HAL
open science

Étude et développement d'un réseau de capteurs synchronisés à l'aide d'un protocole de communication sans fil dédié à l'Internet des objets

Johann Gilbert

▶ **To cite this version:**

Johann Gilbert. Étude et développement d'un réseau de capteurs synchronisés à l'aide d'un protocole de communication sans fil dédié à l'Internet des objets. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Toulon, 2018. Français. NNT : 2018TOUL0012 . tel-02398271v1

HAL Id: tel-02398271

https://theses.hal.science/tel-02398271v1

Submitted on 7 Dec 2019 (v1), last revised 7 Dec 2019 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 548 : Mer et Sciences

Université de Toulon

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'université de Toulon

Spécialité doctorale "Automatique, signal, productique, robotique"

présentée et soutenue publiquement par

Johann Gilbert

le 18 Septembre 2018

Étude et développement d'un réseau de capteurs synchronisés à l'aide d'un protocole de communication sans fil dédié à l'Internet des Objets

Directeur de thèse : **Philippe Courmontagne**
Tuteur industriel : **Lionel Girod**

Jury

M. Ayman Alfalou,	EC HDR, ISEN Brest	Rapporteur
Mme. Caroline Fossati,	EC HDR, Institut Fresnel	Examinateur
M. Philippe Courmontagne,	EC HDR, ISEN Toulon	Directeur de thèse
M. René Garello,	Professeur, IMT Atlantique	Examinateur
M. Lionel Girod,	CEO, Step AT	Invité
M. Claude Jauffret,	Professeur, Université de Toulon	Examinateur
M. Christophe Laot,	Professeur, IMT Atlantique	Rapporteur

Université de Toulon
UFR de Sciences et Technique
Avenue de l'université 83957 La Garde, France

Remerciements

A l'heure où la date de soutenance se dessine, il est important de remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de cette thèse.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse, Philippe Courmontagne, pour m'avoir guidé tout au long de ce travail de recherche. Ses connaissances, sa pédagogie et sa disponibilité ont été appréciées à leur juste valeur et je ne le remercierai jamais assez de m'avoir fait confiance pour réaliser cette étude. Sa rigueur scientifique me suivra pendant de longues années.

J'adresse également mes remerciements à Lionel Girod, mon responsable industriel chez Step AT, pour son implication et son dynamisme pendant la totalité de la thèse. Être intégré dans son équipe était un réel privilège et travailler à ses côtés a été un enrichissement quotidien.

Je remercie également mes collègues de bureau avec qui j'ai partagé ces dernières années. Toutes ces discussions, ces débats, ces moments partagés m'ont permis de grandir personnellement et professionnellement. Sans oublier le plaisir que j'ai eu à travailler à leur coté, je souhaite donc remercier Mathieu, Jonas, Marc, Maxime et Elie.

Il convient également de remercier l'ensemble des personnes qui ont accepté d'évaluer mes travaux.

Mes derniers remerciements, et non des moindres, s'adressent à ma famille et mes amis. La vie n'a pas été un long fleuve tranquille ces dernières années et traverser ces épreuves à leur côté était une véritable chance. Merci à mes parents, Laurence et Jacques. Leur soutien, leur dévouement et leur affection depuis le début ne peuvent s'exprimer en quelques mots. Merci à Richard pour les valeurs qu'il m'a transmises et à Alain qui me pousse chaque jour à repousser mes limites. Merci également à Lucie, pour son soutien sans failles et sa faculté à me supporter en toutes circonstances. Je n'oublie pas non plus mes grands parents pour leur encouragement dans ces études et les bons plats de mémé certains midi. Merci à mes demi-frères Martin, Gabin, Théo et ma demi-sœur Lou. Enfin, merci à mes amis : Manu, Tristan, Jérôme, Maxime M, Olivier, Jean-Clément, Vincent B, Vincent T, Cyrielle, Polo. Ils ont tous eu une part très particulière dans l'aboutissement de ce projet.

Pour finir merci à toutes les autres personnes chères à mes yeux, dont je n'ai pas cité le nom, qui m'ont suivi et encouragé tout au long de ces années.

À ma Famille,

Liste des acronymes

3GPP 3rd Generation Partnership Project.

ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
ADR Adaptative Data Rate, ou *Débit adaptatif*.
AES Advanced Encryption Standard.
AOP Amplificateur opérationnel.
AUV Autonomous Underwater Vehicle, ou *Véhicule sous marin autonome*.

BER Bit Error Rate, ou *Taux d'erreur binaire*.
bps Bits par seconde.

CCD Charge-Coupled Device, ou *Dispositif à transfert de charge*.
CIE Commission Internationale de l'Eclairage.
Cifre Convention Industrielle de Formation par la REcherche.
CIR Crédit d'Impôt Recherche.
CMOS Complementary Metal-Oxyde Semiconductor.
CRC Cyclic Redundancy Check.
CSK Colour Shift Keying.
CSS Chrip Spread Spectrum.

D-BPSK Differential Binary Phase Shift Keying.
DC Composante continue.
DMA Direct Memory Access.
DPI Dots Per Inch, ou *Points par pouce*.
DPPM Diffential Pulse Position Modulation.

E/S Entrées-Sorties.

FIFO First In First Out.
FOV Field Of View, ou *Champ de vision*.
FPGA Field-Programmable Gate Array.
FPS Frames Per Second, ou *Images par secondes*.
FSO Free Space Optics.

