

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

- جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Télécommunication Optique

Par Briki Ayoub Yacine

Sujet

Conception et modélisation d'un système Li-Fi full-duplex visible/infrarouge pour environnement indoor

Soutenu publiquement, le 24/06/2026, devant le jury composé de :

S.M. MERIAH	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M. MELIANI	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
F. DERRAZ	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant
M. BOUSAHLA	MCB	Université de Tlemcen	Co-encadrant

Année universitaire : 2025-2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, avec toute ma gratitude et mon affection,

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien constant tout au long de mon parcours. Que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie.

À mon cher grand-père et à ma chère grand-mère, ainsi qu'à ma grand-mère paternelle Hana, pour leur tendresse, leurs prières et les valeurs qu'ils m'ont transmises.

À mes chers frères, Sohaib, Iyad et Mohammed, pour leur présence, leur affection et leurs encouragements.

À mes chères tantes, ainsi qu'à leurs époux et à leurs enfants, et à mon cher oncle maternel ainsi qu'à ses enfants, Randa et Moaïde, pour leur affection, leur présence et leurs encouragements. Une pensée particulière à Hadil, Maïssa et Zaki, ainsi qu'à Houssein et Oussaïd. Que Dieu vous protège et vous accorde bonheur et réussite.

À mes chers amis et compagnons de route, Yacine, Mostafa, Younes, Salim et Ayoub, pour leur amitié sincère, leur soutien et les bons moments partagés.

À celle qui occupe une place particulière dans mon cœur, pour sa présence, son soutien, sa compréhension et les beaux moments partagés. Que ces quelques mots témoignent de toute mon affection et de ma profonde reconnaissance.

À toutes les personnes que j'ai eu le plaisir de connaître durant mon séjour à la résidence universitaire, et tout particulièrement à mes camarades de promotion avec lesquels j'ai partagé les années d'études, les difficultés, les réussites et des souvenirs inoubliables.

À ma chère épouse, pour sa patience, sa compréhension et son soutien précieux, ainsi qu'à toute sa famille pour leur affection et leurs encouragements.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à mon parcours et à la réalisation de ce mémoire.

À vous tous, je dédie le fruit de mes efforts, avec toute ma reconnaissance et mon profond respect.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde et sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tout d'abord Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mon encadreur, Monsieur F. DERRAZ, Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour sa disponibilité permanente, ses précieux conseils scientifiques, sa rigueur méthodologique et son accompagnement bienveillant tout au long de ce projet. Sa confiance en mes capacités a été une source de motivation inestimable.

Je remercie également Monsieur M. BOUSAHLA, Maître de Conférences, co-encadreur de ce mémoire, pour ses orientations judicieuses, ses remarques constructives et le temps qu'il m'a accordé malgré ses nombreuses responsabilités.

Je suis honoré et reconnaissant envers Monsieur S. M. MERIAH, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Sa réputation scientifique et son expertise constituent pour moi une grande distinction.

Je tiens également à remercier Madame M. MELIANI, Professeure, qui a accepté d'évaluer ce travail. Sa lecture attentive et ses questions lors de la soutenance ont contribué à enrichir ce mémoire.

Ma reconnaissance va aussi à l'ensemble du corps enseignant de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, qui nous a transmis un savoir précieux durant toutes ces années d'apprentissage.

Je remercie enfin ma famille — mes parents, mes frères et mes sœurs — pour leur patience inébranlable, leur soutien moral et matériel, ainsi que pour tous les sacrifices consentis. Ce travail est le fruit de leur amour et de leur dévouement.

À tous mes amis et camarades de promotion qui m'ont soutenu et avec qui j'ai partagé des moments précieux, je dis un grand merci.

BRIKI AYOUB YACINE

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude, la modélisation et la conception d'un système Li-Fi indoor bidirectionnel de type full-duplex visible/infrarouge. Le travail présente d'abord les fondements des communications optiques sans fil, les limites des technologies radiofréquences classiques et le positionnement du Li-Fi comme solution complémentaire pour les environnements intérieurs. Il développe ensuite le modèle du canal optique indoor, en tenant compte de la source lambertienne, du lien en visibilité directe, du champ de vision du photodétecteur, de la puissance reçue et des principales sources de bruit. Enfin, une architecture matérielle est proposée pour deux nœuds capables d'échanger simultanément des données en séparant spectralement la voie visible et la voie infrarouge.

Mots-clés : Li-Fi, VLC, communications optiques sans fil, full-duplex, visible/infrarouge, canal indoor, photodiode, LED, IM/DD.

Abstract

This thesis deals with the study, modelling and design of an indoor bidirectional Li-Fi system based on a visible/infrared full-duplex architecture. The work first introduces the fundamentals of optical wireless communications, the limitations of conventional radio-frequency technologies and the positioning of Li-Fi as a complementary solution for indoor environments. It then develops the indoor optical channel model by considering the Lambertian source, the line-of-sight link, the photodetector field of view, the received optical power and the main noise sources. Finally, a hardware architecture is proposed for two nodes able to exchange data simultaneously by spectrally separating the visible and infrared links.

Keywords : Li-Fi, VLC, optical wireless communications, full-duplex, visible/infrared, indoor channel, photodiode, LED, IM/DD.

الملخص:

تتناول هذه المذكرة دراسة ونمذجة وتصميم نظام Li-Fi ثنائي الاتجاه مخصص للبيئات الداخلية، يعتمد على بنية Full-Duplex باستخدام الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء. وتستعرض المبادئ الأساسية لـ OWC، وحدود تقنيات RF التقليدية، ودور Li-Fi كحل مكمل للاتصالات داخل المباني. كما تقدم نموذجاً للقناة الضوئية الداخلية بالاعتماد على المصدر اللامبرتي، ورابط LOS، ومجال الرؤية FOV للكاشف الضوئي، والقدرة الضوئية المستقبلية، وأهم مصادر الضوضاء. وفي الأخير، تقترح بنية عتادية لعقدتين قادرتين على تبادل البيانات في الوقت نفسه من خلال الفصل الطيفي بين قناتي الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء.

الكلمات المفتاحية: Li-Fi، VLC، OWC، Full-Duplex، الضوء المرئي/الأشعة تحت الحمراء، القناة الضوئية الداخلية، الكاشف الضوئي، LED، IM/DD.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Introduction générale	1
1 Généralités sur le Li-Fi et les communications optiques	2
1.1 Introduction du chapitre	2
1.2 Communications sans fil classiques	3
1.2.1 Principe des communications radiofréquences	3
1.2.2 Limites des systèmes radiofréquences	4
1.3 Communications optiques sans fil (OWC et VLC)	5
1.3.1 Optical Wireless Communication (OWC)	5
1.3.2 Visible Light Communication (VLC)	6
1.4 Positionnement du Li-Fi	6
1.5 Principe du Li-Fi	7
1.5.1 Principe général de fonctionnement	7
1.6 Architecture générale d'un système Li-Fi	8
1.6.1 Rôle des LED	8
1.6.2 Rôle de la photodiode	9
1.6.3 Communication bidirectionnelle visible/IR	9
1.7 Techniques de modulation en Li-Fi	10
1.7.1 Modulation OOK	10
1.7.2 Modulation PWM	11
1.7.3 Modulation PPM	12
1.7.4 Modulations OFDM optiques	13
1.8 Avantages et contraintes du Li-Fi	14
1.8.1 Avantages	14
1.9 Contraintes physiques	15
1.10 Contraintes humaines et normatives	15
1.11 Applications du Li-Fi indoor	16
1.11.1 Smart lighting	16

1.11.2Hôpitaux	17
1.11.3Industrie	18
1.11.4Internet des Objets (IoT)	19
1.11.5Applications bidirectionnelles	19
1.12Cahier des Charges Préliminaire du Projet	19
1.12.1Objectifs généraux	19
1.12.2Exigences fonctionnelles	20
1.12.3Architecture préliminaire retenue	20
1.12.4Contraintes techniques	21
1.12.5Livrables attendus	21
1.13Conclusion	21
2 Modélisation du canal optique indoor	23
2.1 Introduction	23
2.2 Propagation de la lumière	24
2.2.1 Source lambertienne	24
2.2.2 Lien en visibilité directe (LOS)	25
2.2.3 Réflexions et composantes NLOS	27
2.3 Modèle mathématique du canal optique	28
2.3.1 Gain DC du canal	28
2.3.2 Influence de la distance et de l'angle	28
2.3.3 Champ de vision (FOV)	29
2.4 Bruits et perturbations	30
2.4.1 Lumière ambiante	30
2.4.2 Shot noise	30
2.4.3 Thermal noise	31
2.5 Performances théoriques	31
2.5.1 Rapport signal sur bruit (SNR)	32
2.5.2 Capacité du canal	32
2.5.3 Taux d'erreur binaire (BER)	32
2.6 Simulation MATLAB du système Li-Fi full-duplex Visible/IR	33
2.6.1 Résultats de simulation	35
2.6.2 Discussion	38
2.7 Conclusion	39
3 Conception du système Li-Fi proposé	40
3.1 Introduction	40
3.2 Cahier des charges technique	40
3.2.1 Exigences fonctionnelles	41
3.2.2 Exigences de performance	41
3.2.3 Contraintes électroniques et optiques	43
3.3 Architecture globale du système	43

3.3.1	Principe du full-duplex visible/IR	44
3.3.2	Séparation spectrale visible/infrarouge	44
3.3.3	Schéma fonctionnel du système	45
3.3.4	Description des deux nœuds optiques	46
3.4	Conception de l'émetteur optique	46
3.4.1	Choix de la LED visible	46
3.4.2	Choix de la LED infrarouge	47
3.4.3	Conception du circuit driver	49
3.4.4	Génération du signal OOK/NRZ :	50
3.4.5	Structure du datagramme transmis	51
3.4.6	Suite de fonctionnement émission-réception	52
3.4.7	Schéma final de l'émetteur :	54
3.5	Conception du récepteur optique :	55
3.5.1	Choix de la photodiode :	55
3.5.2	Conception de l'amplificateur transimpédance (TIA) :	56
3.5.3	Filtrage du signal reçu :	56
3.5.4	Circuit de décision :	57
3.5.5	Schémas électroniques TX/RX connectés au STM32	57
3.6	Réalisation expérimentale du prototype	59
3.7	Choix technologiques et dimensionnement :	63
3.7.1	Composants principaux	63
3.7.2	Justification des choix	64
3.7.3	Contraintes PCB et alimentation	65
3.8	Conclusion	66
	Conclusion générale	68
	Références	69

Table des figures

1	Principe de la modulation OOK appliquée à un système Li-Fi	10
2	Principe des modulations PWM utilisées en Li-Fi	12
3	Principe de la modulation PPM appliquée à la transmission Li-Fi	13
4	Principe des modulations OFDM optiques utilisées en Li-Fi .	14
5	Utilisation du Li-Fi dans les systèmes d'éclairage intelligent .	16
6	Application du Li-Fi dans les environnements hospitaliers sans interférences RF	18
7	Distribution angulaire de l'intensité lumineuse d'une source lambertienne pour différents ordres m	24
8	Géométrie d'un lien optique en visibilité directe (LOS) dans un système Li-Fi indoor	26
9	Réflexions optiques en environnement indoor dans un sys- tème Li-Fi	27
10	Champ de vision du photodétecteur dans un système Li-Fi indoor	29
11	Évolution du SNR en fonction de la distance pour les deux directions du système full-duplex Visible/IR	36
12	Taux d'erreur binaire approximatif en fonction de la distance pour les liens visible et infrarouge	36
13	Capacité théorique de Shannon en fonction de la distance pour les deux directions de transmission	37
14	Influence de l'angle d'irradiation sur la puissance reçue à une distance fixe de 2 m	37
15	Architecture globale du système Li-Fi full-duplex visible/IR .	44
16	Principe de séparation spectrale entre la voie visible et la voie infrarouge	45
17	Structure proposée du datagramme Li-Fi utilisé pour l'échange entre les deux nœuds	51
18	Suite de fonctionnement de la chaîne Li-Fi depuis le data- gramme jusqu'aux données reçues	53
19	Chronogrammes qualitatifs de la chaîne Li-Fi : sortie STM32, commande MOSFET, courant LED, lumière modulée, cou- rant photodiode, sortie TIA, filtrage et échantillonnage	54
20	Chaîne d'émission optique basée sur une modulation OOK/NRZ et un driver LED	55
21	Circuit Li-Fi TX connecté au STM32 : sortie numérique/PWM, MOSFET logique et LED visible ou infrarouge modulée	58

22	Circuit Li-Fi RX connecté au STM32 : photodiode BPW34, TIA à AOP rapide, filtre anti-repliement et entrée ADC	59
23	Implantation de la carte STM32 Nucleo sur plaque d'essai utilisée pour la génération et l'acquisition des signaux	60
24	Vue d'ensemble du prototype Li-Fi réalisé sur breadboard avec carte STM32, LED visible, LED infrarouge et câblage des blocs TX/RX	61
25	Deuxième vue du prototype montrant la disposition des sources optiques et des connexions expérimentales	62

Liste des tableaux

1	Comparaison entre les communications RF et le Li-Fi	5
2	Comparaison des techniques de modulation en Li-Fi	14
3	Exigences fonctionnelles du système Li-Fi bidirectionnel visible/IR proposé	20
4	Architecture bidirectionnelle visible/IR proposée	20
5	Architecture spectrale retenue pour la simulation full-duplex	33
6	Paramètres utilisés dans la simulation	34
7	Résultats numériques représentatifs du lien A→B visible	35
8	Résultats numériques représentatifs du lien B→A infrarouge	35
9	Exigences principales retenues pour la conception	42
10	Critères de choix de la LED infrarouge	48
11	Comparaison synthétique des modulations envisagées	50
12	Rôle des champs du datagramme proposé	51
13	Synthèse des choix technologiques proposés	63

Introduction générale

La croissance continue du trafic de données, l'augmentation du nombre d'objets connectés et la densification des environnements indoor imposent de nouvelles contraintes aux réseaux de communication sans fil. Les technologies radiofréquences, comme le Wi-Fi, la 4G et la 5G, assurent aujourd'hui une connectivité massive, mais elles restent confrontées à plusieurs limites : congestion du spectre radio, interférences électromagnétiques, contraintes de sécurité et restrictions dans certains milieux sensibles.

Dans ce contexte, les communications optiques sans fil constituent une solution complémentaire intéressante. Elles exploitent le domaine optique, notamment la lumière visible et l'infrarouge, pour transmettre des données à travers l'espace libre. Le Li-Fi s'inscrit dans cette famille de technologies : il repose sur la modulation rapide de l'intensité lumineuse d'une source LED et sur la détection directe du signal optique par une photodiode.

La problématique abordée dans ce mémoire concerne la conception et l'étude d'un système Li-Fi indoor bidirectionnel. Plus précisément, le travail s'intéresse à une architecture full-duplex visible/infrarouge permettant à deux nœuds d'échanger simultanément des données. Le choix d'une séparation spectrale entre la voie visible et la voie infrarouge vise à réduire les interférences entre les deux sens de communication et à améliorer la fiabilité du fonctionnement full-duplex.

L'objectif général du mémoire est donc d'étudier les bases théoriques du Li-Fi, de modéliser le canal optique indoor et de proposer une conception matérielle cohérente d'un système full-duplex visible/IR. Le mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux. Le premier chapitre présente les généralités sur le Li-Fi et les communications optiques. Le deuxième chapitre développe la modélisation du canal optique indoor et les indicateurs de performance. Le troisième chapitre décrit la conception du système Li-Fi proposé, depuis le cahier des charges jusqu'au choix des blocs électroniques principaux.

Chapitre 1

Généralités sur le Li-Fi et les communications optiques

1.1 Introduction du chapitre

L'augmentation continue du trafic de données, liée au développement des réseaux mobiles, des services numériques, du cloud computing et de l'Internet des Objets (IoT), impose une charge croissante sur les systèmes de communication sans fil. Les technologies radiofréquences classiques, telles que le Wi-Fi, la 4G et la 5G, ont permis une connectivité massive, mais elles sont confrontées à des limites importantes : congestion du spectre radio, interférences électromagnétiques, risques de sécurité et restrictions d'usage dans certains environnements sensibles [1], [2].

Dans ce contexte, les communications optiques sans fil, appelées Optical Wireless Communications (OWC), constituent une solution complémentaire prometteuse. Elles exploitent le spectre optique, beaucoup plus large que le spectre radio, pour transmettre des données à travers l'espace libre au moyen de sources lumineuses modulées [1], [2]. Parmi ces technologies, la Visible Light Communication (VLC) utilise la lumière visible émise par des diodes électroluminescentes (LED) afin d'assurer simultanément l'éclairage et la transmission de données [3], [4].

Le Li-Fi (Light Fidelity) représente une évolution réseau de la VLC. Il vise à fournir une communication sans fil par la lumière, avec possibilité de gestion bidirectionnelle, mobilité, sécurité améliorée et intégration dans les architectures numériques modernes [4], [12]. Dans le cadre de ce mémoire, l'étude ne se limite pas à une liaison Li-Fi unidirectionnelle. Une attention particulière est accordée à une architecture bidirectionnelle de type visible/IR, dans laquelle un sens de transmission utilise la lumière visible tandis que l'autre sens exploite l'infrarouge. Cette séparation spectrale permet d'envisager une communication simultanée en réduisant les interférences entre les deux directions.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les fondements théoriques nécessaires à la compréhension du Li-Fi. Après une présentation des communications RF et de leurs limites, les communications optiques sans fil, la VLC, le principe IM/DD, les composants principaux, les techniques de modulation, les avantages, les contraintes et les applications indoor du Li-Fi seront étudiés. Ces éléments constituent la base scientifique des chapitres suivants, consacrés à la modélisation du canal optique indoor et à la conception du système proposé.

1.2 Communications sans fil classiques

1.2.1 Principe des communications radiofréquences

Les communications sans fil classiques reposent principalement sur l'utilisation d'ondes électromagnétiques dans la bande des radiofréquences (RF). Dans un système RF, l'information est d'abord convertie en signal électrique, puis modulée sur une onde porteuse de fréquence élevée. Cette onde est rayonnée dans l'espace par une antenne d'émission et captée par une antenne de réception, où elle est démodulée afin de récupérer l'information originale [2].

Le signal RF transmis peut être représenté sous la forme générale suivante :

$$s(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (1.1)$$

où :

- $A(t)$ représente l'amplitude modulée ;
- f_c est la fréquence porteuse ;
- φ correspond à la phase du signal.

Selon la technique utilisée, l'information peut être codée dans l'amplitude, la fréquence, la phase ou une combinaison de ces grandeurs. Les systèmes modernes, comme le Wi-Fi et les réseaux cellulaires 4G/5G, utilisent souvent des modulations multiporteuses de type OFDM afin d'améliorer l'efficacité spectrale et la robustesse face aux trajets multiples.

En propagation idéale en espace libre, la puissance reçue dans un lien RF peut être estimée par l'équation de Friis :

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1.2)$$

où :

- P_r est la puissance reçue ;
- P_t est la puissance transmise ;
- G_t et G_r sont les gains des antennes d'émission et de réception ;
- λ est la longueur d'onde ;
- d est la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Cette relation montre que la puissance reçue diminue lorsque la distance augmente. Les ondes RF possèdent toutefois l'avantage de pouvoir se propager même en absence de visibilité directe, grâce aux phénomènes de réflexion, diffraction et diffusion. Cette propriété améliore la couverture, mais elle peut aussi engendrer des trajets multiples et des interférences [2].

1.2.2 Limites des systèmes radiofréquences

Malgré leur maturité technologique et leur large déploiement, les systèmes RF présentent plusieurs limitations structurelles. La première concerne la congestion du spectre radioélectrique. Le nombre croissant d'utilisateurs, de smartphones, d'objets connectés et de réseaux sans fil entraîne une occupation importante des bandes disponibles, ce qui réduit la qualité de service et la capacité effective des réseaux.

