 1989.
- [62] Mahmoud G Hemeida, Salem Alkhalaf, Al-Attar A Mohamed, Abdalla Ahmed Ibrahim, and Tomonobu Senjyu. Distributed generators optimization based on multi-objective functions using manta rays foraging optimization algorithm (mrfo). *Energies*, 13(15) :3847, 2020.
- [63] <https://www.scienceandcocktails.org/en/events/amsterdam/the-collective-motion-of-flocks-of-birds-and-schools-of-fish>,.
- [64] Maurice Clerc and Patrick Siarry. Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essais particuliers. *J3eA*, 3 :007, 2004.
- [65] Latifa DEKHICI and Khaled BELKADI. Métaheuristique des lucioles discrète pour les flow shop hybrides.
- [66] <https://transpireonline.blog/2019/07/23/firefly-algorithm-fa-a-novel-method-motivated-from-the-behavior-of-fireflies-for-optimal-solution/>,.