Gbps Gigabits par seconde.
GPS Global Positioning System, ou *Géo-positionnement par satellite*.

GSM Global for Mobile communication.

ID IDentifiant.
IdO Internet des Objets.
IHM Interface Homme Machine.
IIoT Industrial Internet Of Things, ou *Internet des Objets Industriels*.
IM/DD Modulation d'Intensité et Détection Directe.
IM2NP Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence.
IoE Internet of Everything.
IoT Internet Of Things, ou *Internet des objets*.
IP Internet Protocol.
IR Infrarouge.
IRM Imagerie par Résonance Magnétique.
ISEN Institut Supérieur de l'Electronique et du Numérique.
ISM Industriel, Scientifique et Médical.

LED Light Emitting Diode, ou *Diode électroluminescente*.
LiFi Light Fidelity.
LOS Line Of Sight, ou *Ligne de vue directe*.
LPWAN Low Power Wide Area Network.
LTE Long Term Evolution.
LTN Low Throughput Network, ou *Réseau bas débit*.

M2M Machine-to-Machine.
MAC Medium Access Control.
Mbps Megabits par seconde.
MCM Multiple carrier Modulation.

NHTSA département de la surveillance de la sécurité des transports.
NI National Instruments.
NRZ Non Return toZero.

OEM ondes électromagnétiques.
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OOK On-Off Keying.
OS Operating System, ou *Système d'exploitation*.
OWC Optical Wireless Communications.

pixel PICture Element.

RF Radio Fréquence.

RGB Red Green Blue.

RMS Root Mean Square, ou *Valeur efficace*.

RPMA Random Phase Multiple Access.

RSSI Received Signal Strength Indication, ou *Indication de la puissance de réception*.

RT Real Time, ou *Temps réel*.

RTC Real Time Clock.

RZ Return to Zero.

S/s Echantillons par seconde.

SCM Single Carrier Modulation.

SF Spreading Factor, ou *Facteur d'étalement*.

SNR Signal to Noise Ratio, ou *Rapport signal sur bruit*.

SSM Spread Spectrum Modulation, ou *Modulation à étalement de spectre*.

Step AT Supervision Test et Pilotage.

TIA Amplificateur de transimpédance.

UHF Ultra Haute Fréquence.

UIT Union Internationale des Télécommunications.

ULP Ultra Low Power, ou *Très basse consommation*.

UNB Ultra Narrow Band.

UV Ultra Violet.

UVB-C Ultra Violet Communications.

VLC Visual Light Communication.

WiFi Wireless Fidelity.

WLAN Wireless Local Area Network.

Table des matières

1 Appréhender la connectivité de demain **21**
1.1 L'internet des objets, la prochaine grande révolution technologique ? 22
1.1.1 Définition . . . 22
1.1.2 Les défis . . . 23
1.2 Objectif de la thèse et besoins industriels . . . 24
1.2.1 Contexte . . . 24
1.2.2 Les enjeux pour l'entreprise . . . 25
1.2.3 Cahier des charges . . . 27
1.3 Réseau émergent de l'IoT : Les LPWAN . . . 28
1.3.1 Présentation de la technologie . . . 28
1.3.2 Les principales technologies LPWA . . . 34
1.3.3 LoRa . . . 36
1.3.3.1 Les spécificités techniques . . . 37
1.3.3.2 Le protocole LoRaWAN . . . 40
1.3.3.3 Application : Passerelle et capteurs . . . 44
1.3.3.4 Les limites . . . 47
1.3.4 Sigfox . . . 48
1.3.4.1 Présentation . . . 48
1.3.4.2 Spécificités techniques . . . 49
1.3.4.3 Les limites . . . 53
1.3.4.4 Expérimentations . . . 53
1.3.5 Les antagonistes . . . 55
1.3.5.1 NB-IoT . . . 56
1.3.5.2 LTE-M . . . 57
1.4 Bilan : Les LPWAN sont-ils en train de changer les communications ? 57

2 Un système de communication non invasif : La lumière **59**
2.1 Les origines . . . 61
2.2 Communiquer par la lumière au 21° siècle . . . 63
2.2.1 Principe de fonctionnement . . . 63
2.2.2 La technologie . . . 63
2.2.2.1 La source lumineuse . . . 64
2.2.2.2 Le photo-récepteur . . . 65
2.3 Intérêt et champs d'application . . . 66
2.3.1 La communication véhicule à véhicule . . . 67
2.3.2 Les communications sous marines . . . 67
2.3.3 Le milieu hospitalier . . . 69
2.3.4 Le Light Fidelity (LiFi) . . . 70
2.4 Les structures des expérimentations . . . 72

2.4.1 Axes de réflexion 72
2.4.2 Notions de codage de l'information 73
2.4.2.1 Les méthodes de codage numérique en bande de base 73
2.4.2.2 La modulation du signal 76
2.4.2.3 La Diffential Pulse Position Modulation (DPPM) appliquée 77
2.4.3 Module d'émission 79
2.4.3.1 Carte électronique 79
2.4.3.2 Logiciel de commande 81
2.4.4 Module de réception 84
2.4.4.1 Carte électronique 84
2.4.4.2 Logiciel de réception 87
2.5 Conclusions expérimentales 88