La capacité théorique d'un canal bruité est donnée par la formule de Shannon :

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (1.3)$$

où :

- C est la capacité du canal ;
- B est la bande passante ;
- SNR est le rapport signal sur bruit.

Cette relation montre que la capacité dépend directement de la bande passante disponible et du niveau de bruit. Lorsque le spectre devient saturé, l'amélioration du débit devient plus difficile.

Les systèmes RF sont également sensibles aux interférences électromagnétiques. Dans les environnements denses ou industriels, la présence de plusieurs émetteurs peut provoquer du brouillage et réduire le rapport signal sur bruit. De plus, les ondes radio traversent les murs, ce qui facilite la couverture mais augmente les risques d'interception non autorisée. Cette caractéristique impose l'utilisation de mécanismes de sécurité avancés.

Enfin, dans certains environnements sensibles, comme les hôpitaux, les avions ou les installations industrielles critiques, l'utilisation des RF peut être limitée afin d'éviter les interférences avec des équipements électroniques. Ces limites justifient l'étude de solutions complémentaires, parmi lesquelles les communications optiques sans fil et le Li-Fi [3], [4].

Tab. 1.1 : Comparaison entre les communications RF et le Li-Fi

Critère	RF : Wi-Fi, 4G, 5G	Li-Fi
Support de transmission	Ondes radio	Lumière visible ou infrarouge
Spectre	Limité et réglementé	Très large dans le domaine optique
Interférences RF	Possibles	Absentes
Traversée des murs	Oui	Non
Sécurité physique	Moyenne	Élevée
Environnements sensibles	Parfois problématique	Adapté
Couverture	Large	Limitée à la zone éclairée

1.3 Communications optiques sans fil (OWC et VLC)

1.3.1 Optical Wireless Communication (OWC)

Les communications optiques sans fil, ou Optical Wireless Communications (OWC), regroupent les systèmes qui utilisent le spectre optique pour transmettre des informations à travers l'espace libre, sans support guidé comme la fibre optique. Elles peuvent exploiter l'infrarouge, la lumière visible ou l'ultraviolet [1], [2].

La relation entre la fréquence f , la longueur d'onde λ et la célérité de la lumière c est donnée par :

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.4)$$

Où

$c \approx 3 \times 10^8$ m/s dans le vide.

Cette relation montre que les signaux optiques possèdent des fréquences très élevées, ce qui correspond à un potentiel important en matière de bande passante. Dans les systèmes OWC indoor, la transmission repose généralement sur le principe IM/DD, c'est-à-dire Intensity Modulation / Direct Detection. Cela signifie que l'intensité lumineuse est modulée à l'émission et que la puissance optique est directement détectée à la réception.

1.3.2 Visible Light Communication (VLC)

La Visible Light Communication (VLC) est une sous-catégorie des OWC qui utilise la bande visible du spectre électromagnétique, généralement comprise entre 380 nm et 780 nm. Elle s'appuie principalement sur les LED, largement utilisées dans l'éclairage moderne, pour transmettre des données tout en assurant l'illumination de l'espace [3], [5].

Le principe consiste à faire varier très rapidement le courant d'alimentation de la LED, ce qui entraîne une variation de la puissance optique émise. Cette modulation est suffisamment rapide pour être imperceptible à l'œil humain, tout en étant détectable par une photodiode ou un photorécepteur.

La VLC présente plusieurs avantages : elle exploite une infrastructure d'éclairage déjà existante, ne génère pas d'interférences RF et offre une sécurité physique intéressante grâce au confinement spatial de la lumière. Cependant, elle est sensible à l'alignement, à la distance, aux obstacles, aux réflexions et à la lumière ambiante.

1.4 Positionnement du Li-Fi

Le Li-Fi peut être considéré comme une évolution réseau de la VLC. Alors que la VLC désigne principalement la transmission de données par lumière visible, le Li-Fi vise à fournir un système de communication complet comparable au Wi-Fi, mais basé sur le support lumineux. Il peut intégrer la bidirectionnalité, la gestion multi-utilisateurs, la mobilité et l'intégra-

tion IP [4], [6], [12].

Dans une architecture Li-Fi simple, la transmission est souvent étudiée dans un seul sens, par exemple d'une LED vers une photodiode. Toutefois, un système de communication pratique doit permettre l'échange d'informations dans les deux directions. Pour cela, plusieurs solutions sont possibles : alternance temporelle, séparation fréquentielle, séparation spatiale ou séparation spectrale.

Dans ce projet, l'approche retenue pour l'évolution bidirectionnelle repose sur une séparation spectrale visible/IR. L'idée consiste à utiliser la lumière visible pour un sens de transmission et l'infrarouge pour l'autre sens. Cette solution facilite la séparation des signaux et limite les interférences entre les deux canaux optiques.

1.5 Principe du Li-Fi

1.5.1 Principe général de fonctionnement

Le Li-Fi repose sur la transmission de données par modulation de l'intensité lumineuse émise par une LED. Contrairement aux systèmes RF, qui utilisent généralement une onde porteuse sinusoïdale, le Li-Fi transmet l'information par variation de la puissance optique. Le récepteur optique, souvent une photodiode, convertit ensuite cette puissance lumineuse en courant électrique.

Dans un système IM/DD, le signal optique transmis doit respecter une contrainte fondamentale : la puissance lumineuse ne peut pas être négative. Cette contrainte s'écrit :

$$P_{opt}(t) \geq 0 \quad (1.5)$$

Le signal optique modulé peut être représenté sous la forme :

$$P_{opt}(t) = P_0 + x(t) \quad (1.6)$$

où :

- P_0 est la composante continue liée à l'éclairage ;
- $x(t)$ est le signal d'information qui module l'intensité lumineuse.

Cette contrainte de positivité distingue les communications optiques IM/DD

des communications RF classiques. Elle impose l'utilisation de modulations adaptées, telles que l'OOK, la PWM, la PPM ou certaines variantes de l'OFDM optique.

1.6 Architecture générale d'un système Li-Fi

Un système Li-Fi indoor se compose généralement de trois blocs principaux : l'émetteur optique, le canal optique indoor et le récepteur optique. L'émetteur comprend une source LED, un circuit driver et un bloc de génération du signal. Le canal optique correspond à la propagation de la lumière dans l'environnement intérieur. Le récepteur comprend une photodiode, un amplificateur transimpédance, un filtrage et un bloc de décision.

Dans le cas d'une liaison unidirectionnelle, la chaîne peut être résumée ainsi : données numériques, génération du signal, driver LED, LED, canal optique indoor, photodiode, TIA, filtrage, comparateur et données reconstituées.

Dans le cas d'une liaison bidirectionnelle, chaque nœud doit contenir à la fois un émetteur et un récepteur. Le système n'est donc plus constitué d'un seul TX et d'un seul RX, mais de deux nœuds optoélectroniques capables d'émettre et de recevoir.

1.6.1 Rôle des LED

La LED constitue l'élément principal de l'émetteur Li-Fi. Elle assure simultanément la fonction d'éclairage et la transmission de données. La conversion électro-optique peut être approximée par une relation proportionnelle entre le courant injecté dans la LED et la puissance optique émise :

$$P_{opt} = \eta I_{LED} \quad (1.7)$$

où :

- P_{opt} est la puissance optique émise ;
- η est l'efficacité électro-optique ;
- I_{LED} est le courant d'injection de la LED.

Les LED modernes possèdent un temps de réponse court, ce qui permet

une modulation rapide de la lumière. Dans une architecture visible/IR, la LED visible peut être utilisée pour le lien A vers B, tandis qu'une LED infrarouge peut être utilisée pour le lien B vers A.

1.6.2 Rôle de la photodiode

La photodiode assure la conversion optoélectronique au niveau du récepteur [6]. Elle transforme la puissance optique incidente en courant électrique. Cette relation est donnée par :

$$I_{ph} = RP_r \quad (1.8)$$

où :

- I_{ph} est le courant photo-généré ;
- R est la responsivité de la photodiode, exprimée en A/W ;
- P_r est la puissance optique reçue.

Le courant généré par la photodiode est généralement faible. Il doit donc être amplifié au moyen d'un amplificateur transimpédance (TIA). La tension de sortie peut être approximée par :

$$V_{out} = R_f I_{ph} \quad (1.9)$$

où

R_f est la résistance de rétroaction du TIA.

Dans un système visible/IR, le choix de la photodiode doit être cohérent avec la longueur d'onde utilisée. Un récepteur visible doit être sensible au domaine visible, tandis qu'un récepteur IR doit être sensible à la longueur d'onde infrarouge choisie, par exemple 850 nm ou 940 nm [1], [2].

1.6.3 Communication bidirectionnelle visible/IR

Dans une liaison Li-Fi bidirectionnelle, deux nœuds échangent des informations. Chaque nœud possède un bloc d'émission et un bloc de réception. Pour éviter que les deux signaux optiques ne se perturbent, une solution efficace consiste à séparer les deux sens de transmission par longueur d'onde.

Le principe peut être exprimé comme suit :

$$\begin{cases} A \rightarrow B : \lambda_{vis} \in [380, 780] \text{ nm} \\ B \rightarrow A : \lambda_{IR} \approx 850 \text{ nm ou } 940 \text{ nm} \end{cases} \quad (1.10)$$

Cette séparation spectrale permet d'envisager un fonctionnement full-duplex, dans lequel les deux directions peuvent transmettre simultanément. En pratique, elle nécessite des composants adaptés : LED visible, LED IR, photodiodes sensibles aux longueurs d'onde correspondantes et, si possible, filtres optiques afin de limiter les interférences entre les canaux.

1.7 Techniques de modulation en Li-Fi

1.7.1 Modulation OOK

La modulation OOK (On-Off Keying) est la technique la plus simple utilisée en Li-Fi. Elle consiste à représenter un bit logique 1 par l'émission lumineuse et un bit logique 0 par l'absence d'émission ou par un niveau lumineux faible. Le signal optique transmis peut être modélisé par :

$$s(t) = \begin{cases} P_{\max}, & \text{si bit} = 1 \\ 0, & \text{si bit} = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

Cette modulation est très simple à mettre en œuvre avec un microcontrôleur, une LED et un driver. Elle est donc adaptée aux premiers prototypes expérimentaux. Toutefois, elle reste sensible au bruit, à la lumière ambiante et aux variations de seuil au niveau du récepteur [6].

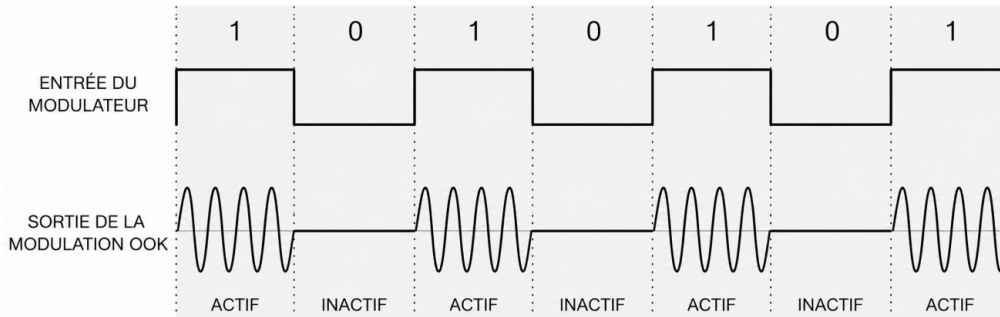


Fig. 1.1 : Principe de la modulation OOK appliquée à un système Li-Fi

Source : schéma réalisé par l'auteur, adapté d'après [6] et [11].

Pour une détection OOK en présence d'un bruit gaussien, le taux d'erreur

binaire peut être approximé par :

$$BER_{OOK} \approx Q\left(\sqrt{SNR}\right) \quad (1.12)$$

où

$Q(\cdot)$ est la fonction Q. Cette relation montre que le BER diminue lorsque le SNR augmente [1], [2].

1.7.2 Modulation PWM

La modulation PWM (Pulse Width Modulation) consiste à coder l'information dans la largeur des impulsions lumineuses tout en conservant une amplitude constante. Le rapport cyclique est défini par :

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (1.13)$$

où :

- T_{on} est la durée pendant laquelle la LED est allumée ;
- T est la période totale du signal ;
- D est le rapport cyclique.

La PWM est particulièrement intéressante lorsque la fonction d'éclairage reste importante, car elle permet de gérer le dimming, c'est-à-dire la variation de l'intensité lumineuse moyenne [6].

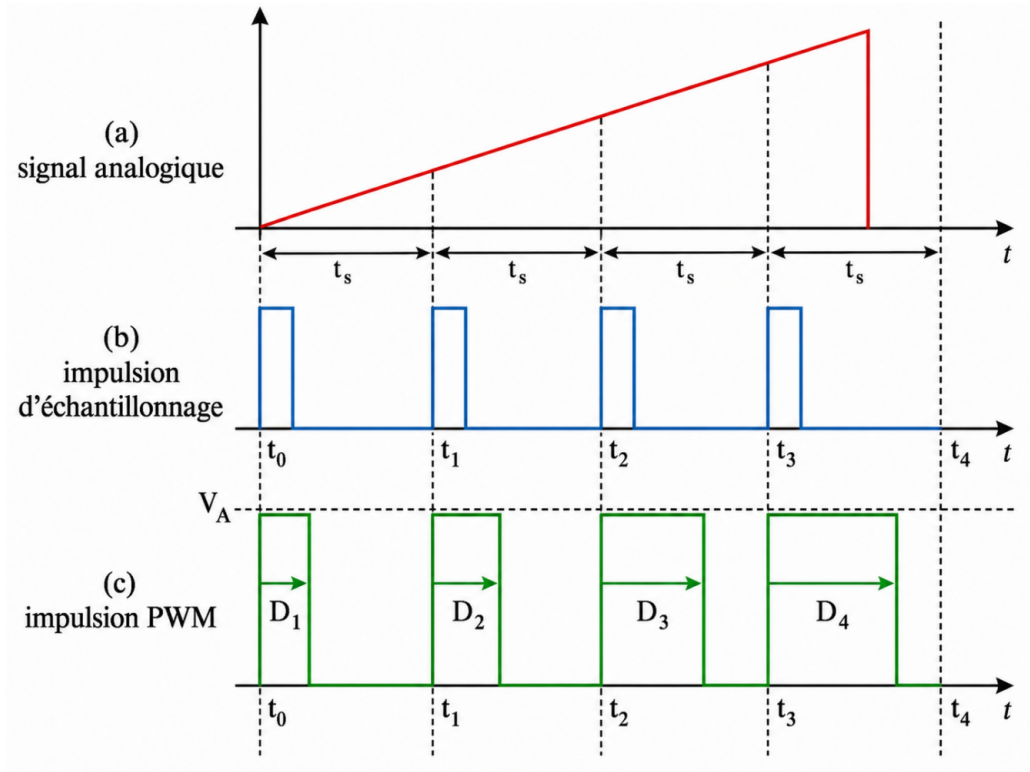


Fig. 1.2 : Principe des modulations PWM utilisées en Li-Fi

1.7.3 Modulation PPM

La modulation PPM (Pulse Position Modulation) code l'information dans la position temporelle d'une impulsion à l'intérieur d'un intervalle symbole. Contrairement à l'OOK, l'information n'est pas seulement représentée par la présence ou l'absence d'une impulsion, mais par sa position dans le temps.

Dans un système M-PPM, le nombre de bits transmis par symbole est :

$$N_b = \log_2(M) \quad (1.14)$$

où

M représente le nombre de positions possibles de l'impulsion.

La PPM présente une bonne efficacité énergétique, car une seule impulsion est transmise par symbole. Cependant, elle nécessite une synchronisation temporelle plus précise que l'OOK.

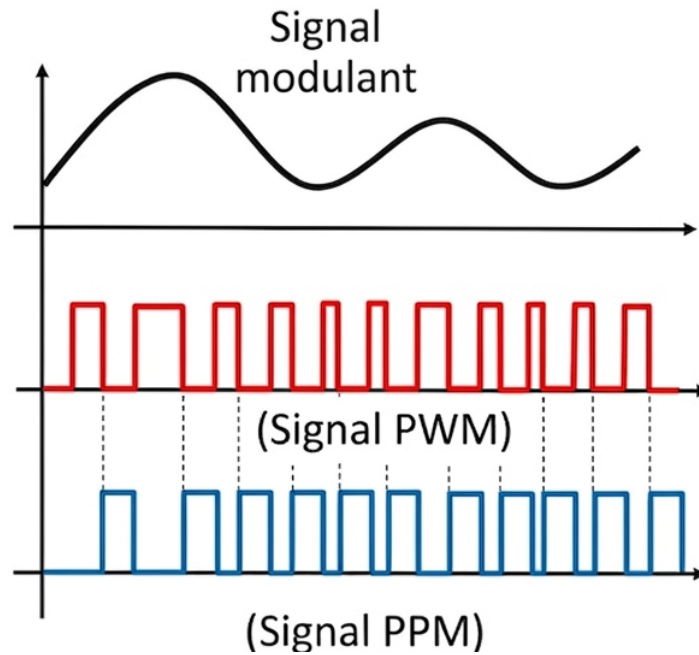


Fig. 1.3 : Principe de la modulation PPM appliquée à la transmission Li-Fi

1.7.4 Modulations OFDM optiques

L'OFDM optique est utilisée pour atteindre des débits plus élevés et améliorer l'efficacité spectrale. Cependant, le signal OFDM classique est bipolaire et complexe, ce qui n'est pas directement compatible avec la contrainte IM/DD. Pour rendre le signal compatible avec le domaine optique, on utilise des variantes comme DCO-OFDM ou ACO-OFDM [7].

Dans le cas du DCO-OFDM, un biais continu est ajouté au signal afin de garantir sa positivité :

$$s_{opt}(t) = x(t) + B \quad (1.15)$$

où :

- $x(t)$ est le signal OFDM électrique ;
- B est le biais continu ajouté ;
- $s_{opt}(t)$ est le signal optique positif transmis.

Ces techniques sont plus complexes que l'OOK ou la PWM, mais elles sont adaptées aux systèmes Li-Fi à haut débit [9].

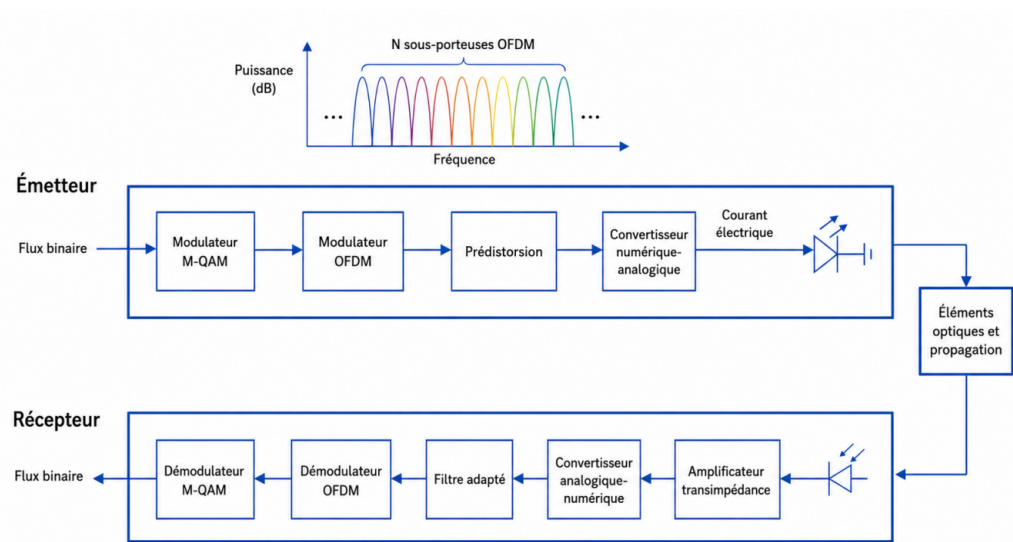


Fig. 1.4 : Principe des modulations OFDM optiques utilisées en Li-Fi

Tab. 1.2 : Comparaison des techniques de modulation en Li-Fi

Modulation	Complexité	Robustesse	Dimming	Débit visé
OOK	Faible	Moyenne	Limité	Faible à moyen
PWM	Faible	Moyenne	Oui	Moyen
PPM	Moyenne	Bonne	Limité	Moyen
OFDM optique	Élevée	Très bonne	Oui	Élevé

Pertinen
pro-
to-
type

Très adap-
tée
Adaptée
Possible
Avancée

La PWM peut être retenue si la variation d'éclairage doit être intégrée, tandis que l'OFDM optique reste une perspective avancée [6], [9], [10].