3 Du binaire au bidimensionnel : La caméra 91
3.1 Bande passante montante accrue 93
3.1.1 La caméra 93
3.1.2 L'image numérique 95
3.1.3 Limite technologique majeure 96
3.2 Traitement appliqué au décodage de l'information 98
3.2.1 Notion de temps réel 98
3.2.2 Détection de source lumineuse 100
3.2.3 Redimensionnement de la zone d'intérêt 103
3.2.4 Conclusion 111
3.3 Détails expérimentaux de la communication montante 111
3.3.1 Optimisation de la détection et de la démodulation DPPM . 112
3.3.1.1 Influence de la précision de la porte 114
3.3.1.2 Influence des seuils de détection 117
3.3.1.3 Amélioration du traitement de la zone d'intérêt . . . 119
3.3.2 Mesure de la distance du module communiquant 121
3.4 Produit et champ d'application 128
3.4.1 Le système global 128
3.4.2 Preuve de concept : dongle LED USB 130

A Annexes 137
A.1 Joindre un réseau LoRaWAN 137
A.2 Réalisation d'un serveur LoRaWAN 137
A.3 Code générant la modulation DPPM 139
A.4 Algorithme démodulant le DPPM 141
A.5 Architecture de détection multi-sources en Actor Framework 142
A.6 Algorithme de traitement de la zone d'intérêt 146

Bibliographie 147

Table des figures

1.1 L'Internet des objets regroupe tous les objets physiques communicants dotés d'une identité numérique unique. © DP, via Pixabay . . 22
1.2 L'explosion de l'Internet Of Things - Source : Cisco [1] 23
1.3 Processus complet de la collecte de données 26
1.4 Cahier des charges : les 2 axes de recherches 28
1.5 Comparatif des technologies communicantes - Source Digital Dimension [2] 30
1.6 Bande 865 - 870 MHz 31
1.7 Panel des principaux réseaux sans fils pour l'IoT [3] 32
1.8 Domaines d'utilisation de LPWAN - Source : Factory System 33
1.9 Les caractéristiques d'un réseau LPWA [3] 34
1.10 Technologies majeures émergentes (LPWAN) 34
1.11 Comparaison des trois standards Weightless 36
1.12 Représentation temporelle d'un chirp 38
1.13 Sensibilités du dispositif LoRa Semtech SX1276 - Source : Semtech . 39
1.14 Relations entre facteur d'étalement et débit [4] 39
1.15 Symboles LoRa [5] 40
1.16 Architecture d'un réseau LoRaWAN [6] 41
1.17 Concentrateur LoRaWAN pour module CompactRIO 45
1.18 Portée d'un capteur LoRa en pratique 46
1.19 Spectre du signal LoRa émis 46
1.20 Backend SigFox 48
1.21 Spectres de signaux des deux principaux LPWAN 49
1.22 Modulation BPSK [7] 50
1.23 Signaux Sigfox et LoRa [8] 51
1.24 Localisation SigFox 52
1.25 Un voyage sous couverture Sigfox 54
1.26 Probabilité de réception en fonction de la vitesse de déplacement . . 55
1.27 Options d'utilisation du spectre pour la technologie NB-IoT 56

2.1 Répartition des bandes dans les OWC 60
2.2 Spectre électromagnétique [9] 60
2.3 Télégraphe optique [10] 62
2.4 Schéma du photophone de Bell [11] 62
2.5 Cheminement d'une donnée 63
2.6 Temps de réponse d'une LED 64
2.7 Loi de Haitz [12] 64
2.8 Comparatif des différents types d'ampoules [13] 65
2.9 Comparatif des différents types de photo-récepteurs [14] 66
2.10 Système d'alerte inter-véhicules [15] 67

2.11 exemples de débits pour les ondes EM sous marines - Extrait de [16] 68
2.12 Diffusion du faisceau laser - Source : Horiba 69
2.13 Fonctionnement du LiFi [17] 70
2.14 Topologie physique des réseaux 73
2.15 Représentation de la donnée suivant différents codages [18] 74
2.16 Spectre des 3 codages principaux et leur bande passante associée [19] 75
2.17 Impact de la distance sur un signal numérique 75
2.18 Principe d'une transmission par IM/DD 76
2.19 Modulations principales pouvant être utilisées pour la VLC [20] . . . 77
2.20 Modulation PPM 78
2.21 Modulation utilisée tirée du DPPM 79
2.22 Architecture d'une sbRIO-9607 80
2.23 Étage électronique d'émission 81
2.24 Étage électronique d'émission 81
2.25 IHM d'émission de données 82
2.26 Montage de base de réception du flux lumineux 84
2.27 Signal reçu lors de la première expérience à un débit de 2 kbps . . . 85
2.28 schéma électronique final pour communication de type VLC avec modulation DPPM 86
2.29 Montage final pour communication de type VLC avec modulation DPPM 87
2.30 Cas possibles lors de la démodulation 88
2.31 Streaming de musique qualité CD en VLC 89
2.32 BER en fonction du couple de paramètre distance, angle 89