1.8 Avantages et contraintes du Li-Fi

1.8.1 Avantages

Le Li-Fi présente plusieurs avantages par rapport aux communications RF classiques. Premièrement, il exploite le spectre optique, beaucoup plus large que le spectre radio. Cette disponibilité spectrale représente un potentiel important pour les communications à haut débit [1], [4].

Deuxièmement, le Li-Fi ne génère pas d'interférences RF. Il peut donc être utilisé dans des environnements sensibles, comme les hôpitaux, les avions ou certaines zones industrielles. Troisièmement, la lumière visible ne traverse pas les murs opaques. Le signal est donc naturellement confiné à la zone éclairée, ce qui améliore la sécurité physique de la communication [4], [12].

Enfin, le Li-Fi permet de combiner deux fonctions : l'éclairage et la transmission de données. Dans une architecture bidirectionnelle visible/IR, il devient également possible d'échanger des informations dans les deux sens, ce qui ouvre la voie à des applications interactives, comme l'envoi de commandes, de données capteurs ou d'accusés de réception [12], [13].

1.9 Contraintes physiques

Les performances du Li-Fi dépendent fortement de la géométrie du lien. La distance entre la LED et la photodiode, l'angle d'émission, l'angle de réception et le champ de vision du récepteur influencent directement la puissance optique reçue. Une mauvaise orientation peut provoquer une forte atténuation du signal.

Le Li-Fi est également sensible aux obstacles et à la lumière ambiante. Une obstruction du lien LOS peut réduire la puissance reçue, tandis que la lumière solaire ou les lampes environnantes peuvent augmenter le bruit au niveau du photodétecteur.

Dans un système bidirectionnel visible/IR, des contraintes supplémentaires apparaissent : nécessité d'aligner deux directions, choix de photodiodes compatibles, filtrage optique ou électronique, séparation des longueurs d'onde et synchronisation entre émission et réception. Ces contraintes doivent être prises en compte dès la phase de conception [1], [3].

1.10 Contraintes humaines et normatives

Le Li-Fi doit respecter les contraintes liées au confort visuel. La modulation de la LED ne doit pas provoquer de scintillement perceptible par l'œil humain. Les fréquences de modulation doivent donc être suffisamment élevées afin d'éviter l'effet de flicker [6].

Le système doit aussi permettre, si nécessaire, le dimming, c'est-à-dire

l'ajustement de l'intensité lumineuse. Certaines modulations comme la PWM facilitent cette fonction.

Enfin, la sécurité photobiologique doit être respectée, en particulier lorsque l'infrarouge est utilisé. Comme le rayonnement IR peut être invisible pour l'utilisateur, la puissance optique doit rester dans des limites sûres afin d'éviter tout risque pour les yeux. Les recommandations liées à la sécurité des LED et aux systèmes VLC, comme IEC 62471 et IEEE 802.15.7, doivent être prises en compte dans la conception [6], [11].

1.11 Applications du Li-Fi indoor

1.11.1 Smart lighting

Le smart lighting représente l'une des applications les plus naturelles du Li-Fi. Les luminaires LED peuvent assurer simultanément l'éclairage de la pièce et la transmission de données. Chaque lampe peut agir comme un point d'accès optique, permettant une communication localisée et une meilleure réutilisation spatiale du spectre [4], [12].

Cette application est adaptée aux bureaux, universités, centres commerciaux et bâtiments intelligents. Elle peut également contribuer à la localisation indoor et à la gestion énergétique [4], [12].

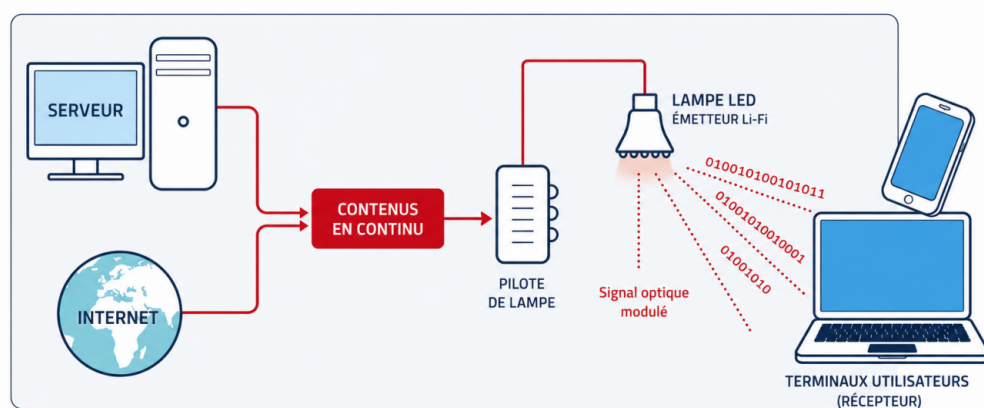


Fig. 1.5 : Utilisation du Li-Fi dans les systèmes d'éclairage intelligent

1.11.2 Hôpitaux

Dans les hôpitaux, les communications RF peuvent être limitées afin d'éviter les interférences avec certains équipements médicaux. Le Li-Fi, n'utilisant pas d'ondes radio, constitue une solution intéressante pour transmettre des données dans les salles de soins, les blocs opératoires ou les unités sensibles.

Il peut être utilisé pour la transmission de données médicales, la connexion de dispositifs de surveillance et l'accès sécurisé à l'information [3], [12].

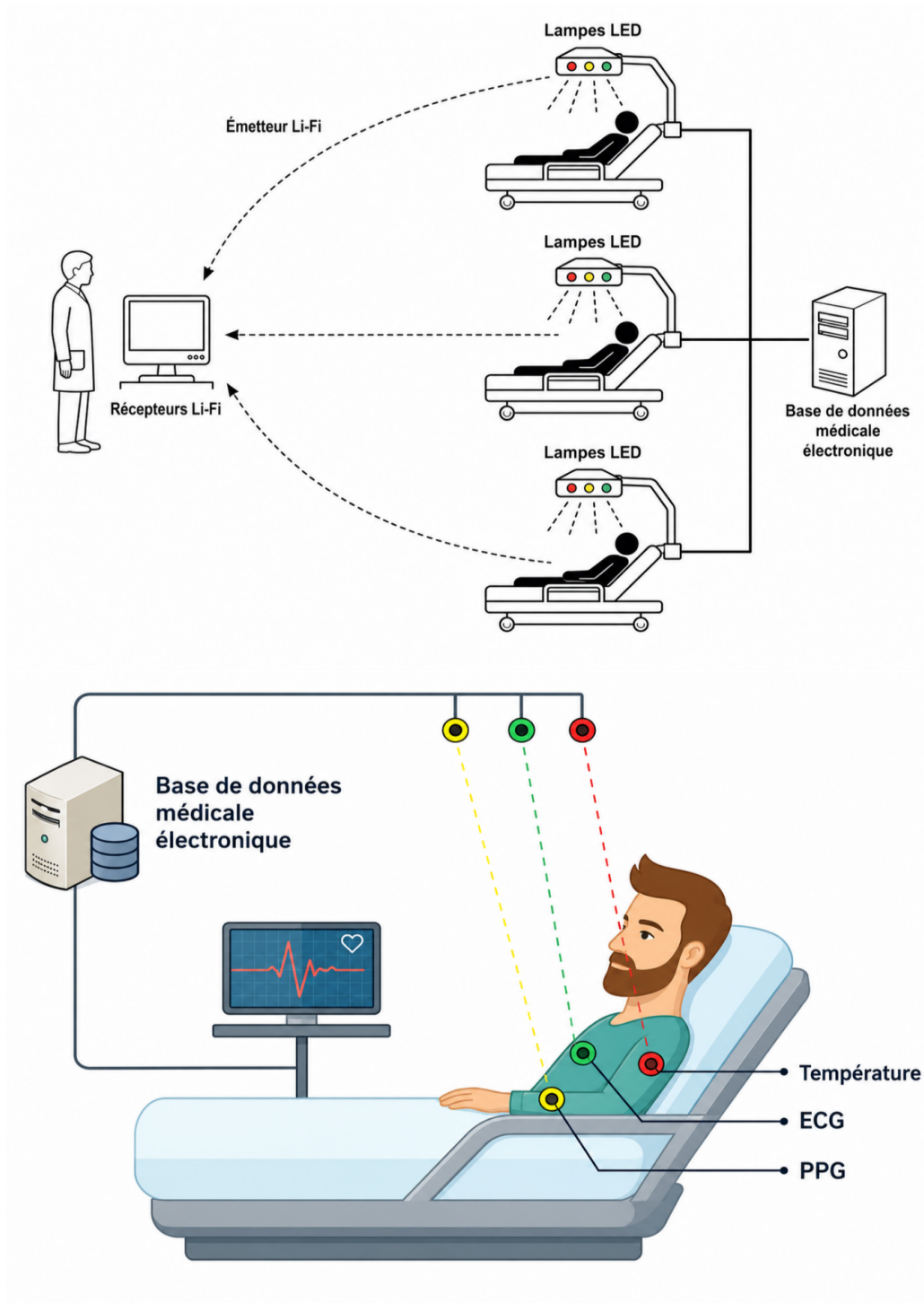


Fig. 1.6 : Application du Li-Fi dans les environnements hospitaliers sans interférences RF

1.11.3 Industrie

Les environnements industriels peuvent contenir de nombreuses sources d'interférences électromagnétiques. Le Li-Fi offre une alternative intéressante pour connecter des machines, capteurs, robots ou systèmes de

contrôle dans des zones où les RF sont perturbées.

Le confinement spatial du signal lumineux permet également d'améliorer la sécurité des échanges, car la communication reste limitée à la zone éclairée [4], [13].

1.11.4 Internet des Objets (IoT)

Le Li-Fi peut être utilisé dans les applications IoT indoor pour connecter des capteurs, des objets intelligents et des systèmes de surveillance. Il offre une faible latence, une sécurité renforcée et une intégration naturelle avec l'infrastructure d'éclairage [12], [13].

Dans le cadre d'une architecture bidirectionnelle, les objets connectés peuvent envoyer des mesures et recevoir des commandes ou des paramètres de configuration, ce qui rend le système plus interactif.

1.11.5 Applications bidirectionnelles

La communication bidirectionnelle est importante dans les systèmes où l'échange d'informations ne se limite pas à un simple envoi de données. Elle permet par exemple à un capteur d'envoyer ses mesures et de recevoir une commande, à un robot indoor de recevoir une instruction et de renvoyer son état, ou encore à un système de communication sécurisé d'échanger des accusés de réception.

Dans ce type d'application, la séparation visible/IR constitue une solution simple et efficace : un canal peut être réservé à la transmission principale, tandis que l'autre canal peut être utilisé pour le retour d'information [4], [12].

1.12 Cahier des Charges Préliminaire du Projet

1.12.1 Objectifs généraux

L'objectif principal du projet est de concevoir et d'étudier un système de communication optique Li-Fi indoor bidirectionnel, basé sur une séparation spectrale visible/IR. Le système doit permettre l'échange de données entre deux nœuds optiques, tout en tenant compte des contraintes liées à

la distance, à l'alignement, à la lumière ambiante, au bruit et à la sécurité [1], [4], [6], [11].

1.12.2 Exigences fonctionnelles

Tableau 1.3 : Exigences fonctionnelles du système Li-Fi bidirectionnel visible/IR proposé

Critère	Exigence proposée
Type de liaison	Bidirectionnelle
Mode visé	Full-duplex visible/IR
Sens A vers B	Lumière visible
Sens B vers A	Infrarouge IR
Modulation initiale	OOK
Distance cible prototype	0,5 m à 3 m
Débit cible initial	1 kb/s à quelques dizaines de kb/s
Plateforme possible	Arduino'/ESP32 STM32
Récepteur	Photodiode ou phototransistor adapté
Contraintes principales	Alignement, lumière ambiante, filtrage, sécurité

1.12.3 Architecture préliminaire retenue

L'architecture retenue repose sur deux nœuds complémentaires. Le nœud A possède un émetteur visible et un récepteur IR. Le nœud B possède un émetteur IR et un récepteur visible. Ainsi, les deux sens de communication utilisent des longueurs d'onde différentes (voir tab. 1.4).

Tab. 1.4 : Architecture bidirectionnelle visible/IR proposée

Nœud / Canal	Fonction émission	Fonction réception
Nœud A	Transmission en lumière visible	Réception en infrarouge
Nœud B	Transmission en infrarouge	Réception en lumière visible
Canal A vers B	Lumière visible émise par le nœud A	Photodiode visible côté nœud B
Canal B vers A	Lumière infrarouge émise par le nœud B	Photodiode infrarouge côté nœud A

Cette architecture permet de séparer les deux flux optiques et de réduire les interférences entre les directions de transmission. Elle reste compatible avec un prototype simple basé sur microcontrôleur et modulation OOK [6].

1.12.4 Contraintes techniques

La réalisation du système nécessite le choix d'une LED visible, d'une LED IR, de photodiodes adaptées, de drivers de courant, de résistances de limitation, d'un étage d'amplification et éventuellement d'un filtrage optique ou électronique.

Le canal visible doit être conçu de manière à assurer une modulation rapide tout en conservant un niveau d'éclairage acceptable. Le canal IR doit respecter les contraintes de sécurité, car le rayonnement infrarouge est invisible pour l'utilisateur. Les deux récepteurs doivent être suffisamment sensibles pour détecter les signaux tout en rejetant au mieux la lumière ambiante [1], [3].

1.12.5 Livrables attendus

Les livrables attendus sont les suivants :

- schéma bloc du système bidirectionnel visible/IR ;
- schéma électronique de l'émetteur visible ;
- schéma électronique de l'émetteur infrarouge ;
- schéma du récepteur visible ;
- schéma du récepteur infrarouge ;
- code d'émission et de réception ;
- tests de distance, d'angle et de lumière ambiante ;
- analyse des performances et discussion des limites.

1.13 Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases théoriques nécessaires à l'étude d'un système Li-Fi indoor [1]-[6]. Les limites des communications RF ont d'abord été rappelées afin de justifier l'intérêt des communications optiques sans fil. Les notions d'OWC, de VLC et de Li-Fi ont ensuite été introduites, en

montrant que le Li-Fi représente une évolution réseau de la transmission par lumière visible.

Le principe IM/DD a été étudié, ainsi que le rôle des composants principaux : LED, photodiode, driver, TIA, filtrage et bloc de décision. Les contraintes spécifiques du signal optique, notamment la positivité de la puissance lumineuse, expliquent le choix de modulations adaptées comme l'OOK, la PWM, la PPM et l'OFDM optique [6], [9], [10].

Dans le cadre de ce projet, une architecture bidirectionnelle visible/IR a été proposée. Elle repose sur l'utilisation de la lumière visible dans un sens et de l'infrarouge dans l'autre sens, ce qui permet une séparation spectrale des deux canaux. Cette approche constitue une base cohérente pour concevoir un système Li-Fi full-duplex en environnement intérieur [4], [12], [13].

Les éléments présentés dans ce chapitre préparent le chapitre suivant, consacré à la modélisation du canal optique indoor, à l'étude de la propagation lumineuse, des bruits, du SNR et du BER [1], [2], [5], [8].

Chapitre 2

Modélisation du canal optique indoor

2.1 Introduction

La modélisation du canal optique indoor est une étape essentielle pour analyser les performances d'un système Li-Fi. Contrairement aux communications radiofréquences, la transmission en Li-Fi repose sur la modulation de l'intensité lumineuse et la détection directe (IM/DD), ce qui impose une modélisation spécifique du signal optique, de la puissance reçue et du bruit au niveau du récepteur [1], [2].

En environnement intérieur, la puissance optique reçue dépend principalement de la distance entre l'émetteur et le récepteur, des angles d'émission et d'incidence, ainsi que du champ de vision (Field of View — FOV) du photodétecteur. Elle est également influencée par les réflexions sur les surfaces et par la lumière ambiante [1], [3], [4].

Dans le cadre de ce travail, le modèle du canal est d'abord établi pour une liaison Li-Fi indoor en visibilité directe. Il est ensuite exploité dans une simulation MATLAB modifiée afin d'étudier un système full-duplex basé sur la séparation spectrale : le lien $A \rightarrow B$ utilise la lumière visible, tandis que le lien $B \rightarrow A$ utilise l'infrarouge. Cette modification permet de représenter une communication bidirectionnelle simultanée tout en réduisant l'interférence entre les deux sens de transmission.

Ce chapitre présente donc le modèle de propagation, les principales sources de bruit et les indicateurs de performance tels que le SNR, la capacité du canal et le BER. La dernière partie est consacrée à la simulation numérique du système full-duplex Visible/IR et à l'interprétation des résultats obtenus.

2.2 Propagation de la lumière

La propagation de la lumière dans un système Li-Fi indoor présente des caractéristiques spécifiques liées à la nature directionnelle des sources LED et aux propriétés géométriques du canal optique. Contrairement aux communications RF, la transmission repose généralement sur une émission lumineuse modélisée par une source lambertienne, et la réception dépend fortement de la configuration spatiale du lien [1], [4].

2.2.1 Source lambertienne

Dans les systèmes VLC/Li-Fi, les LED blanches ou infrarouges sont couramment modélisées comme des sources lambertiennes.

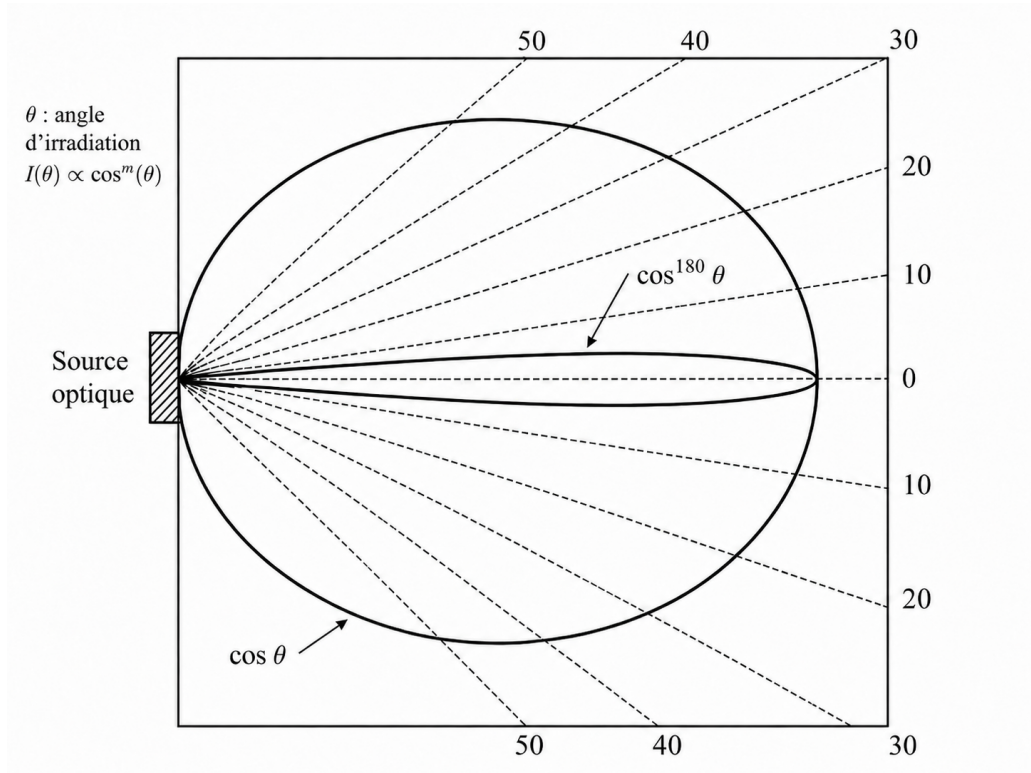


Fig. 2.1 : Distribution angulaire de l'intensité lumineuse d'une source lambertienne pour différents ordres m

Selon ce modèle, l'intensité lumineuse rayonnée dans une direction donnée suit une loi en cosinus. L'intensité rayonnée $I(\varphi)$, en fonction de l'angle d'irradiation φ , s'écrit :

$$I(\varphi) = I_0 \cos^m(\varphi) \quad (2.1)$$

Où

- I_0 représente l'intensité maximale dans la direction normale à la surface émettrice,
- φ l'angle d'irradiation et m l'ordre lambertien.