3.1 Schéma d'une communication full duplex en VLC 93
3.2 Lumière et photosite [21] 94
3.3 Notion de matrice de Bayer 94
3.4 Impact d'un DPI différent [22] 95
3.5 Notion de FPS [23] 96
3.6 Rendu d'un objet en mouvement avec des FPS différents - Source : CyberLink 97
3.7 Schéma de traitement de l'image reçue 98
3.8 Répartition des couleurs RGB dans la définition de la luminance . . 99
3.9 Correction des couleurs 100
3.10 Zone d'analyse de la source lumineuse 100
3.11 Histogramme de l'image 101
3.12 Source lumineuse soumise à deux environnements 103
3.13 Application du filtre de Sobel 104
3.14 Représentation 2D d'une gaussienne 104
3.15 Sources lumineuses simulées par des gaussiennes 105
3.16 Convolution de l'image simulée et bruitée avec une gaussienne 106
3.17 Superposition de 3 calques puis convolution 106

3.18 Convolution d'une gaussienne avec une image obtenue en condition réelle . . . 107
3.19 Représentation 3D d'une source réelle . . . 107
3.20 Détection de zones mortes . . . 108
3.21 Changement de profondeur de l'image . . . 108
3.22 Source éteinte, volet fermé . . . 109
3.23 Source allumée, volet fermé . . . 109
3.24 Source éteinte, volet ouvert . . . 110
3.25 Source allumée, volet ouvert . . . 110
3.26 Détection de deux informations simultanées . . . 111
3.27 Zone d'intérêt (23x20) après première étape de seuillage . . . 112
3.28 Représentation du motif lors d'une transmission à 20 Hz . . . 114
3.29 Évolution du taux d'erreur en fonction de la valeur de la porte lors d'une communication à 20 Hz . . . 115
3.30 Taux d'erreur en fonction de la moyenne appliquée à la porte . . . 116
3.31 Représentation du motif moyenné sur 16 échantillons lors d'une transmission à 20 Hz . . . 117
3.32 Largeur de motif théorique . . . 117
3.33 Comparaison des seuils en fonction de la fréquence . . . 118
3.34 Code de gestion du seuil . . . 118
3.35 Zone d'intérêt d'une même source observée à différentes distances . . . 120
3.36 Boite de dialogue pour la sélection de la zone d'intérêt . . . 120
3.37 Schéma d'un objet pris en photo par une caméra . . . 122
3.38 Alignement des caméras pour obtenir une image stéréoscopique . . . 123
3.39 Schéma d'un objet pris en photo par deux caméras . . . 123
3.40 Mesure de distance à l'objet en fonction de l'espacement des deux caméras . . . 125
3.41 Mesure de distance à l'objet en fonction de l'espacement des deux caméras . . . 125
3.42 Mesure de distance inter-sources . . . 126
3.43 Mesure de distances par stéréoscopie . . . 127
3.44 Pimoroni unicorn HAT - Matrice LED RGB 8x8 . . . 130
3.45 Vue 3D du driver USB Step AT . . . 131

A.1 Gestion de la modulation PPM . . . 139
A.2 Différentes conditions . . . 140
A.3 Timing de fin de trame . . . 140
A.4 Code pour décodage de l'information . . . 141
A.5 Code principal orienté post-traitement . . . 142
A.6 Gestionnaire de données . . . 143
A.7 Algorithme implémenté pour l'Actor Framework . . . 144
A.8 Gestion du seuil implémentée pour l'Actor Framework . . . 145
A.9 Code de gestion du seuil . . . 146

Liste des tableaux

1.1 Caractéristiques GSM/LPWAN 32
1.2 Spécifications techniques des acteurs majeurs des LPWAN 57

2.1 Comparatif des principales méthodes de communication sous marine 69

3.1 Comparatif des deux principaux capteurs d'image du marché 95
3.2 Comparatif des deux principales méthodes de détection sur image en intérieur 111

Introduction

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse sont le fruit d'un travail commun de l'Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence (IM2NP), de l'Institut Supérieur de l'Electronique et du Numérique (ISEN) Toulon avec Step AT dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (Cifre) de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie. Menée conjointement dans les locaux de l'entreprise Seynoise Step AT et l'ISEN Toulon, cette thèse a pour but de renforcer la branche recherche de Step AT et d'orienter l'entreprise vers des domaines d'innovation actuels tout en s'appuyant sur un savoir faire solide en matière d'acquisition de données.

Durant les 20 dernières années, l'arrivée grandissante de l'Internet Of Things, ou *Internet des objets* (IoT) et l'informatique en nuage a conditionné le besoin de répandre des capteurs absolument partout afin de collecter de la donnée, apporter des informations nouvelles, remplir les bases de données mais aussi de nourrir les algorithmes d'analyses. Afin de satisfaire la demande croissante, de nouveaux types de réseaux sans fil basés principalement dans la bande de fréquence Industriel, Scientifique et Médical (ISM) vont être déployés de façon massive.

Il est donc indispensable pour l'entreprise de se positionner dans la course aux réseaux sans fils destinés à la communication des objets. Certains vont d'ailleurs sortir du lot tandis que d'autres vont mourir progressivement. Une étude approfondie ainsi qu'un choix de réseau en corrélation avec le cœur de métier et les clients historiques de l'entreprise sont donc les priorités. Faire partie des pionniers et être une référence dans le monde des technologies sans fil longue portée et basse consommation est également un objectif de cette phase de recherche.

Cette explosion d'objets communicants à distance amène néanmoins quelques inconnues telles que l'effet des ondes électromagnétiques émises sur les êtres vivants. Bien qu'aucune étude ne prouve cette dangerosité, les interrogations sont bien réelles et sont appréhendées par un large panel de scientifiques [24, 25]. Par exemple, depuis le 9 février 2015, La loi n°2015-136 du 9 février 2015, dite loi "Abeille", relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques [26] prévoit l'interdiction du WiFi dans certains espaces accueillant des enfants de moins de trois ans et impose une coupure de celui-ci dans les écoles primaires lorsqu'il n'est pas utilisé à des fins pédagogiques. De plus, dans certains milieux les ondes électromagnétiques peuvent troubler l'environnement en provoquant des interférences avec les systèmes existants. C'est le cas dans l'aviation ou bien dans les centres d'imagerie médicale.

Dès lors, nous avons orienté nos recherches permettant de répondre aux deux problématiques précédentes, à savoir proposer non seulement une infrastructure réseau IoT basée sur des nouveaux protocoles radios mais aussi une solution de communi-

cation sans fil non invasive.

Cette dernière repose en réalité sur une technologie qui nous est venue à l'idée pour une problématique totalement différente. En effet, de nombreux clients remontent des quantités de données importantes dont la synchronisation est critique. Ils sont alors obligés de passer par des protocoles filaires couteux aussi bien d'un point de vue financier que de temps d'installation. Durant la phase de recherche, nous nous sommes initialement penchés sur les caractéristiques intrinsèques de différentes ondes. Naturellement, il est ressorti que, grâce à leur vitesse de propagation, les ondes lumineuses seraient particulièrement adaptées pour ce genre de pratique. S'il est possible de donner des tops d'acquisition par des flash lumineux, il est alors envisageable de faire clignoter des sources lumineuses rapidement afin de faire transiter de l'information.

Le fait d'employer la lumière pour communiquer permet de transférer de l'information sur des bandes différentes et, de ce fait, diminue grandement les risques pour la santé. Par exemple, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) [1] a établi qu'en se situant à plus de 30 centimètres d'une lampe fluocompacte, le champ électromagnétique émis est inférieur à la valeur limite d'exposition fixée par le Conseil de l'Union Européenne. Enfin, dans le but de prétendre à des débits élevés, il est préférable d'utiliser des LED qui d'après [27] et l'AFE ne représentent pas de risques particuliers dans des conditions normales d'utilisation. ce moyen de communication est donc parfait pour répondre à nos problématiques.

Ainsi, coupler l'aspect non invasif des Visual Light Communication (VLC) avec l'IoT permettrait non seulement de réduire les risques potentiels pour les organismes mais aussi de limiter la saturation des bandes radio.

Cependant, les techniques d'aujourd'hui admettent principalement la diffusion de la lumière depuis des sources vers des récepteurs ou bien alors de faire de la communication point à point. Il n'est alors pas possible d'envisager la création d'un réseau de type étoile puisque les collisions de messages sont inévitables. Afin de les limiter, nous aborderons dans cette thèse un nouveau design de solution où le récepteur n'est plus une simple photodiode mais une caméra.

Plus précisément, la majorité des systèmes actuels n'autorisent pas des transferts simultanés vers un seul et unique récepteur. Seuls certains cas, basés sur des techniques de réglage de longueur d'onde [28] voient des communications concomitantes. Bien qu'elles répondent à certains cas d'usages, ces techniques induisent des problématiques de taille de réseau. En effet, la méthode visant à découper la bande spectrale en une multitude de sous bandes reste limitée par le nombre de canaux réalisables. Le nombre de sources pouvant émettre en parallèle est donc nettement inférieur à celui atteint en remplaçant le système de photodiode de réception par une caméra. Avec cette dernière nous avons pu voir qu'il est possible de récupérer

1. Établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle des Ministères chargés de l'Environnement, de l'Industrie et de la Recherche. L'ADEME participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable

de l'information depuis de nombreux émetteurs tout en en évitant les collisions de paquets depuis un seul et unique récepteur. Tout dépend cependant du type de capteur utilisé et de ses caractéristiques. Certains paramètres tels que la résolution de la caméra, la définition ou encore le champ de vision restent déterminants dans le conditionnement du système.

Architecture du mémoire

Ce mémoire est donc organisé comme suit ; Dans le chapitre 1 nous aborderons dans un premier temps ce qu'est l'IoT ainsi que les différentes problématiques technologiques associées, pour ensuite réaliser une explication du contexte de l'étude à l'aide de la présentation des enjeux et du cahier des charges initial. De plus, une étude des acteurs majeurs des réseaux sans fil longue portée sera réalisée, ainsi que des expériences pour mettre en avant les différents avantages de chaque solution. Nous dresserons enfin le bilan sur ces nouvelles technologies et leurs limites.

Le chapitre 2 apporte des solutions aux principales contraintes induites par les communications sans fil optimisées pour l'Internet des Objets. L'approche basée sur une communication par la lumière réduit les risques sur la santé, soulage certaines bandes de fréquences et réduit considérablement la latence. Nous commencerons donc par un état des lieux et un bref historique de ce type de communication. Le choix d'une technologie provient initialement d'un cas d'usage. La suite de ce chapitre sera donc consacrée à l'intérêt et aux différents champs d'applications. Enfin, une étude complète ainsi qu'un prototype seront mis en place afin de proposer une solution unique de communication par la lumière.