L'ordre lambertien dépend du semi-angle à mi-puissance $\Phi_{1/2}$ de la LED. Il est défini par :

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\Phi_{1/2}))} \quad (2.2)$$

Un ordre lambertien faible correspond à une émission plus large, tandis qu'un ordre élevé correspond à une source plus directive. Dans une architecture full-duplex Visible/IR, cette différence est importante : une LED visible peut présenter un faisceau plus large, alors qu'une source infrarouge peut être plus directive selon le composant utilisé.

2.2.2 Lien en visibilité directe (LOS)

En environnement intérieur, la composante dominante du canal est généralement le lien en visibilité directe (Line Of Sight — LOS). Dans ce cas, le trajet direct entre la LED et la photodiode transporte la majeure partie de la puissance reçue.

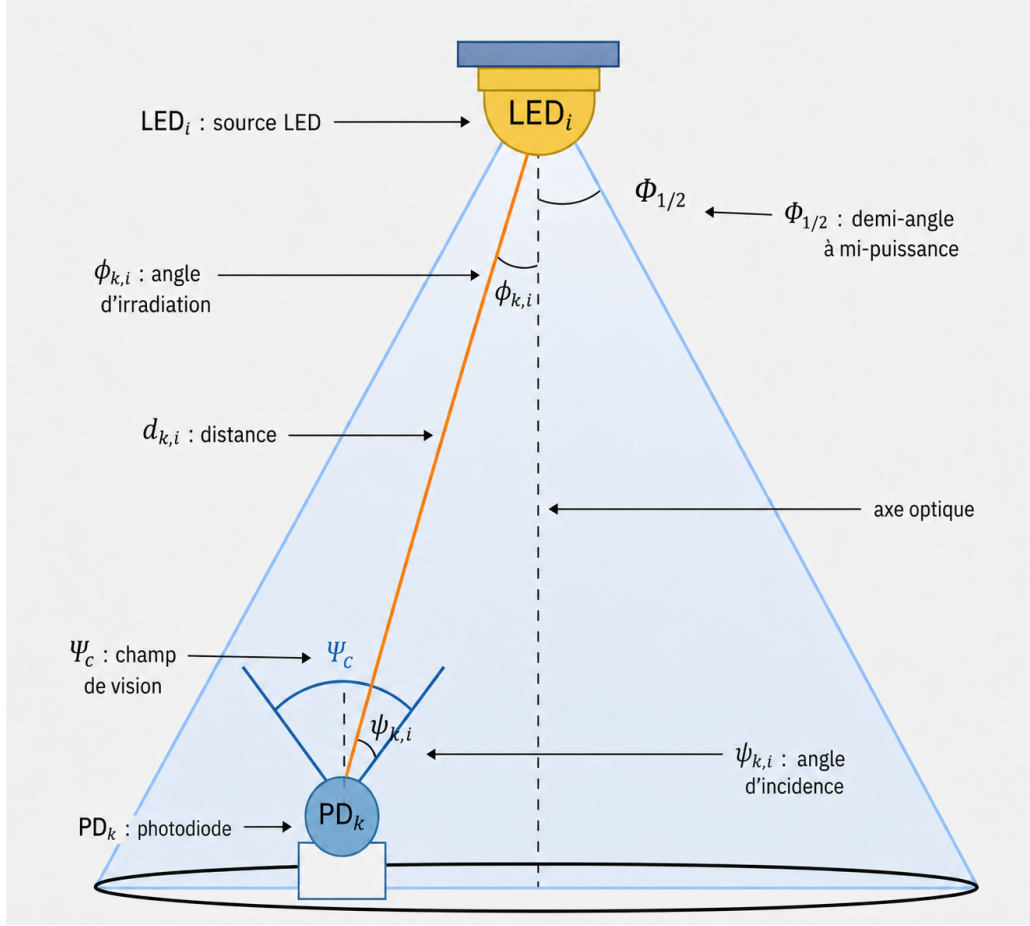


Fig. 2.2 : Géométrie d'un lien optique en visibilité directe (LOS) dans un système Li-Fi indoor

Pour un système IM/DD, le gain DC du canal LOS est exprimé par [1], [2], [4] :

$$H_{\text{LOS}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{\text{pd}}}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0, & \psi > \Psi_c. \end{cases} \quad (2.3)$$

Où

- A_{pd} est la surface active de la photodiode,
- d la distance entre l'émetteur et le récepteur,
- φ l'angle d'irradiation,
- ψ l'angle d'incidence,
- $T_s(\psi)$ le gain du filtre optique,
- $g(\psi)$ le gain du concentrateur optique

- Ψ_c le champ de vision du récepteur.

Cette expression montre que la puissance optique reçue décroît avec le carré de la distance et dépend fortement de l'orientation entre l'émetteur et le récepteur. La puissance reçue s'écrit alors :

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

où P_t est la puissance optique émise.

Dans le cas full-duplex étudié, cette relation est appliquée séparément au lien visible $A \rightarrow B$ et au lien infrarouge $B \rightarrow A$, avec des paramètres propres à chaque bande spectrale.

2.2.3 Réflexions et composantes NLOS

En plus de la composante LOS, la propagation en environnement intérieur inclut des composantes réfléchies sur les murs, le plafond, le sol et les objets présents dans la pièce. Ces contributions sont souvent appelées composantes NLOS (Non-Line Of Sight) [1], [3].

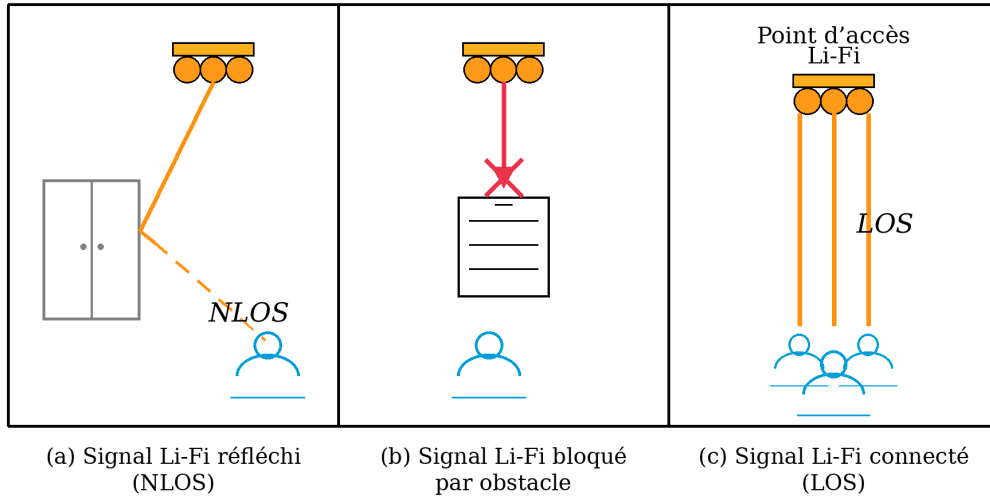


Fig. 2.3 : Réflexions optiques en environnement indoor dans un système Li-Fi

Les réflexions introduisent un phénomène de trajets multiples, pouvant élargir la réponse impulsionnelle du canal et limiter la bande passante effective. Cependant, dans une première analyse de niveau maître, la composante LOS est généralement considérée comme dominante afin de simplifier l'évaluation des performances théoriques [1], [4]. Le canal op-

tique indoor peut alors être représenté sous une forme générale :

$$h(t) = h_{\text{LOS}}(t) + h_{\text{NLOS}}(t) \quad (2.5)$$

Dans ce travail, la simulation principale repose sur le canal LOS. Les réflexions sont discutées comme une limite du modèle et comme une piste d'amélioration pour les futurs tests expérimentaux.

2.3 Modèle mathématique du canal optique

La modélisation mathématique du canal optique indoor permet d'établir une relation analytique entre la puissance optique émise et la puissance reçue au niveau du photodétecteur. Dans un système Li-Fi basé sur l'IM/DD, le canal est généralement caractérisé par son gain DC en visibilité directe, qui représente la composante dominante du lien [1], [2].

2.3.1 Gain DC du canal

Pour une source LED lambertienne d'ordre m , le gain DC du canal LOS est celui donné par l'équation (2.3). Lorsque le récepteur reste dans le champ de vision, la puissance reçue est proportionnelle à la puissance transmise et au gain du canal :

$$P_r = P_t H_{\text{LOS}}(0) \quad (2.6)$$

Le courant photo-généré au niveau de la photodiode est ensuite obtenu par la relation de conversion optoélectronique :

$$I_{\text{ph}} = R P_r \quad (2.7)$$

où R est la responsivité de la photodiode exprimée en A/W. Cette relation est fondamentale, car elle relie directement le modèle optique au modèle électrique du récepteur.

2.3.2 Influence de la distance et de l'angle

L'expression du gain du canal montre que la puissance reçue dépend fortement de la distance et des angles géométriques. Le terme $1/d^2$ indique

que lorsque la distance double, la puissance optique reçue est divisée par quatre, si les autres paramètres restent constants.

Les termes $\cos^m(\varphi)$ et $\cos(\psi)$ traduisent la dépendance angulaire du lien. Une augmentation de l'angle d'émission φ réduit la puissance rayonnée dans la direction du récepteur. De même, une augmentation de l'angle d'incidence ψ diminue la surface effective de collecte de la photodiode. Une mauvaise orientation entre la LED et le photodétecteur peut donc provoquer une forte dégradation du signal reçu.

Dans une liaison full-duplex Visible/IR, l'influence de l'angle peut être différente pour les deux sens. Le canal infrarouge, plus directif lorsque son ordre lambertien est élevé, peut être plus sensible au désalignement que le canal visible.

2.3.3 Champ de vision (FOV)

Le champ de vision du photodétecteur représente l'angle maximal d'incidence pour lequel le récepteur peut détecter correctement le signal optique.

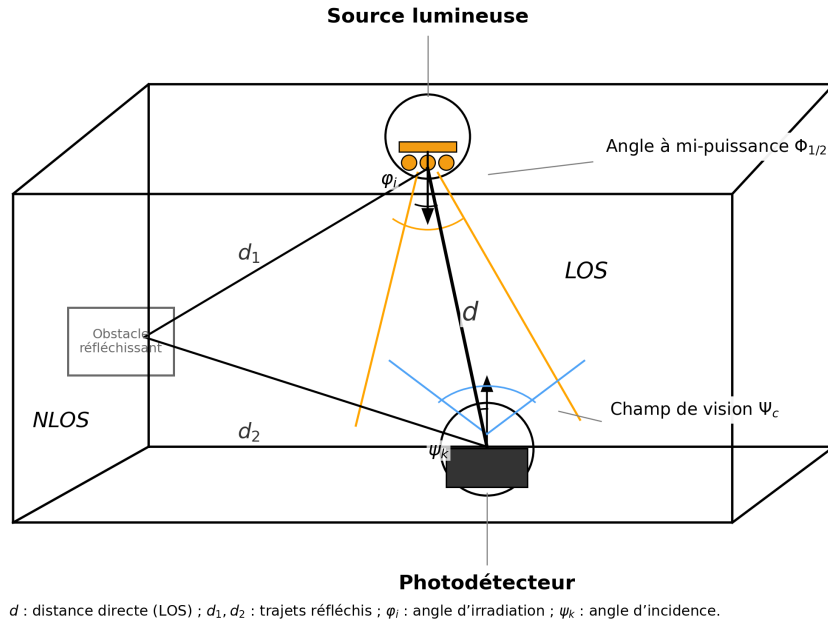


Fig. 2.4 : Champ de vision du photodétecteur dans un système Li-Fi indoor

Mathématiquement, le gain du canal devient nul lorsque l'angle d'incidence dépasse le FOV :

$$H_{\text{LOS}}(0) = 0 \quad \text{si } \psi > \Psi_c \quad (2.8)$$

Un FOV large augmente la probabilité de réception en cas de désalignement, mais il peut également accroître la quantité de lumière ambiante collectée. Le choix du FOV constitue donc un compromis entre robustesse géométrique et immunité au bruit [3].

2.4 Bruits et perturbations

Dans un système Li-Fi indoor, les performances du lien ne dépendent pas uniquement du gain du canal, mais également des sources de bruit présentes au niveau du récepteur. Dans les systèmes IM/DD, les principales contributions au bruit sont liées à la lumière ambiante, au shot noise associé au courant photo-généré et au bruit thermique du circuit électronique [1], [2]. Ces perturbations influencent directement le SNR et le BER.

2.4.1 Lumière ambiante

La lumière ambiante, qu'elle soit d'origine solaire ou artificielle, constitue une source importante de perturbation dans les systèmes VLC/Li-Fi. Elle introduit une composante optique continue supplémentaire au niveau du photodétecteur, générant un courant parasite :

$$I_{\text{amb}} = R P_{\text{amb}} \quad (2.9)$$

où P_{amb} représente la puissance optique ambiante reçue.

Bien que cette composante puisse être partiellement éliminée par filtrage, elle augmente indirectement le shot noise. Dans l'architecture full-duplex étudiée, la bande visible est généralement plus exposée à l'éclairage ambiant que la bande infrarouge, ce qui justifie l'intérêt d'un lien retour IR dans certaines conditions.

2.4.2 Shot noise

Le shot noise est un bruit fondamental lié au caractère discret du courant électrique généré par les photons incidents. Il dépend du courant total circulant dans la photodiode, incluant le courant utile, le courant ambiant et le courant d'obscurité. Sa variance peut être écrite sous la forme [1], [2] :

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2 q I_{\text{total}} B \quad (2.10)$$

où

- q est la charge élémentaire de l'électron,
- I_{total} le courant total détecté
- B la bande passante du système.

Une forte lumière ambiante peut donc augmenter le bruit même si le signal utile reste constant.

2.4.3 Thermal noise

Le bruit thermique, ou bruit de Johnson-Nyquist, est généré par l'agitation thermique des électrons dans les composants électroniques du récepteur, notamment dans la résistance de charge et l'amplificateur transimpédance. Une approximation courante de sa variance est donnée par :

$$\sigma_{th}^2 = \frac{4kTB}{R_L} \quad (2.11)$$

où

- k est la constante de Boltzmann,
- T la température absolue,
- B la bande passante
- R_L la résistance équivalente du circuit.

Contrairement au shot noise, le bruit thermique ne dépend pas directement de la puissance optique reçue.

La variance totale du bruit peut être exprimée comme :

$$\sigma_n^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{AWGN}^2 \quad (2.12)$$

Cette expression est utilisée dans la section suivante pour calculer le SNR et évaluer les performances du lien Li-Fi.

2.5 Performances théoriques

Après l'établissement du modèle du canal et l'identification des principales sources de bruit, l'évaluation des performances d'un système Li-Fi

indoor repose essentiellement sur l'analyse du rapport signal sur bruit, de la capacité théorique du canal et du taux d'erreur binaire. Ces paramètres permettent de quantifier la qualité et la fiabilité du lien optique [1], [2].

2.5.1 Rapport signal sur bruit (SNR)

Dans un système basé sur l'IM/DD, le signal électrique utile au niveau du récepteur est proportionnel au courant photo-généré, tandis que le bruit total est caractérisé par la variance σ_n^2 . Le SNR électrique peut alors s'écrire :

$$\text{SNR} = \frac{I_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{(R P_r)^2}{\sigma_n^2} \quad (2.13)$$

Cette expression montre que le SNR dépend de la puissance optique reçue, donc de la distance et des angles, mais aussi de la bande passante, des paramètres électroniques du récepteur et du niveau de lumière ambiante. Une diminution de la distance ou une meilleure orientation augmente P_r et améliore le SNR.

2.5.2 Capacité du canal

La capacité théorique maximale d'un canal bruité peut être estimée à partir de la formule de Shannon :

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (2.14)$$

où C est la capacité du canal B la bande passante.

Cette relation indique que la capacité augmente logarithmiquement avec le SNR. Elle constitue une limite théorique idéale ; les performances réelles dépendent de la modulation, du codage et de l'implémentation électronique du système.

2.5.3 Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur binaire représente la probabilité qu'un bit soit détecté incorrectement au niveau du récepteur. Pour une modulation OOK en

présence d'un bruit gaussien additif, le BER peut être approximé par :

$$\text{BER}_{\text{OOK}} \approx \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\sqrt{\text{SNR}}}{2} \right) \quad (2.15)$$

Cette expression montre que le BER décroît rapidement lorsque le SNR augmente. Un SNR élevé permet donc d'obtenir une transmission fiable avec une probabilité d'erreur très faible. L'analyse conjointe du SNR, de la capacité et du BER constitue la base de la simulation full-duplex présentée dans la section suivante.

2.6 Simulation MATLAB du système Li-Fi full-duplex Visible/IR

Afin de valider les modèles analytiques développés précédemment, une simulation numérique a été préparée sous MATLAB pour un système Li-Fi full-duplex utilisant une séparation spectrale entre les deux sens de communication. Le nœud A transmet vers le nœud B par lumière visible, tandis que le nœud B transmet simultanément vers le nœud A par infrarouge. Cette approche évite d'utiliser la même bande optique pour les deux directions et simplifie la séparation des signaux au récepteur par filtrage optique.

Le principe simulé est le suivant : chaque direction utilise une modulation OOK, un canal LOS lambertien, une conversion photodiode par responsivité, puis une décision par seuil. Les performances sont évaluées en fonction de la distance à travers le SNR, le BER et la capacité de Shannon. Les paramètres numériques sont normalisés afin de mettre en évidence les tendances physiques du canal ; ils devront être ajustés aux caractéristiques exactes des composants lors de l'implémentation matérielle.

Tab. 2.2 : Architecture spectrale retenue pour la simulation full-duplex

Direction	Bande opt	Long d'onde	Rôle	Intérêt
A → B	Visible	≈ 550 nm	Lien descendant	Débit élevé.
B → A	Infrarouge	≈ 850 nm	Lien montant ou retour	Visible.

Le modèle MATLAB applique le gain DC du canal optique en visibilité directe séparément aux deux directions de transmission. La liaison A→B est étudiée dans la bande visible, tandis que la liaison B→A est étudiée

dans la bande infrarouge. Cette séparation spectrale permet de représenter le fonctionnement full-duplex tout en limitant l'interférence entre les deux sens de communication.

Les différences entre les deux liens sont introduites à travers la puissance optique transmise, la longueur d'onde considérée, la responsivité de la photodiode, l'ordre lambertien de la source et le niveau de bruit ambiant. Les valeurs numériques retenues dans cette simulation sont des valeurs représentatives et normalisées ; elles servent principalement à analyser les tendances du système et devront être ajustées selon les caractéristiques réelles des composants utilisés dans le prototype expérimental.

Tab. 2.3 : Paramètres utilisés dans la simulation

Paramètre	Symbole	Lien visible A→B	Lien IR B→A
Nombre de bits	N_{bits}	10^5	10^5
Puissance optique transmise	P_t	1 W	0,5 W
Longueur d'onde typique	λ	≈ 550 nm	≈ 850 nm
Responsivité de la photodiode	R_λ	0,45 A/W	0,60 A/W
Ordre lambertien	m	1,9	4,8
Surface active de la photodiode	A_{pd}	10^{-4} m ²	10^{-4} m ²
Bande passante	B	1 MHz	1 MHz
Distance étudiée	d	0,5 à 5 m	0,5 à 5 m
Champ de vision	Ψ_c	70°	70°
Bruit ambiant normalisé	σ_{amb}^2	2×10^{-14} A ²	1×10^{-15} A ²
Variance AWGN normalisée	σ_{AWGN}^2	1×10^{-13} A ²	1×10^{-13} A ²

Remarque : les paramètres du tableau ne doivent pas être interprétés comme des mesures expérimentales directes. Ils constituent un scénario de simulation contrôlé, choisi pour comparer le comportement relatif des deux liaisons visible et infrarouge. En particulier, les variances de bruit sont normalisées afin de représenter l'effet des perturbations ambiantes sur le SNR et le BER.

Le code MATLAB complet n'est pas inséré dans le corps du chapitre afin de ne pas alourdir la lecture. Il sera placé en annexe, tandis que le chapitre principal conserve uniquement les paramètres, les figures obtenues

et l'interprétation scientifique des résultats.

2.6.1 Résultats de simulation

Les résultats obtenus montrent la dégradation progressive des performances lorsque la distance augmente. Le tableau suivant présente des valeurs numériques représentatives calculées à partir du modèle retenu. Ces valeurs servent à l'interprétation scientifique et peuvent être remplacées par les résultats exacts obtenus après exécution du script MATLAB sur la machine de travail.

Tableau 2.3 : Résultats numériques représentatifs du lien A→B visible

d (m)	P_r bit 1 (μW)	SNR (dB)	BER approx.	Capacité (Mbit/s)
0.5	184.620	47.60	≈ 0	15.81
1.0	46.155	35.56	≈ 0	11.81
2.0	11.539	23.52	1.51e-26	7.82
3.0	5.128	16.47	1.23e-06	5.50
4.0	2.885	11.47	4.03e-03	3.91
5.0	1.846	7.60	4.50e-02	2.76

Tableau 2.4 : Résultats numériques représentatifs du lien B→A infrarouge

d (m)	P_r bit 1 (μW)	SNR (dB)	BER approx.	Capacité (Mbit/s)
0.5	184.620	50.84	≈ 0	16.89
1.0	46.155	38.80	≈ 0	12.89
2.0	11.539	26.76	7.73e-54	8.89
3.0	5.128	19.72	3.79e-12	6.57
4.0	2.885	14.72	5.88e-05	4.94
5.0	1.846	10.85	6.86e-03	3.72

Ces deux tableaux montrent que les performances restent très bonnes aux courtes distances. À grande distance, le lien visible se dégrade plus rapidement dans ce scénario, principalement à cause du bruit ambiant normalisé plus élevé dans la bande visible. Le lien infrarouge garde une

meilleure marge de SNR, mais reste plus sensible à l'orientation lorsque la source est fortement directive.

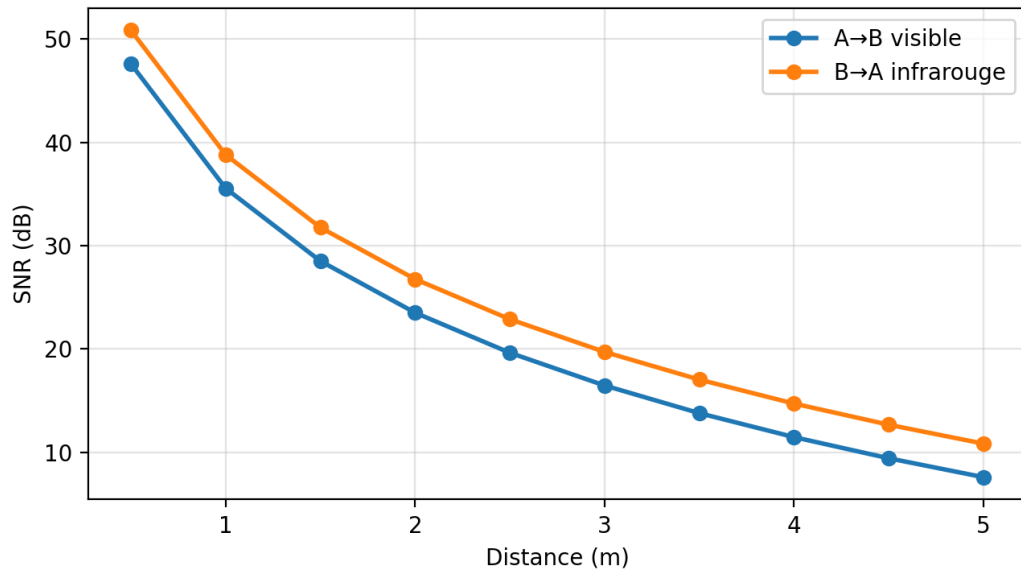


Fig. 2.5 : Évolution du SNR en fonction de la distance pour les deux directions du système full-duplex Visible/IR

La Figure 2.5 montre que le SNR diminue lorsque la distance augmente. Cette décroissance est cohérente avec le modèle LOS, car la puissance optique reçue dépend du terme $1/d^2$. Le lien infrarouge conserve un avantage dans la configuration simulée grâce à une responsivité plus élevée et à une perturbation ambiante visible plus faible.

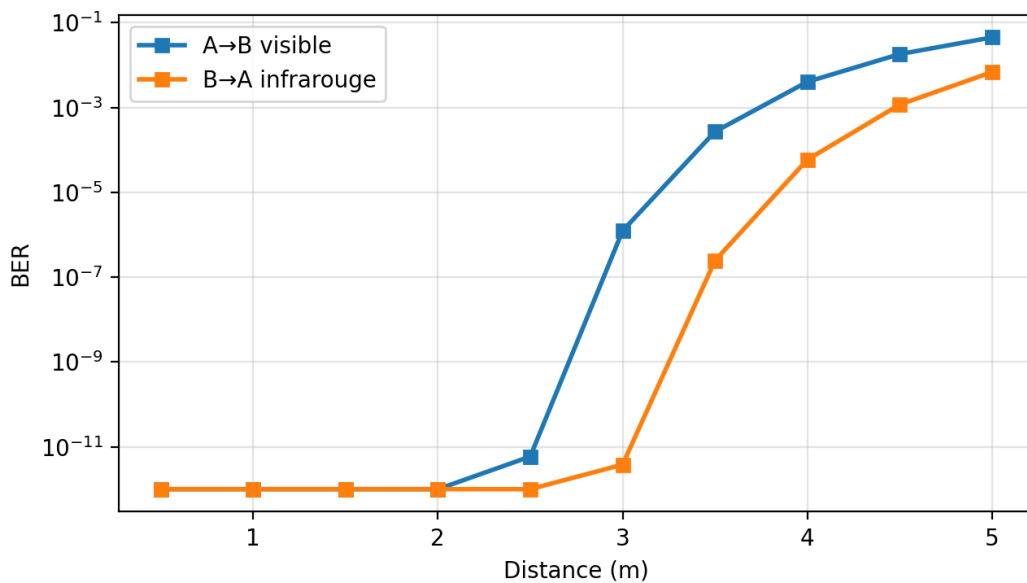


Fig. 2.6 : Taux d'erreur binaire approximatif en fonction de la distance pour les liens visible et infrarouge

La Figure 2.6 confirme la relation directe entre SNR et BER. Aux courtes

distances, les deux liens présentent une probabilité d'erreur très faible. Lorsque la distance augmente, la marge de détection diminue et le BER augmente. Le lien visible est davantage pénalisé par la composante ambiante normalisée, tandis que le lien infrarouge reste plus robuste dans ce scénario.

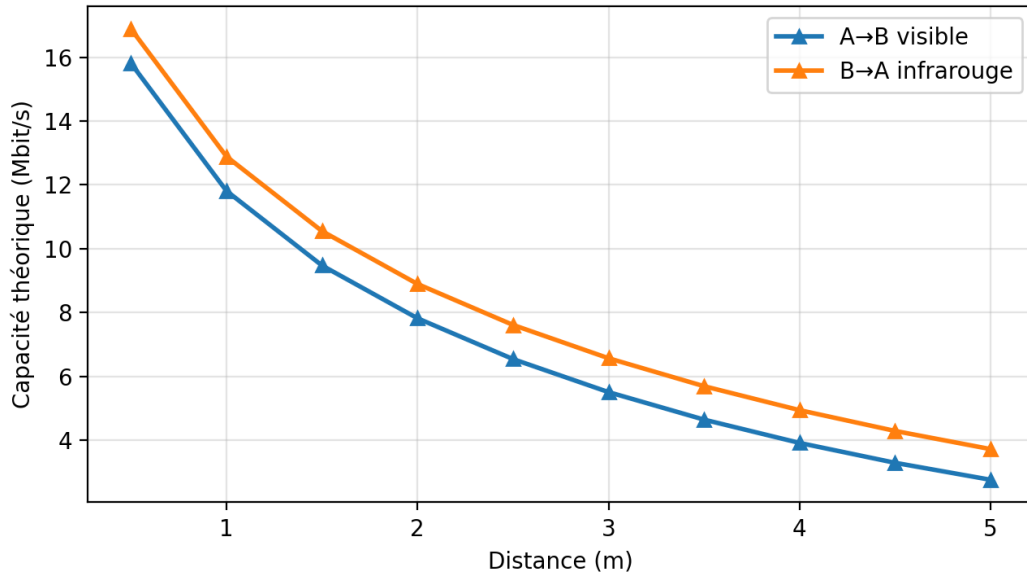


Fig. 2.7 : Capacité théorique de Shannon en fonction de la distance pour les deux directions de transmission

La Figure 2.7 présente la capacité théorique du canal. Comme prévu par la formule de Shannon, la capacité décroît avec le SNR. Cette courbe ne représente pas directement le débit réel du prototype, mais elle fournit une limite supérieure utile pour comparer les deux bandes spectrales.

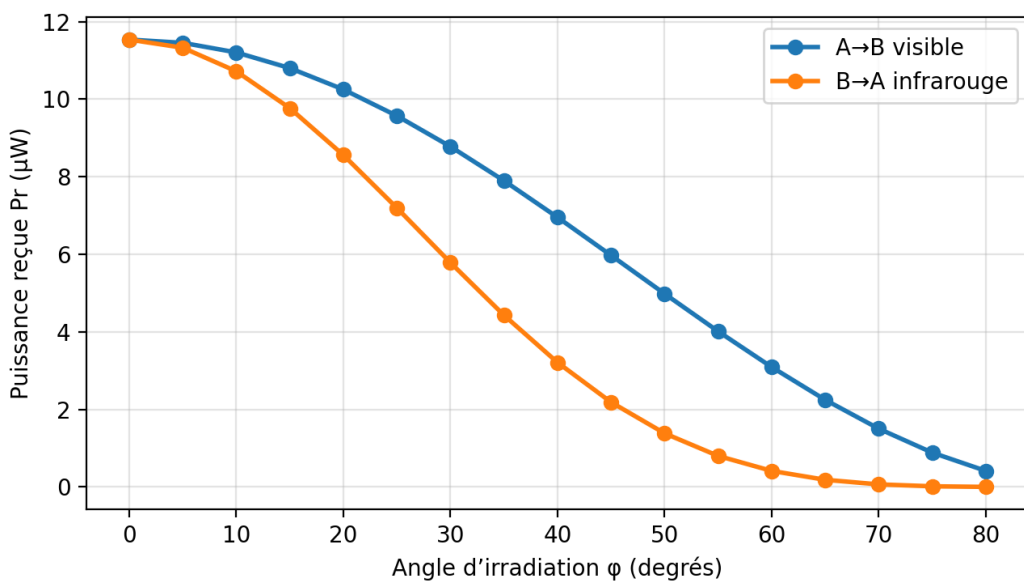


Fig. 2.8 : Influence de l'angle d'irradiation sur la puissance reçue à une distance fixe de 2 m

La Figure 2.8 met en évidence la sensibilité angulaire du canal. Le canal infrarouge, associé à un ordre lambertien plus élevé, devient plus directif : il peut offrir un bon gain lorsque l'alignement est correct, mais sa puissance reçue diminue plus rapidement en cas de désalignement. Ce résultat montre l'importance de l'orientation des émetteurs et des récepteurs dans une architecture full-duplex Visible/IR.

2.6.2 Discussion

Les résultats de simulation confirment que le modèle lambertien permet d'expliquer les tendances fondamentales d'une liaison Li-Fi indoor. La distance reste le facteur de dégradation principal : lorsque d augmente, le gain du canal diminue, la puissance reçue baisse et le SNR se dégrade. Cette baisse se traduit ensuite par une augmentation du BER.

La modification full-duplex Visible/IR apporte une évolution importante par rapport à une simulation OOK unidirectionnelle simple. Dans l'ancien modèle, une seule liaison était étudiée. Dans la version modifiée, les deux sens de communication sont représentés simultanément, chacun avec ses paramètres optiques. Cette approche est plus proche d'une architecture bidirectionnelle pratique, car elle évite de faire circuler les deux flux dans la même bande spectrale.

Le lien visible présente l'avantage d'être compatible avec l'éclairage et peut fournir un débit élevé lorsque la distance reste faible et que l'alignement est correct. En revanche, il est plus exposé à la lumière ambiante visible. Le lien infrarouge est moins perturbé par l'éclairage visible et peut constituer une voie de retour efficace. Toutefois, il peut nécessiter un meilleur alignement si la source IR est plus directive.

Le modèle utilisé reste volontairement simplifié. Les réflexions multiples, le gain réel du concentrateur optique, les caractéristiques exactes des photodiodes, le filtrage spectral et la réponse fréquentielle des LED ne sont pas entièrement pris en compte. Ces éléments devront être considérés dans la conception matérielle et dans la campagne expérimentale. Malgré ces limites, la simulation fournit une base cohérente pour justifier l'architecture full-duplex Visible/IR proposée dans la suite du mémoire.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation du canal optique indoor dans le contexte des systèmes Li-Fi. L'analyse a porté sur la propagation de la lumière en visibilité directe, le modèle lambertien des sources LED, ainsi que l'influence de la distance, des angles et du champ de vision du récepteur.

Sur cette base, un modèle mathématique du canal a été établi afin de relier la puissance optique transmise à la puissance reçue, puis au courant photo-généré par la photodiode. Les principales sources de bruit ont également été présentées : lumière ambiante, shot noise et bruit thermique. Les performances théoriques du lien ont ensuite été évaluées à travers le SNR, la capacité du canal et le BER.

La partie simulation a été modifiée pour intégrer une architecture Li-Fi full-duplex par séparation spectrale Visible/IR. Dans cette configuration, le nœud A transmet vers B en visible, tandis que le nœud B transmet vers A en infrarouge. Les résultats montrent que les deux directions peuvent être évaluées simultanément à l'aide du même modèle de canal, tout en tenant compte de paramètres différents pour chaque bande.

Les principales conclusions du chapitre sont les suivantes :

- le SNR décroît lorsque la distance émetteur-récepteur augmente ;
- l'angle d'incidence et l'orientation des sources influencent fortement la puissance optique reçue ;
- la lumière ambiante augmente le bruit et dégrade les performances, surtout dans la bande visible ;
- la séparation spectrale Visible/IR constitue une solution pertinente pour réaliser une communication bidirectionnelle simultanée ;
- la dégradation du SNR entraîne une augmentation du BER, ce qui impose une conception rigoureuse du récepteur.

Les modèles développés dans ce chapitre constituent le socle théorique de la suite du mémoire. Le chapitre suivant sera consacré à la conception de l'architecture complète du système Li-Fi proposé, incluant l'émetteur visible, le lien retour infrarouge, le récepteur à photodiode, le filtrage et les choix technologiques nécessaires à la réalisation du prototype.

Chapitre 3

Conception du système Li-Fi proposé

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la conception détaillée du système Li-Fi retenu pour l'environnement intérieur étudié. Il s'inscrit dans la continuité du cahier des charges et du modèle de canal présentés dans les chapitres précédents. L'objectif est de traduire les exigences fonctionnelles en une architecture matérielle cohérente, composée d'un émetteur optique, d'un canal de propagation indoor et d'un récepteur capable de détecter, amplifier, filtrer puis reconstruire l'information binaire transmise. [1], [3], [4]

La modification principale apportée dans ce chapitre concerne l'évolution de l'architecture initiale, qui était orientée vers une liaison simple émetteur-récepteur, vers une architecture bidirectionnelle full-duplex. Deux nœuds peuvent ainsi échanger des données simultanément. Pour limiter les interférences entre les deux sens de transmission, la solution proposée repose sur une séparation spectrale : une voie exploite la lumière visible, tandis que l'autre voie exploite l'infrarouge. [1], [2], [4]

Cette conception conserve le principe fondamental des communications Li-Fi, basé sur la modulation de l'intensité lumineuse et la détection directe, tout en préparant une implémentation expérimentale réaliste à base de LED, photodiode, amplificateur transimpédance, filtrage et circuit de décision. [5], [6], [11]

3.2 Cahier des charges technique

Le cahier des charges de ce chapitre vise à fixer, de façon opérationnelle, les objectifs qui guideront la conception de l'émetteur et du récepteur.