Bien que ce dernier chapitre amène une alternative sérieuse aux communications sans fil nouvelles génération, il ne met pas en avant la possibilité de créer un réseau privé. Ainsi, le chapitre 3 présentera donc une solution permettant de créer un réseau en étoile sans fil en se basant sur la lumière. Nous verrons dans un premier temps pourquoi les caméras sont une solution à cette problématique tout en s'appuyant sur l'étude menée au chapitre précédent en terme de modulation. Après avoir abordé les différentes notions propres à ce type de montage nous pourrons ensuite aborder la mise en place du prototype et des expérimentations. Enfin, nous verrons comment le produit final peut répondre à des exigences industrielles déjà présentes.

Enfin, nous terminerons cette étude par un bilan global de la solution apportée. Nous en extrairons ses forces et ses faiblesses pour isoler les différentes pistes d'évolutions permettant de la rendre plus autonome, plus fiable et plus performante.

Chapitre 1

Appréhender la connectivité de demain

"N'importe quel objet peut être un objet d'art pour peu qu'on l'entoure d'un cadre."

Boris Vian

Sommaire

1.1 L'internet des objets, la prochaine grande révolution technologique ? 22

1.1.1 Définition 22

1.1.2 Les défis 23

1.2 Objectif de la thèse et besoins industriels 24

1.2.1 Contexte 24

1.2.2 Les enjeux pour l'entreprise 25

1.2.3 Cahier des charges 27

1.3 Réseau émergent de l'IoT : Les LPWAN 28

1.3.1 Présentation de la technologie 28

1.3.2 Les principales technologies LPWA 34

1.3.3 LoRa 36

1.3.3.1 Les spécificités techniques 37

1.3.3.2 Le protocole LoRaWAN 40

1.3.3.3 Application : Passerelle et capteurs 44

1.3.3.4 Les limites 47

1.3.4 Sigfox 48

1.3.4.1 Présentation 48

1.3.4.2 Spécificités techniques 49

1.3.4.3 Les limites 53

1.3.4.4 Expérimentations 53

1.3.5 Les antagonistes 55

1.3.5.1 NB-IoT 56

1.3.5.2 LTE-M 57

1.4 Bilan : Les LPWAN sont-ils en train de changer les communications ? 57

1.1 L'internet des objets, la prochaine grande révolution technologique ?

1.1.1 Définition

Selon l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), l'IoT est une "infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en inter-connectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution".

Cette infrastructure, parfois raccourcie en Internet des Objets (IdO), repose avant tout sur la notion d'objet connecté. Chacun d'eux doit être adapté à un usage, avoir une certaine forme d'intelligence et une capacité de recevoir et de transmettre des données avec des logiciels grâce aux capteurs embarqués [29]. La figure 1.1 illustre parfaitement ce concept dans sa forme la plus globale puisque tout objet est en mesure d'envoyer des données pertinentes.

FIGURE 1.1 – L'Internet des objets regroupe tous les objets physiques communicants dotés d'une identité numérique unique. © DP, via Pixabay

D'après [30], les développements des technologies Machine-to-Machine (M2M) pour le contrôle de machines à distance et aussi l'apparition dans les années 2000 de l'Internet Protocol (IP) sur les réseaux mobiles cellulaires ont accéléré l'évolution du M2M vers l'IoT. L'émergence de cet Internet des Objets, qui tend à anéantir les limites entre l'ordinateur et les produits du quotidien, s'explique également à l'aide de deux facteurs majeurs supplémentaires [31] : la banalisation des ressources informatiques et l'adoption des services Web par les utilisateurs.

Tout objet dispose ainsi de trois éléments principaux :

— Les données produites ou reçues, stockées ou transmises,

— Les algorithmes pour traiter ces données,
— L'écosystème, dont fait partie le protocole de communication, dans lequel il va réagir et s'intégrer.

D'après la société Cisco [32], la convergence entre les réseaux des personnes, des processus, des données et des objets, l'IoT va vers l'Internet of Everything (IoE), ou "Internet du Tout connecté". C'est un Internet multidimensionnel qui combine les champs de l'IdO et du Big data [33]. Ce champ Big Data provient ni plus ni moins de l'immense quantité de données à traiter, stocker et analyser. En effet, l'IoT s'impose depuis quelques années comme la tendance inévitable du marché de l'électronique embarqué. Cette croissance, illustrée en figure 1.2 propose de multiples cas d'usages permettant de contrôler et surveiller l'environnent domotique, lire les compteurs électriques et d'eaux, obtenir des détails sur un stock, surveiller des variables physiques et remonter des alertes.