Dans le cadre d'une liaison Li-Fi indoor, il ne suffit pas de définir une chaîne fonctionnelle théorique ; il est également nécessaire de préciser les contraintes imposées par l'éclairage, la géométrie de la liaison, la lumière ambiante, la simplicité de réalisation et le niveau de performance visé. [1], [5]

Le système conçu doit rester compatible avec un prototype de laboratoire tout en reflétant les principes d'une liaison optique réaliste. La version modifiée du système impose en plus une exigence de bidirectionnalité simultanée, réalisée à l'aide de deux bandes optiques séparées : visible pour un sens de transmission et infrarouge pour le sens opposé. [2], [4]

3.2.1 Exigences fonctionnelles

La première exigence fonctionnelle consiste à assurer une transmission optique de données entre deux nœuds placés dans un même espace intérieur. Chaque nœud doit intégrer une fonction d'émission et une fonction de réception, afin de permettre une communication bidirectionnelle. Le nœud A transmet vers le nœud B par lumière visible, tandis que le nœud B transmet simultanément vers le nœud A par infrarouge. [1], [4]

La LED visible doit jouer un double rôle : fournir une émission lumineuse exploitable pour la communication et rester compatible avec une fonction d'éclairage non perturbante pour l'utilisateur. La LED infrarouge, quant à elle, assure la voie retour sans produire de lumière visible, ce qui la rend adaptée à une transmission montante discrète dans un prototype indoor. [2], [6]

Du côté réception, la fonction attendue est la conversion de la puissance optique incidente en un signal électrique, suivie d'une amplification adaptée, d'un rejet des perturbations lentes dues à la lumière ambiante et d'une décision binaire finale. Chaque récepteur doit donc intégrer une photodiode, un TIA, un étage de filtrage et un comparateur. [1], [5]

3.2.2 Exigences de performance

Sur le plan des performances, la liaison visée correspond à un scénario indoor de courte portée. La portée pratique peut être fixée entre 0,5 m et 3 m pour la première validation expérimentale, avec une extension possible vers 5 m si la puissance optique, l'alignement et la sensibilité du récepteur sont suffisants. [3], [5]

Le débit cible doit rester compatible avec une implémentation simple par microcontrôleur. Dans une première étape, un débit de l'ordre de quelques kilobits par seconde à quelques centaines de kilobits par seconde est suffisant pour valider le principe de transmission. Une amélioration vers des débits plus élevés peut ensuite être envisagée en optimisant le driver LED, le TIA et le codage utilisé. [1], [6]

Le lien doit conserver un taux d'erreur binaire suffisamment faible pour valider le principe de communication. À ce stade de conception, une exigence pratique de BER inférieur ou égal à 10^{-3} peut être retenue pour les premiers tests expérimentaux. Ce seuil pourra être abaissé lors d'une version plus avancée du système. [1], [5]

Tableau 3.1 : Exigences principales retenues pour la conception

Paramètre	Valeur cible	Observation
Architecture	IM/DD en bande de base	Simplicité de réalisation et cohérence avec la VLC indoor
Mode	Bidirectionnel full-duplex	Deux sens de communication simultanés
Séparation	Visible / infrarouge	Réduction de l'auto-interférence optique
Distance	0,5 à 3 m ; extension possible vers 5 m	Scénario indoor en visibilité directe
Débit	Quelques kb/s à quelques centaines de kb/s	Compatible avec un prototype microcontrôleur
BER visé	$\leq 10^{-3}$	Critère pratique de validation
Modulation	OOK/NRZ avec codage Manchester possible	Choix simple et anti-flicker
Option alternative	PPM	Efficacité énergétique accrue
Récepteur	Photodiode + TIA + filtre + comparateur	Chaîne compatible avec la détection directe
Environnement	Lumière ambiante indoor	Prise en compte du bruit optique

3.2.3 Contraintes électroniques et optiques

La conception doit respecter plusieurs contraintes propres aux communications optiques. La plus importante concerne la positivité du signal optique : la puissance émise par la LED ne peut pas être négative. Le signal transmis doit donc rester compatible avec le principe IM/DD. [1], [6]

$$P_{opt}(t) = P_{DC} + \Delta P m(t) \geq 0 \quad (3.1)$$

où :

- $P_{opt}(t)$ représente la puissance optique instantanée ;
- P_{DC} représente la composante continue liée à l'éclairage ;
- ΔP représente l'amplitude de modulation ;
- $m(t)$ représente le signal d'information normalisé.

Pour le fonctionnement full-duplex, une contrainte supplémentaire apparaît : les deux voies optiques doivent être suffisamment séparées pour éviter qu'un récepteur ne détecte fortement le signal destiné à l'autre voie. Cette condition est assurée par le choix de deux longueurs d'onde différentes. [2], [4]

$$\lambda_V \neq \lambda_{IR} \quad (3.2)$$

En pratique, la voie visible peut utiliser une LED blanche ou une LED visible haute luminosité, tandis que la voie infrarouge peut utiliser une LED IR typique de 850 nm ou 940 nm.

Le système doit également tenir compte des perturbations liées à la lumière ambiante, qu'elle soit naturelle ou issue de luminaires voisins. Cette lumière parasite augmente le courant reçu par la photodiode et peut réduire le rapport signal sur bruit. Le filtrage électrique et, si possible, le filtrage optique deviennent donc indispensables. [1], [3]

3.3 Architecture globale du système

L'architecture retenue repose sur deux nœuds optiques communicants. Chaque nœud contient une partie émettrice et une partie réceptrice. Contrai-

rement à une liaison unidirectionnelle simple, cette structure permet un échange simultané d'informations dans les deux sens. [4]

La transmission $A \rightarrow B$ est réalisée dans le domaine visible, tandis que la transmission $B \rightarrow A$ est réalisée dans le domaine infrarouge. Cette séparation spectrale facilite la conception du prototype, car elle permet d'associer à chaque sens de communication une source et un récepteur adaptés. [1], [2]

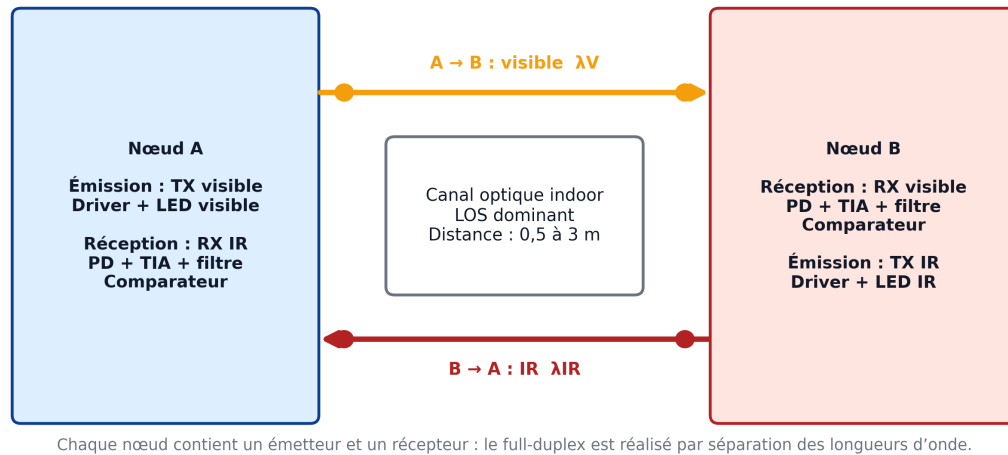


Fig. 3.1 : Architecture globale du système Li-Fi full-duplex visible/IR

3.3.1 Principe du full-duplex visible/IR

Le principe général consiste à faire varier l'intensité lumineuse émise par une LED selon l'information binaire à transmettre. Dans chaque sens de communication, les données numériques commandent un driver LED, qui convertit le signal logique en courant de modulation. La puissance lumineuse modulée traverse ensuite le canal indoor avant d'être convertie en courant électrique par une photodiode. [1], [5]

Pour la voie visible, la chaîne peut être résumée par : données binaires, codage, driver LED visible, LED visible, canal optique visible, photodiode visible, TIA, filtrage, comparateur et données reconstruites.

Pour la voie infrarouge, la chaîne est similaire, mais elle utilise une LED IR et une photodiode sensible à l'infrarouge. Les deux chaînes peuvent fonctionner en parallèle, ce qui permet une communication full-duplex.

3.3.2 Séparation spectrale visible/infrarouge

Dans une architecture bidirectionnelle utilisant la même bande optique dans les deux sens, les signaux peuvent se mélanger au niveau des pho-

totodétecteurs. Cela crée une auto-interférence qui complique la détection, surtout lorsque les deux émetteurs fonctionnent simultanément.

La séparation visible/infrarouge permet de réduire ce problème. Chaque récepteur est choisi ou filtré pour être prioritairement sensible à la bande qui lui correspond. Dans une version plus avancée, des filtres optiques peuvent être ajoutés devant les photodiodes afin de rejeter la bande non désirée. [1], [2]

$$T_V(\lambda_{IR}) \approx 0 \quad ; \quad T_{IR}(\lambda_V) \approx 0 \quad (3.3)$$

Cette relation exprime l'idée que le filtre visible doit rejeter la composante infrarouge et que le filtre infrarouge doit rejeter la composante visible.

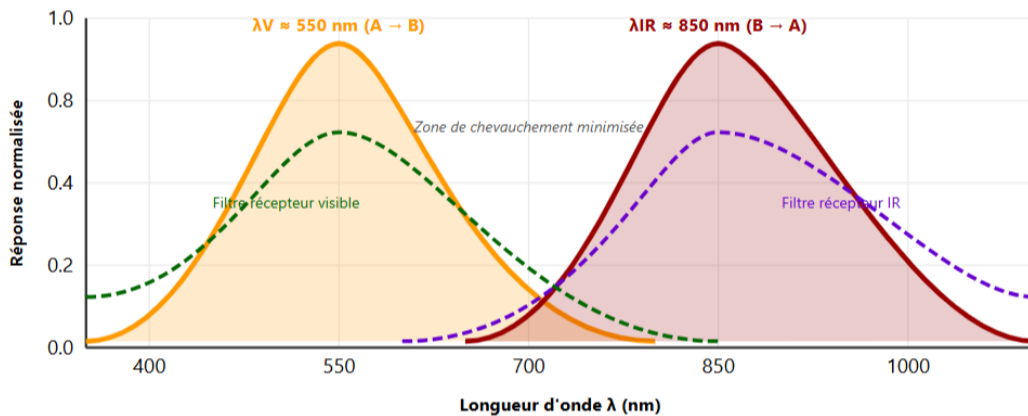


Fig. 3.2 : Principe de séparation spectrale entre la voie visible et la voie infrarouge

3.3.3 Schéma fonctionnel du système

Le schéma fonctionnel de la Figure 3.1 illustre l'organisation globale du système proposé. Il montre les deux voies de transmission simultanées, ainsi que la séparation visible/IR entre les deux sens de communication. Ce synoptique met en évidence la logique générale du système. Chaque nœud possède un émetteur et un récepteur. Le choix de deux longueurs d'onde différentes rend la séparation des flux plus simple qu'une solution full-duplex utilisant une seule bande optique.

3.3.4 Description des deux nœuds optiques

Le bloc émetteur regroupe la source lumineuse, l'étage de puissance et le générateur de signal. Son rôle est d'assurer une modulation efficace de la LED, sans excès de courant et sans déformation excessive du signal numérique.

Le canal optique représente l'espace de propagation entre la source lumineuse et le photodétecteur. Il est influencé par la distance, l'orientation, les réflexions et la lumière ambiante, comme établi au chapitre précédent. [1], [5]

Le bloc récepteur est constitué d'une photodiode, d'un amplificateur transimpédance, d'un étage de filtrage et d'un comparateur à seuil. Il est conçu pour extraire le signal utile malgré la présence de bruit optique et électronique.

3.4 Conception de l'émetteur optique

La conception de l'émetteur constitue le premier maillon matériel de la chaîne Li-Fi. Elle doit répondre simultanément à des exigences optiques, électriques et numériques : produire un flux lumineux modulé, garantir la sécurité de la LED, maintenir une vitesse de commutation suffisante et rester simple à réaliser.

3.4.1 Choix de la LED visible

Pour la voie visible, la source lumineuse retenue est une LED blanche ou une LED visible de forte luminosité. Ce choix reste cohérent avec le contexte des communications VLC/Li-Fi indoor, car les LED blanches sont déjà utilisées dans les infrastructures d'éclairage. [4], [5]

Pour la voie retour, une LED infrarouge est retenue. Elle permet de transmettre des données sans produire de lumière visible et constitue une solution simple pour séparer spectralement la transmission montante de la transmission descendante. [2]

La relation entre le courant traversant la LED et la puissance optique émise peut être approximée, dans une zone de fonctionnement linéaire, par l'expression suivante :

$$P_{opt}(t) = \eta_{eo} I_{LED}(t) \quad (3.4)$$

où :

- $P_{opt}(t)$ représente la puissance optique émise ;
- η_{eo} représente l'efficacité de conversion électro-optique ;
- $I_{LED}(t)$ représente le courant traversant la LED.

Le courant de commande doit rester dans la plage admissible du composant. Il peut être décomposé en une composante de polarisation et une composante modulée :

$$I_{LED}(t) = I_{bias} + i_m(t), \quad 0 < I_{LED}(t) \leq I_{max} \quad (3.5)$$

Le choix de la LED doit tenir compte de plusieurs paramètres : tension directe, courant nominal, angle à mi-puissance, temps de réponse, puissance lumineuse utile et longueur d'onde. Dans le prototype initial, le critère principal reste la stabilité de fonctionnement et la simplicité d'intégration.

3.4.2 Choix de la LED infrarouge

Dans l'architecture full-duplex visible/infrarouge proposée, la LED infrarouge est utilisée pour assurer la voie de retour entre le nœud B et le nœud A. Son rôle est de convertir le signal électrique binaire fourni par le circuit de commande en une puissance optique modulée dans le domaine infrarouge. Ce choix permet de séparer spectralement les deux sens de transmission : la liaison principale utilise la lumière visible, tandis que la liaison retour exploite une longueur d'onde infrarouge. Cette séparation limite le mélange entre les signaux optiques et facilite la détection au niveau des récepteurs [1], [2], [4].

Le choix d'une LED infrarouge est également justifié par le fait que ce rayonnement n'est pas visible pour l'utilisateur. Il peut donc être utilisé pour une voie montante discrète, sans modifier l'éclairage de la pièce. Dans un prototype indoor simple, les longueurs d'onde usuelles se situent autour de 850 nm ou 940 nm. Une LED autour de 850 nm peut offrir une bonne compatibilité avec certaines photodiodes au silicium, tandis

qu'une LED autour de 940 nm présente l'avantage d'être largement disponible et pratiquement invisible dans les applications courantes de télécommande optique. Le choix final doit rester cohérent avec la sensibilité spectrale de la photodiode utilisée et avec le filtrage optique éventuellement ajouté devant le récepteur [2], [6].

Pour ce travail, le choix retenu est donc une LED infrarouge de type standard, centrée autour de 850 nm ou 940 nm, commandée par un driver à transistor ou MOSFET. Cette solution est suffisante pour valider le principe d'une liaison Li-Fi bidirectionnelle à courte portée, avec une modulation simple de type OOK/NRZ. Le courant de la LED doit être limité par une résistance série ou par un étage de commande adapté afin de respecter le courant maximal admissible du composant et d'éviter tout échauffement excessif.

Les critères principaux de sélection de la LED infrarouge sont résumés dans le tableau suivant. Ils concernent à la fois la compatibilité optique avec le récepteur, la simplicité de commande électronique et la sécurité d'utilisation.

Tableau 3.2 : Critères de choix de la LED infrarouge

Critère	Choix recommandé	Justification
Longueur d'onde	850 nm ou 940 nm	Séparation spectrale par rapport à la voie visible et compatibilité avec les photodiodes au silicium.
Puissance optique	Modérée et adaptée au prototype	Validation expérimentale sur courte portée sans risque de saturation du récepteur.
Angle d'émission	Moyen à assez directif	Compromis entre alignement, portée et concentration de la puissance optique.
Temps de réponse	Compatible avec OOK/NRZ	Permet la commutation rapide nécessaire à la transmission binaire.

Commande électrique	Driver MOSFET ou transistor	Protection de la sortie logique et contrôle du courant LED.
Sécurité	Puissance limitée	Le rayonnement IR étant invisible, la puissance doit rester dans une plage sûre pour l'utilisateur.

Ainsi, l'utilisation d'une LED infrarouge dans la voie $B \rightarrow A$ constitue une solution simple et cohérente avec l'objectif du projet. Elle permet de réaliser une communication bidirectionnelle simultanée sans utiliser deux canaux visibles identiques, tout en conservant une architecture électronique facile à implémenter dans un prototype de laboratoire.

3.4.3 Conception du circuit driver

La LED ne doit pas être pilotée directement par la broche logique du microcontrôleur lorsque le courant nécessaire dépasse les limites admissibles. Le circuit driver assure l'adaptation entre le signal numérique de commande et le courant nécessaire à la LED.

Le driver doit satisfaire trois exigences : fournir un courant suffisant, limiter le courant maximal pour protéger la LED et préserver des fronts de commutation suffisamment rapides pour éviter une déformation excessive de la modulation.

Une solution simple consiste à utiliser un transistor BJT ou un MOSFET logique en commutation. La résistance série de la LED peut être dimensionnée par :

$$R_{LED} = \frac{V_{CC} - V_F - V_{DS}}{I_{LED}} \quad (3.6)$$

où :

- R_{LED} représente la résistance série de protection ;
- V_{CC} représente la tension d'alimentation ;
- V_F représente la tension directe de la LED ;

- VDS représente la chute de tension dans le transistor ou le MOS-FET;
- ILED représente le courant souhaité dans la LED.

La mise en œuvre pratique du driver peut être complétée par une résistance de grille ou de base, un découplage correct de l'alimentation et une protection contre les inversions de polarité. Ces précautions améliorent la stabilité du prototype.

3.4.4 Génération du signal OOK/NRZ :

Le bloc de génération du signal fournit la séquence binaire à transmettre et l'adapte au schéma de modulation choisi. Pour une première réalisation expérimentale, la modulation OOK reste la solution la plus adaptée, car elle est simple à produire et à détecter. [6], [11]

$$s(t) = \begin{cases} P_{\max}, & \text{si le bit transmis est } 1 \\ 0, & \text{si le bit transmis est } 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Le codage Manchester peut être ajouté afin d'introduire des transitions régulières. Il contribue à réduire les longues suites de niveaux constants, facilite la synchronisation et limite le risque de scintillement perceptible. [6]

$$1 \rightarrow 10 \quad ; \quad 0 \rightarrow 01 \quad (3.8)$$

La PPM peut être mentionnée comme variante énergétique intéressante, notamment lorsque l'objectif est de réduire la puissance moyenne émise pour une même information transmise. Elle impose cependant une synchronisation temporelle plus stricte. [1], [6]

Tableau 3.3 : Comparaison synthétique des modulations envisagées

Modulation	Complexité	Atout principal	Limite principale
OOK/NRZ	Faible	Implémentation très simple	Sensibilité aux longues suites de bits

OOK + Manchester	Faible à moyenne	Anti-flicker, transitions régulières	Débit utile réduit par le codage
PPM	Moyenne	Bonne efficacité énergétique	Synchronisation plus délicate
OFDM optique	Élevée	Efficacité spectrale élevée	Complexité importante pour un prototype simple

3.4.5 Structure du datagramme transmis

Pour organiser l'échange de données entre les deux nœuds, le message envoyé par la liaison optique est encapsulé dans un datagramme simple. Cette structure facilite la synchronisation, l'identification du sens de transmission et la vérification élémentaire de l'intégrité des données reçues. Elle reste volontairement légère afin d'être compatible avec une implémentation sur microcontrôleur et avec une modulation OOK/NRZ.

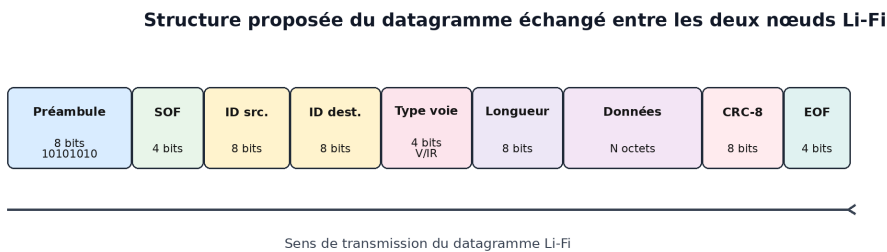


Fig. 3.3 : Structure proposée du datagramme Li-Fi utilisé pour l'échange entre les deux nœuds

Le préambule est constitué d'une alternance de bits, par exemple 10101010, afin de produire des transitions régulières au début de la transmission. Il permet au récepteur de détecter l'arrivée d'une trame et de stabiliser son seuil de décision. Le champ SOF indique le début effectif du datagramme utile. Les champs d'identification précisent le nœud émetteur et le nœud destinataire. Le champ de type permet de distinguer la voie utilisée, visible ou infrarouge, ce qui est utile dans une architecture full-duplex. Le champ longueur précise le nombre d'octets de données utiles. Enfin, le CRC permet de vérifier si le datagramme reçu est cohérent avant de le valider.

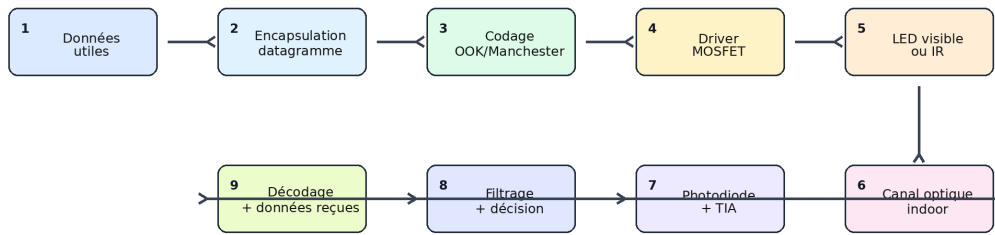
Tableau 3.4 : Rôle des champs du datagramme proposé

Champ	Taille indicative	Fonction
Préambule	8 bits	Facilite la détection du signal et la synchronisation du récepteur.
SOF	4 bits	Marque le début réel du datagramme utile.
Adresse source	8 bits	Identifie le nœud qui émet le message.
Adresse destination	8 bits	Identifie le nœud qui doit recevoir le message.
Type de voie	4 bits	Indique si le datagramme circule sur la voie visible ou sur la voie infrarouge.
Longueur	8 bits	Donne la taille du champ de données utiles.
Données utiles	N octets	Contient l'information transmise.
CRC	8 bits	Permet une détection simple des erreurs de transmission.
EOF	4 bits	Signale la fin du datagramme.

3.4.6 Suite de fonctionnement émission-réception

Le fonctionnement complet de la chaîne peut être décrit comme une suite d'opérations. Le microcontrôleur prépare d'abord les données utiles, les encapsule dans le datagramme, puis applique le codage choisi. Le signal logique obtenu commande ensuite le driver de LED. Lorsque le bit transmis vaut 1, le MOSFET conduit et la LED émet une puissance optique plus élevée. Lorsque le bit vaut 0, le courant de LED diminue ou s'annule selon le point de polarisation choisi.

Suite de fonctionnement d'une liaison Li-Fi full-duplex visible/IR



La même logique est appliquée simultanément dans l'autre sens : A→B en visible et B→A en infrarouge.

Fig. 3.4 : Suite de fonctionnement de la chaîne Li-Fi depuis le datagramme jusqu'aux données reçues

Après propagation dans le canal optique indoor, la photodiode transforme la variation de lumière en un courant électrique. Ce courant est ensuite converti en tension par l'amplificateur transimpédance. Le signal est filtré pour réduire le bruit et les composantes parasites, puis comparé à un seuil de décision afin de reconstruire les niveaux logiques. Le microcontrôleur récepteur détecte le préambule, repère le SOF, lit les champs du datagramme, vérifie le CRC et extrait finalement les données utiles.

Dans le cas full-duplex, cette suite de fonctionnement est réalisée dans les deux sens en parallèle. Le nœud A transmet vers le nœud B par la LED visible, tandis que le nœud B transmet vers le nœud A par la LED infrarouge. La séparation visible/IR limite le couplage entre les deux liaisons et permet à chaque récepteur de traiter prioritairement la bande optique qui lui est destinée.

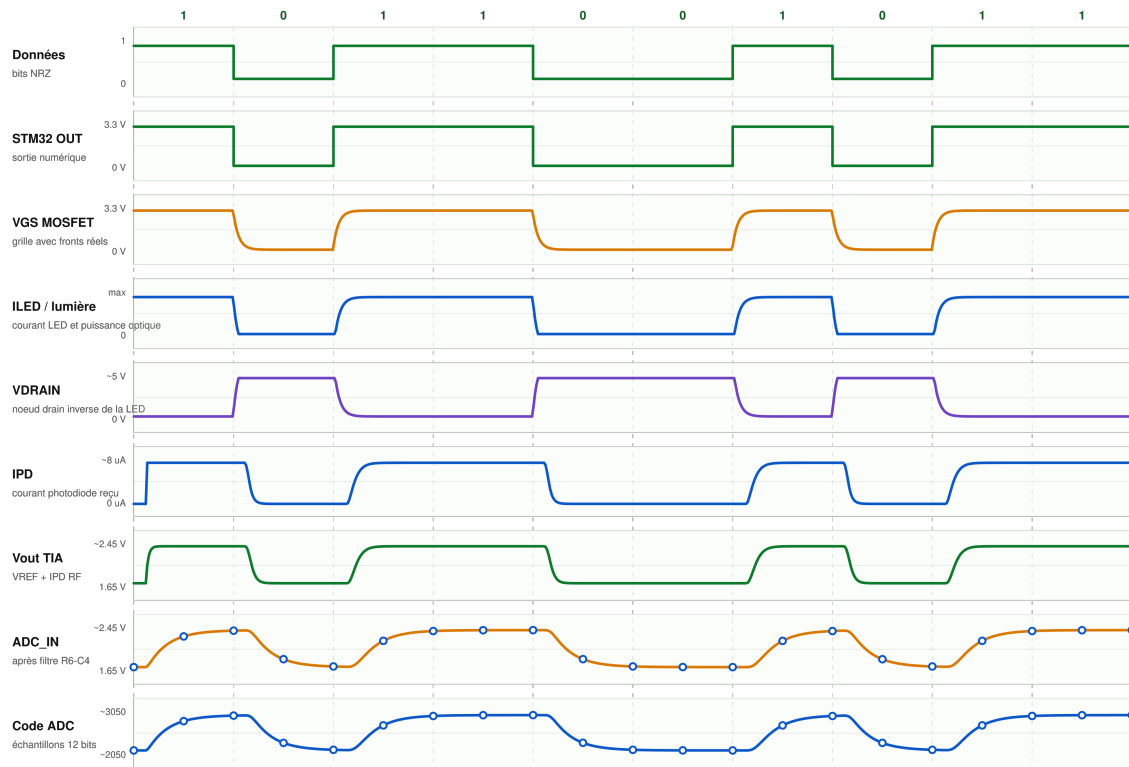


Fig. 3.5 : Chronogrammes qualitatifs de la chaîne Li-Fi : sortie STM32, commande MOSFET, courant LED, lumière modulée, courant photodiode, sortie TIA, filtrage et échantillonnage

Ces chronogrammes montrent la continuité entre le signal numérique et le signal optique. La sortie du STM32 impose l'état logique, le MOSFET traduit cet état en courant de LED, la lumière transportée par le canal est reçue par la photodiode, puis la chaîne TIA-filtre-comparateur reconstitue un signal exploitable par l'entrée numérique ou analogique du microcontrôleur.

3.4.7 Schéma final de l'émetteur :

Le schéma final de l'émetteur peut être décrit comme l'association de trois sous-ensembles : un générateur numérique, un driver de puissance et une source optique. Dans la voie visible, la source est une LED visible ; dans la voie infrarouge, la source est une LED IR.

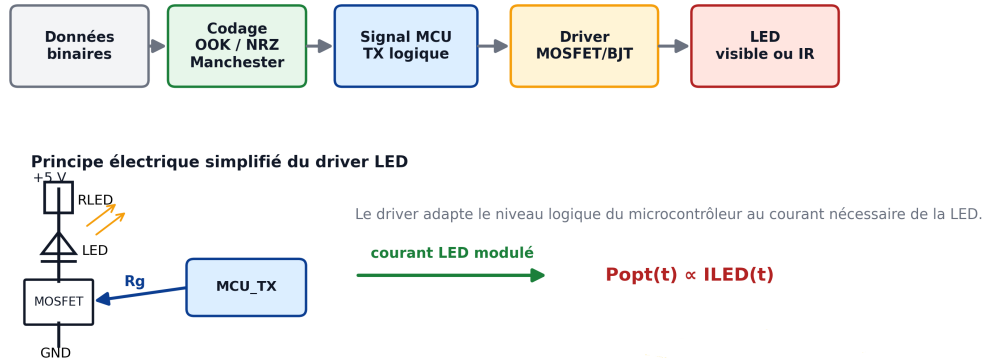


Fig. 3.6 : Chaîne d'émission optique basée sur une modulation OOK/NRZ et un driver LED

Source : réalisé par l'auteur, adapté de [1], [3] et [4].

Fonctionnellement, la chaîne émetteur retenue peut être résumée comme suit :

source binaire → codage Manchester optionnel → étage de commande à transistor/MOSFET → LED visible ou infrarouge.

Cette structure reste simple, modulaire et compatible avec une réalisation sur breadboard ou PCB.

3.5 Conception du récepteur optique :

Le récepteur optique assure l'opération inverse de l'émetteur : il transforme une variation de puissance lumineuse reçue en un signal électrique interprétable. Cette fonction est délicate, car le courant fourni par une photodiode est généralement faible et sensible au bruit. [1], [3]

3.5.1 Choix de la photodiode :

Pour une liaison Li-Fi indoor de courte portée, la solution la plus réaliste consiste à retenir une photodiode silicium de type PIN. Elle présente une bonne rapidité de réponse, une structure relativement simple et une sensibilité adaptée aux longueurs d'onde visibles et proches infrarouges selon le modèle choisi. [1]

La photodiode convertit la puissance optique reçue en courant électrique selon :

$$I_{ph}(t) = R_{\lambda} P_r(t) + I_{dark} \quad (3.9)$$

où :

- $I_{ph}(t)$ représente le courant photo-généré ;
- R_λ représente la responsivité de la photodiode ;
- $P_r(t)$ représente la puissance optique reçue ;
- I_{dark} représente le courant d'obscurité.

Dans le système full-duplex proposé, il est préférable de distinguer deux voies de réception : une photodiode ou un ensemble optique adapté à la voie visible, et une photodiode ou un filtre adapté à la voie infrarouge. Cette distinction améliore la sélectivité du récepteur.

3.5.2 Conception de l'amplificateur transimpédance (TIA) :

Le courant délivré par la photodiode doit être converti en tension afin d'être traité par les étages suivants. Cette conversion est réalisée par un amplificateur transimpédance. Dans sa forme simplifiée, la tension de sortie du TIA est donnée par :

$$V_{TIA}(t) = -R_f I_{ph}(t) \quad (3.10)$$

La résistance de rétroaction R_f fixe le gain transimpédance. Une valeur élevée augmente l'amplitude du signal en sortie, mais réduit généralement la bande passante et peut augmenter la sensibilité au bruit. Le choix de R_f constitue donc un compromis entre sensibilité et rapidité.

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi R_f C_T} \quad (3.11)$$

Dans cette expression, C_T représente la capacité totale vue à l'entrée du TIA, incluant la capacité de la photodiode, la capacité d'entrée de l'amplificateur et les capacités parasites du montage.

3.5.3 Filtrage du signal reçu :

Le filtrage vise à améliorer le rapport signal sur bruit avant la décision logique. La lumière ambiante introduit une composante continue ou lentement variable qui peut saturer ou déplacer le niveau moyen du signal reçu. Un filtrage passe-haut permet de réduire cette composante.

$$f_{HP} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.12)$$

Un filtre passe-bas peut également être ajouté afin de limiter le bruit haute fréquence. Dans le cas du full-duplex visible/IR, le filtrage optique est aussi important que le filtrage électrique. Il permet de sélectionner la bande utile et de rejeter la voie opposée.

3.5.4 Circuit de décision :

Après amplification et filtrage, le signal analogique doit être transformé en niveaux logiques. Le comparateur compare la tension reçue à un seuil de décision. Si la tension est supérieure au seuil, le bit détecté est 1 ; sinon, il est 0.

$$V_{th} = \frac{V_H + V_L}{2} \quad (3.13)$$

Lorsque la lumière ambiante varie, un seuil fixe peut devenir insuffisant. Une version plus robuste peut utiliser un seuil adaptatif basé sur la composante moyenne du signal.

$$V_{th}(t) = V_{DC}(t) + \alpha \Delta V(t) \quad (3.14)$$

Dans un prototype initial, un comparateur simple tel qu'un LM393 ou un trigger de Schmitt peut être utilisé. Une amélioration ultérieure consisterait à estimer automatiquement le seuil à l'aide d'un microcontrôleur ou d'un étage analogique adapté.

3.5.5 Schémas électroniques TX/RX connectés au STM32

Pour rendre l'architecture plus directement exploitable dans un projet PCB, les deux circuits suivants détaillent la connexion entre la carte STM32 et les blocs optoélectroniques. Le circuit d'émission utilise une sortie numérique ou PWM du STM32 pour commander un MOSFET logique. Ce MOSFET commute le courant de la LED visible ou infrarouge, tandis que la résistance série limite le courant optique émis. Cette solution évite de faire circuler le courant de la LED dans la broche du microcontrôleur.

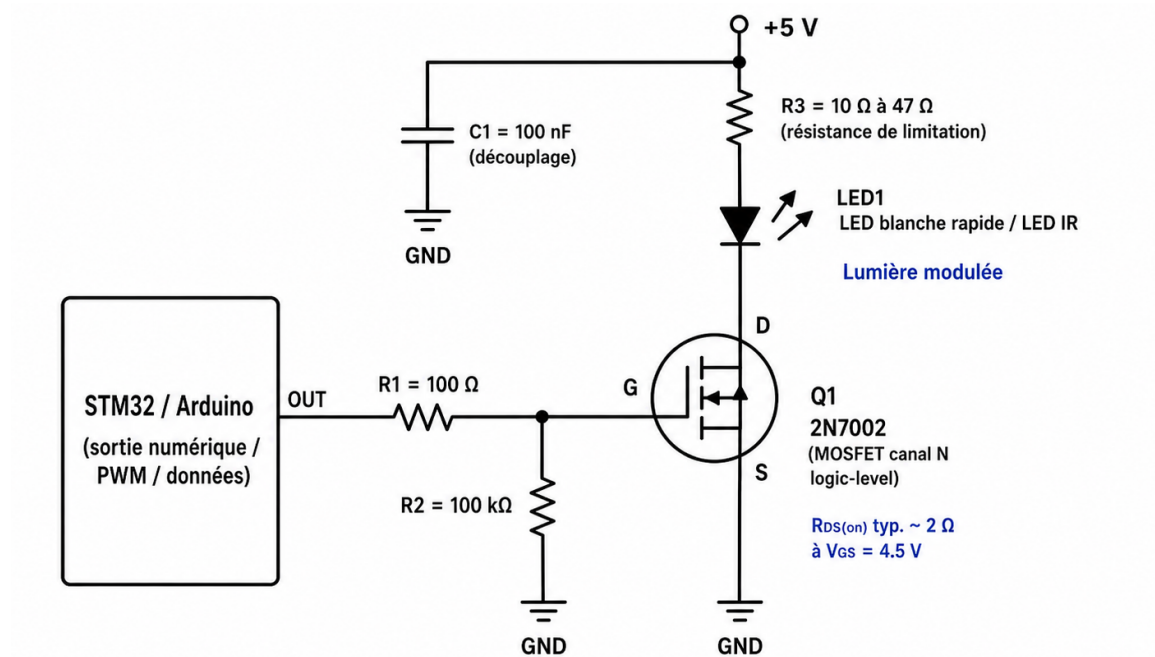


Fig. 3.7 : Circuit Li-Fi TX connecté au STM32 : sortie numérique/PWM, MOSFET logique et LED visible ou infrarouge modulée

Le circuit de réception adopte une chaîne plus professionnelle qu'une simple LDR. La photodiode rapide est polarisée en mode photoconducteur et son courant est converti en tension par un amplificateur transimpédance. Le condensateur de rétroaction stabilise le TIA, puis un filtre RC limite le bruit haute fréquence avant l'entrée ADC du STM32. Cette organisation correspond à la chaîne usuelle photodiode - TIA - filtrage - ADC recommandée pour les récepteurs optiques rapides [1-3].

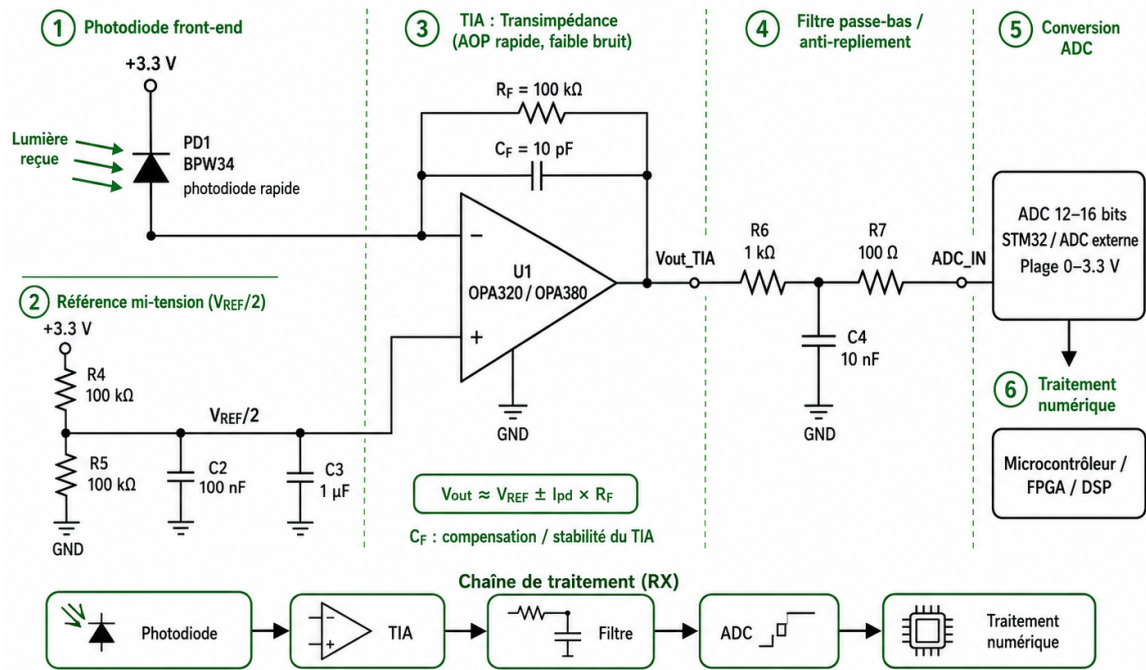


Fig. 3.8 : Circuit Li-Fi RX connecté au STM32 : photodiode BPW34, TIA à AOP rapide, filtre anti-repliement et entrée ADC

Ces deux schémas séparent clairement la partie numérique, la puissance LED et la partie analogique sensible. Sur PCB, le récepteur doit être routé avec plus de précaution que l'émetteur : la photodiode, l'entrée inverseuse de l'AOP, R_F et C_F doivent occuper une zone compacte et protégée des pistes PWM et des courants impulsionnels de la LED.

3.6 Réalisation expérimentale du prototype

La première réalisation pratique du système a été effectuée sur plaque d'essai afin de valider progressivement les blocs de la chaîne Li-Fi avant une éventuelle intégration sur PCB. Cette approche permet de modifier rapidement les résistances, les connexions de LED, les entrées de réception et les points de mesure sans devoir refaire toute la carte.