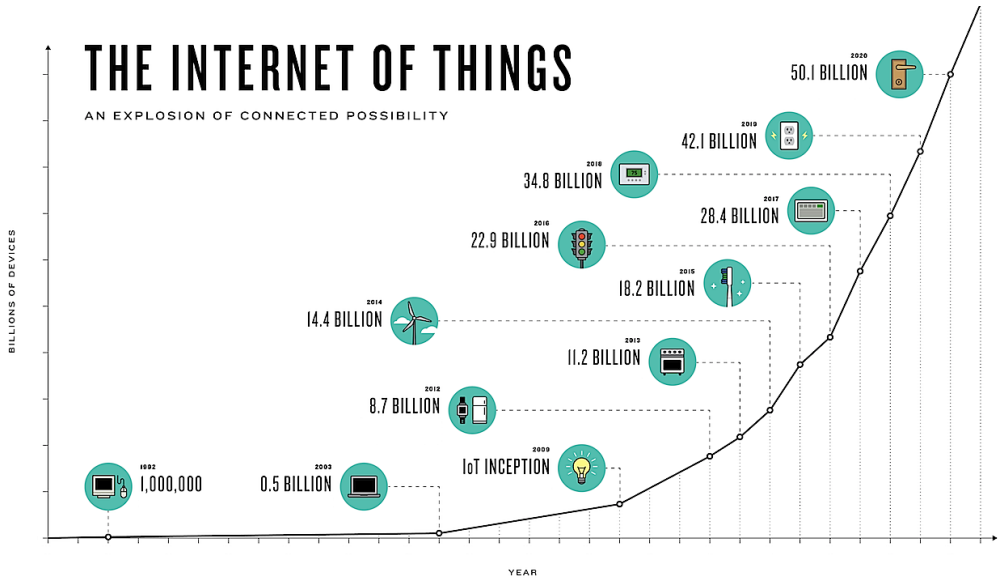


FIGURE 1.2 – L'explosion de l'Internet Of Things - Source : Cisco [1]

1.1.2 Les défis

Constituant la majeure partie de cette révolution de l'embarqué, les capteurs intelligents permettent de monitorer des grandeurs physiques tout en assurant un traitement embarqué et un fonctionnement Ultra Low Power, ou *Très basse consommation* (ULP). En effet, l'une des caractéristiques de cette nouvelle gamme de capteurs est leur discrétion : ils sont minimalistes et n'ont aucun besoin en connectivité physique (câble réseau, alimentation, etc...). Ces capteurs intelligents se réveillent sur une interruption à l'aide d'une Real Time Clock (RTC), réalisent une opération et se replongent en veille profonde. Ainsi le capteur sera en hibernation pendant plus

de 95% du temps. L'intérêt de ce mode de fonctionnement est de pouvoir atteindre des autonomies de plusieurs années grâce à seulement de simples piles.

La basse consommation constitue donc un critère important dans le développement des objets connectés. Ainsi, pour la majorité des applications actuelles, où l'idée est de déployer des centaines de milliers de capteurs, il n'est pas envisageable d'utiliser des réseaux mobiles - gourmands en énergie - comme c'est le cas à l'heure actuelle pour les applications M2M. Il faut donc utiliser un moyen de communication plus léger et dont la portée est suffisamment importante pour que les objets soient utilisables aussi bien dans un environnement intérieur qu'extérieur. De plus, le coût, la puissance et les infrastructures requises pour un tel nombre de modules ne font pas de la technologie GSM le candidat idéal pour ce genre d'application.

Néanmoins, ce ne sont pas les seuls critères à prendre en compte. En effet, bien que souvent oubliée depuis l'émergence des objets connectés, la sécurisation des connexions est aussi un élément important et sera un des plus grands défis de ces prochaines années [34]. D'un autre côté, l'immense quantité de données générées par ces dispositifs vont provoquer deux contraintes. Dans un premier temps, il s'agit de renvoyer ces données sur un serveur, ce qui implique une possible congestion des réseaux. Ensuite, une fois ces données centralisées, il est nécessaire de les stocker et de les manipuler. Certaines études, notamment dans [35], proposent des solutions intelligentes pour réduire le nombre de données transmises et la consommation d'énergie.

1.2 Objectif de la thèse et besoins industriels

1.2.1 Contexte

Cette thèse Cifre [1] a été réalisée au sein de l'entreprise Supervision Test et Pilotage (Step AT) basée à la Seyne sur Mer dans le Var (83). Créée en 2007, cette société est spécialisée dans la création de solutions innovantes pour les applications embarquées. Son cœur de métier historique repose sur l'instrumentation, la collecte et la mise à disposition de données provenant d'actifs industriels. Les offres de Step AT sont basées sur trois axes principaux :

1. Développement logiciel (LabVIEW, C, C++, C++ embarqué, ...)
   — Réalisation d'applications pour le test et la mesure à partir de cahiers des charges
   — Conception d'architectures modulaires et génériques
   — Spécialiste des développements pour cibles embarquées (FPGA, DSP, ARM)
2. Conception électronique (Cartes spécifiques, Modules pluggables, ...)
   — Electronique analogique et numérique

1. Cifre - Conventions Industrielles de Formation par la REcherche

— Processeur ARM
— Conception et validation de design

3. Réalisation de solutions "clés en main"
   — Conception d'architectures matérielles à base de produits National Instruments (NI).
   — Intégration de systèmes d'acquisition pour tout type d'applications.
   — Rétrofit ou adaptation de bancs d'essais existants

Ces projets sont majoritairement réalisés dans cinq secteurs cibles : l'industrie, les énergies, les dispositifs médicaux, la recherche et l'aéronautique. Ils sont réalisés dans le cadre d'une structure documentaire ISO 9001.

Afin de réaliser ces projets, l'entreprise s'appuie sur des partenariats solides avec de grandes multinationales telles que National Instruments ou, plus récemment, IBM. La figure **??** illustre respectivement les deux niveaux obtenus chez ces partenaires : "Silver Alliance Partner" et "Business Partner".