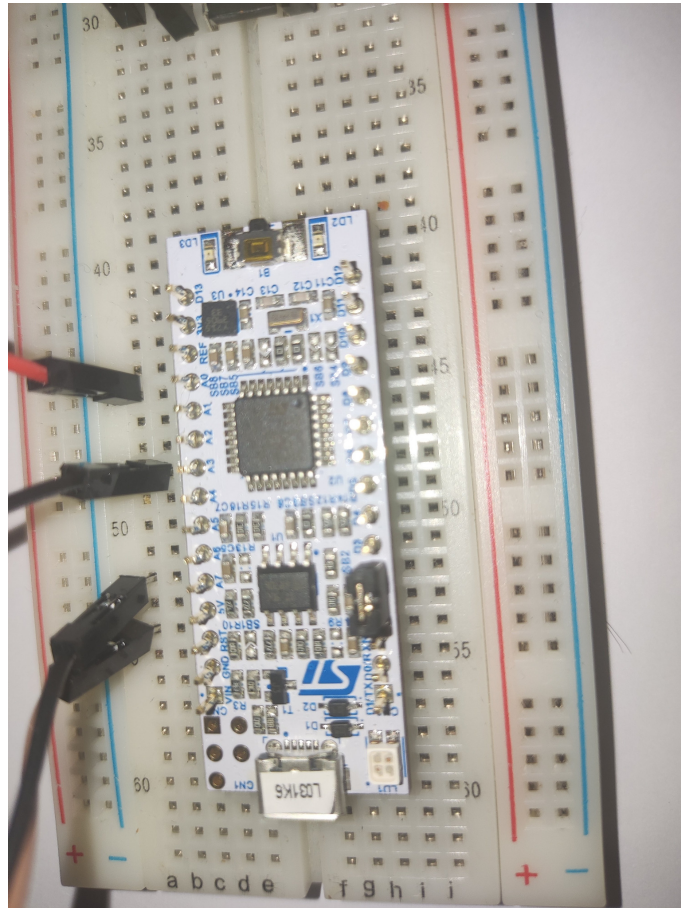


Fig. 3.9 : Implantation de la carte STM32 Nucleo sur plaque d'essai utilisée pour la génération et l'acquisition des signaux

La carte STM32 Nucleo assure la génération des signaux numériques de commande et la lecture des signaux reçus. Les broches numériques sont utilisées pour piloter les étages d'émission, tandis que les entrées analogiques ou numériques peuvent être utilisées pour observer la sortie du filtre, du comparateur ou du récepteur. L'utilisation d'une plaque d'essai facilite les tests de câblage, mais elle impose aussi des précautions : les fils doivent être aussi courts que possible autour de la photodiode et de l'amplificateur, car ces nœuds sont sensibles aux parasites.

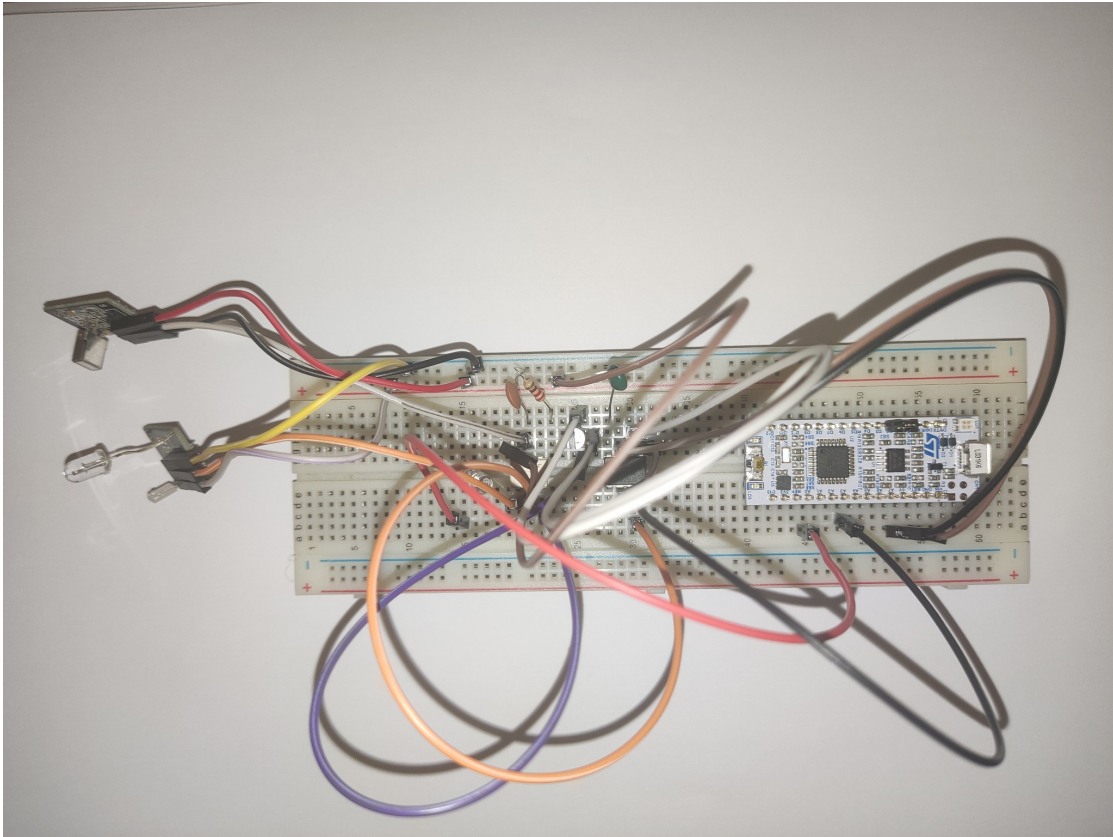


Fig. 3.10 : Vue d'ensemble du prototype Li-Fi réalisé sur breadboard avec carte STM32, LED visible, LED infrarouge et câblage des blocs TX/RX

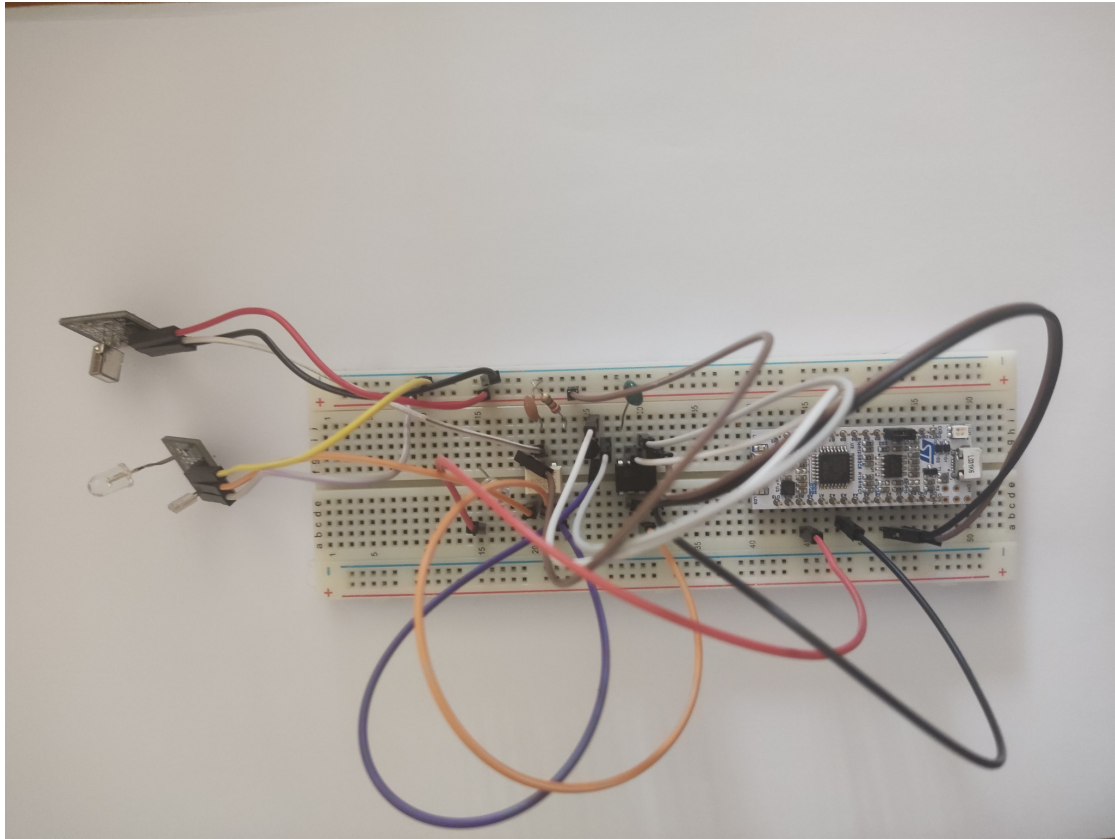


Fig. 3.11 : Deuxième vue du prototype montrant la disposition des sources optiques et des connexions expérimentales

Sur les photos de réalisation, on distingue la carte STM32, les fils de liaison, les résistances de limitation, les composants de filtrage et les sources optiques placées à l'extrémité de la plaque. La LED visible sert à la transmission dans le sens $A \rightarrow B$, alors que la LED infrarouge est réservée à la voie retour $B \rightarrow A$. Cette séparation matérielle correspond directement au principe full-duplex décrit précédemment.

Le fonctionnement expérimental se déroule de la manière suivante :

1. le STM32 prépare le datagramme à envoyer et génère la suite binaire ;
2. la sortie numérique commande le transistor ou le MOSFET du driver LED ;
3. la LED visible ou infrarouge émet une lumière modulée selon les bits ;
4. le récepteur optique capte cette lumière à l'aide de la photodiode ;
5. le courant reçu est converti en tension, filtré puis comparé à un seuil ;

6. le STM32 récupère le signal reconstruit, détecte le préambule et lit les champs du datagramme ;
7. si le CRC est valide, les données utiles sont acceptées ; sinon, le datagramme est rejeté.

Cette validation sur plaque d'essai confirme la faisabilité de la chaîne fonctionnelle, mais elle reste une étape de prototypage. Pour améliorer la portée et la stabilité, une version PCB devra réduire les longueurs de pistes sensibles, séparer les zones émission/réception, ajouter des points de test et assurer un découplage correct de l'alimentation.

3.7 Choix technologiques et dimensionnement :

Les choix technologiques doivent rester compatibles avec les objectifs du mémoire : réaliser un prototype fonctionnel, compréhensible, mesurable et améliorable. Les composants retenus doivent être disponibles, peu coûteux et suffisamment performants pour valider le principe de la communication optique indoor.

3.7.1 Composants principaux

Tableau 3.5 : Synthèse des choix technologiques proposés

Bloc	Choix retenu	Critères principaux	Rôle
Contrôle	Carte de commande externe ou microcontrôleur externe via connecteurs	Disponibilité, simplicité, génération de signaux	Codage, émission, lecture logique
Source visible	LED blanche ou LED visible haute luminosité	Compatibilité éclairage, flux utile	Émission $A \rightarrow B$
Source IR	LED IR 850/940 nm	Séparation spectrale, voie invisible	Émission $B \rightarrow A$

Commande	Driver à transistor/MOSFET	Simplicité, courant commuté, protection	Pilotage électrique des LED
Modulation	OOK/NRZ + Manchester optionnel	Faible complexité, transitions régulières	Transmission binaire anti-flicker
Détection	Photodiode PIN silicium	Réponse rapide, responsivité visible/IR	Conversion lumière-courant
Amplification	TIA à AOP large bande	Gain en tension, adaptation au faible courant	Conversion courant-tension
Filtrage	Passe-haut / passe-bas / filtre optique	Rejet du DC et de la voie non désirée	Amélioration du SNR
Décision	Comparateur à seuil	Restitution logique simple	Reconstruction du signal numérique

3.7.2 Justification des choix

Le choix d'une carte de commande externe ou d'un microcontrôleur externe via connecteurs permet de simplifier la génération des données, le codage et la lecture du signal reconstruit. Cette solution évite de complexifier la carte PCB principale, qui peut rester centrée sur les blocs optoélectroniques : drivers LED, photodiodes, TIA, filtrage, comparateurs, alimentation et points de test.

Le choix d'une LED visible est cohérent avec la logique Li-Fi, car il associe communication et éclairage. L'ajout d'une LED infrarouge constitue la modification principale de cette version : il permet de créer une voie retour séparée, indispensable pour obtenir une architecture full-duplex sans mélange excessif entre les deux sens de transmission.

Le driver à transistor ou MOSFET est retenu car il évite de solliciter directement la sortie du microcontrôleur. Il permet d'obtenir un courant LED plus stable et mieux contrôlé, tout en protégeant les composants.

La photodiode PIN associée à un TIA est préférable à un simple phototransistor lorsque l'objectif est de travailler sur une liaison de communication. Elle offre une meilleure rapidité et une réponse plus adaptée à l'analyse du signal reçu.

Enfin, le filtrage optique et électrique est essentiel dans une architecture visible/IR. Il permet de réduire l'influence de la lumière ambiante et de limiter l'auto-interférence entre les deux voies optiques.

3.7.3 Contraintes PCB et alimentation

La réalisation pratique du système Li-Fi nécessite une attention particulière à l'organisation du PCB et à la distribution de l'alimentation. En effet, le circuit regroupe des blocs de nature différente : des étages d'émission qui commutent le courant des LED, et des étages de réception qui traitent des signaux faibles issus des photodiodes. Une mauvaise implantation peut augmenter le bruit, provoquer des couplages parasites et dégrader la qualité du signal reçu.

Le prototype peut être réalisé sur un seul PCB, mais il est préférable d'organiser la carte en zones fonctionnelles : alimentation, émission visible, réception infrarouge, émission infrarouge, réception visible, connecteurs de commande et points de test. Cette séparation est fonctionnelle et non nécessairement physique. Elle permet de faciliter la lecture du schéma, le routage, les mesures expérimentales et la présentation du prototype lors de la soutenance.

Les parties réceptrices doivent être placées avec soin. La photodiode et l'amplificateur transimpédance doivent être proches l'un de l'autre afin de réduire les pistes sensibles et les capacités parasites. Les pistes reliées à l'entrée du TIA doivent être courtes, éloignées des signaux numériques rapides et des drivers LED. Les sorties des comparateurs, les lignes de commande des MOSFET et les connecteurs numériques doivent être routés de manière à limiter leur influence sur les nœuds analogiques sensibles.

L'alimentation doit fournir une tension stable, par exemple +5 V pour les étages analogiques et les drivers, avec une masse commune pour l'ensemble du système. Des condensateurs de découplage doivent être placés au plus près de chaque circuit intégré. En pratique, un condensateur de 100 nF est ajouté près de chaque AOP ou comparateur, accompagné d'un condensateur de réserve de quelques microfarads sur la ligne d'alimen-

tation. Ces composants réduisent les variations rapides de tension provoquées par la commutation des LED et améliorent la stabilité du montage. Pour les étages analogiques alimentés en simple alimentation, une référence intermédiaire V_{REF} , typiquement autour de 2,5 V pour une alimentation de 5 V, est nécessaire afin de polariser correctement les signaux. Cette référence ne doit pas être obtenue uniquement par un diviseur résistif lorsqu'elle alimente plusieurs blocs sensibles. Une solution plus robuste consiste à utiliser un diviseur de tension suivi d'un suiveur à amplificateur opérationnel, afin d'obtenir une référence $V_{REF_2V5_BUFFERED}$ stable pour le TIA, le filtrage et les seuils de décision.

Enfin, le PCB doit intégrer des résistances de limitation pour les LED, des résistances de pull-up pour les comparateurs à sortie collecteur ouvert, des points de test pour observer les signaux TX, RX, TIA_OUT, FILTER_OUT et COMP_OUT, ainsi que des connecteurs clairement identifiés vers la carte de commande externe. Ces précautions facilitent le diagnostic expérimental et permettent de vérifier séparément chaque bloc du système.

3.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception du système Li-Fi proposé pour un environnement intérieur. La modification essentielle apportée à l'architecture initiale consiste à passer d'une liaison simple émetteur-récepteur vers une architecture bidirectionnelle full-duplex fondée sur une séparation spectrale visible/infrarouge.

Le cahier des charges a permis de fixer les exigences fonctionnelles, les performances visées et les contraintes techniques du système. L'architecture globale a ensuite été décrite en distinguant les deux sens de communication : la voie visible et la voie infrarouge.

La conception de l'émetteur a détaillé le rôle des sources LED, du circuit driver et de la génération du signal. La conception du récepteur a présenté la photodiode, le TIA, le filtrage et le comparateur, en insistant sur la nécessité de rejeter la lumière ambiante et de séparer les deux bandes optiques.

Le chapitre a également précisé la structure du datagramme utilisé pour organiser les échanges entre les deux nœuds. La suite de fonctionnement a été décrite depuis l'encapsulation des données jusqu'à la reconstruc-

tion du signal reçu, avec l'appui de chronogrammes montrant la continuité entre la sortie STM32, la commande du driver, l'émission LED, la réception par photodiode et le traitement analogique.

Enfin, les photos de réalisation ont montré la première implémentation du prototype sur plaque d'essai. Cette étape expérimentale permet de valider le câblage général, la génération des signaux, la commande des sources optiques et les premiers essais de réception avant une intégration plus propre sur PCB.

Les choix technologiques retenus sont volontairement simples, accessibles et évolutifs. Ils permettent de préparer la phase suivante du mémoire, consacrée à l'implémentation matérielle et logicielle du prototype, au câblage des blocs, au codage de la trame et aux premiers tests expérimentaux.

Conclusion générale

Ce mémoire a présenté l'étude et la conception d'un système Li-Fi indoor bidirectionnel reposant sur une architecture full-duplex visible/infrarouge. Le travail a d'abord permis de situer le Li-Fi dans le contexte des communications optiques sans fil et de montrer son intérêt comme technologie complémentaire aux systèmes radiofréquences classiques.

La modélisation du canal optique indoor a ensuite mis en évidence l'importance de la géométrie de propagation, de la directivité des sources, du champ de vision du photodétecteur, du bruit optique et des indicateurs tels que le SNR, le BER et la capacité du canal. Ces éléments constituent une base nécessaire pour dimensionner un système Li-Fi et interpréter ses performances.

La conception proposée repose sur deux liens optiques simultanés : une voie visible pour un sens de transmission et une voie infrarouge pour le sens opposé. Cette séparation spectrale permet de limiter l'auto-interférence et de conserver une structure compatible avec un prototype de laboratoire. Les principaux blocs fonctionnels ont été définis : source LED, circuit driver, canal de propagation, photodiode, amplificateur transimpédance, filtrage et circuit de décision.

Les perspectives naturelles de ce travail concernent la réalisation expérimentale complète du prototype, la mesure du BER en fonction de la distance et de l'angle, l'étude de l'influence de la lumière ambiante, l'amélioration du filtrage, ainsi que l'optimisation du débit par des techniques de codage ou de modulation plus avancées.

Références

- [1] Texas Instruments, “High-speed products for optical wireless communication.” <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SLAAEE8>. Consulté le 16 juin 2026.
- [2] Analog Devices, “Stabilize your transimpedance amplifier.” <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/stabilize-transimpedance-amplifier-circuit-design.html>. Consulté le 16 juin 2026.
- [3] J. Caldwell and T. Instruments, *1 MHz, Single-Supply, Photodiode Amplifier Reference Design*. Texas Instruments, 2014. <https://www.ti.com/lit/pdf/tidu535>, consulté le 16 juin 2026.
- [4] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications : System and Channel Modelling with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2 ed., 2019.
- [5] J. M. Kahn and J. R. Barry, “Wireless infrared communications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [6] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, “Indoor optical wireless communication : Potential and state-of-the-art,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, 2011.
- [7] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, “What is LiFi?,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, 2016.
- [8] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [9] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S.-K. Lim, “IEEE 802.15.7 visible light communication : Modulation schemes and dimming support,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, 2012.
- [10] J. Vučić, C. Kottke, K. Habel, and K.-D. Langer, “803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary,” in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*

- and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, Optica Publishing Group, 2011.
- [11] A. Burton, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari, and S.-K. Liaw, “Experimental demonstration of 50-Mb/s visible light communications using 4×4 MIMO,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 9, pp. 945–948, 2014.
- [12] J. Armstrong, “OFDM for optical communications,” *Journal of Light-wave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 189–204, 2009.
- [13] R. Mesleh, H. Elgala, and H. Haas, “Optical spatial modulation,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 3, pp. 234–244, 2011.
- [14] IEEE, “IEEE standard for local and metropolitan area networks–part 15.7 : Short-range optical wireless communications using visible light.” IEEE Std 802.15.7-2011, 2011.
- [15] H. Haas, “LiFi : Conceptions, misconceptions and opportunities,” in *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*, pp. 680–681, 2016.
- [16] D. Tsonev, S. Sinanović, and H. Haas, “Practical MIMO capacity for indoor optical wireless communication with white LEDs,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, 2013.