Cependant, depuis l'arrivée d'Internet chez les particuliers, peu avant les années 2000, les périphériques ont eu de plus en plus tendance à se connecter à Internet. Bien que réservé aux ordinateurs au départ, Internet s'est rapidement répandu aux systèmes embarqués, en commençant par les téléphones mobiles.

Depuis bientôt une dizaine d'années, la tendance est à l'IoT, c'est-à-dire embarquer du traitement et de la connectivité dans des objets afin de les rendre intelligents (Prise de décision automatique par exemple). Le concept d'IoT est à la base des réflexions sur les "Smart Devices" et repose sur la notion de "Cloud Computing".

Suite à cette demande croissante, la société, également agréée Crédit d'Impôt Recherche (CIR) et disposant d'une branche recherche, a décidé d'axer sa vision à long terme sur le développement de systèmes IoT.

1.2.2 Les enjeux pour l'entreprise

Step AT a fait le choix de participer à la course à l'Industrie 4.0 dont l'objectif est la mise en place d'usines intelligentes. Présentée comme la quatrième révolution industrielle (après la machine à vapeur, l'électricité et l'automatisation), le concept de l'Industrie 4.0 est d'interconnecter les machines entre elles au sein des usines mais aussi vers l'environnement extérieur. Les machines adoptent donc des standards M2M permettant à ces dernières de communiquer entre elles et d'échanger des données. Un serveur de supervision permet de regrouper les informations et réguler les machines en conséquence. L'intelligence étant déportée principalement sur les machines, il est alors possible de produire des outils de supervision à très haut niveau d'abstraction permettant ainsi d'optimiser les coûts et d'augmenter les rendements. Step AT travaille également sur des problématiques visant à rendre le monde de l'objet connecté plus accessible pour les entreprises.

La vision de la société est donc désormais de proposer des systèmes complexes provenant de l'Industrial Internet Of Things, ou *Internet des Objets Industriels* (IIoT) dans leur globalité. C'est-à-dire fournir une chaine complète depuis la donnée jusqu'à sa mise à disposition pour l'utilisateur finale sur une plateforme cloud. Dès lors, chaque système pourra être mis en en place suivant deux approches dont le socle commun est illustré sur la figure 1.3. Seules les cases plus claires sont susceptibles de changer suivant l'approche utilisée.

FIGURE 1.3 – Processus complet de la collecte de données

Dans les deux cas de figure, la partie collecte de données reste la même, c'est-à-dire que les objets renvoient leurs données à un concentrateur. Ensuite, bien que les outils physiques utilisés soient sensiblement les mêmes, c'est au niveau de la couche logicielle que l'on observe les plus grandes différences.

Dans un premier cas, les données qui arrivent au concentrateur sont renvoyées, à l'aide de protocoles adaptés à la quantité de données importante à transférer, directement dans le cloud pour qu'elles soient ensuite analysées, stockées et affichées pour les utilisateurs finaux. Cette approche, baptisée "Cloud Computing" diffère donc de la seconde de par le positionnement du traitement des données dans la chaîne globale. En effet, le "Fog Computing" [2], dispose d'une interface d'analyse et de traitement directement sur le concentrateur. Dès lors, la quantité de données à transférer et à stocker sur le cloud est nettement plus limitée. Le fait de placer de l'intelligence au plus près des capteurs implique donc une grande diminution de certains coûts mais ne permet plus à l'exploitant de corréler les données d'un point de vue global sur le cloud.

Les enjeux d'un tel changement sont clairs. Il s'agit de proposer des solutions novatrices ainsi qu'innovantes pour non seulement prendre le virage de l'IoT mais aussi fournir aux clients des applications non présentes sur le marché. C'est pour cela que Step AT a décidé courant 2014 d'orienter ses recherches sur les deux défis principaux du monde de l'internet des objets. Deux thèses Cifre ont donc été lancées afin de répondre à ces problématiques. La première vise à apporter de nouvelles solutions pour l'économie et la récupération d'énergie sur des cartes électroniques composées de capteurs. La seconde vise à comprendre les technologies de communication adaptées à cette révolution. Étudier les avantages et les inconvénients, les mettre en place et proposer des solutions novatrices. C'est cette dernière qui est abordée dans ce manuscrit.

2. Fog, signifiant brouillard en anglais, a été choisi pour son sens de "nuage bas". Ainsi, l'intelligence est placée plus bas, proche du capteur

1.2.3 Cahier des charges

Cette thèse Cifre a donc été mise en place pour explorer le monde émergent de l'internet des objets dans son ensemble et approfondir et mettre en place des systèmes de communications sans fil adaptés aux problématiques d'aujourd'hui.

Comme énoncé dans la partie 1.1.2, l'avènement de l'IoT et de ses centaines de millions de capteurs communicants à connecter lors des prochaines années implique le besoin d'une technologie adaptée. Les recherches ont donc été rapidement orientées vers les LPWA [3] qui semblent être des réseaux particulièrement propices au bon déploiement de ce genre d'applications. Cependant certains cas ne peuvent être couverts par cette technologie, comme pour certains systèmes médicaux. En effet, quelques milieux sont très contraignant concernant les ondes électromagnétiques ou la santé, notamment dans les salles d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Ces dernières sont très exigeantes pour les systèmes sans fil puisqu'il est nécessaire de contourner deux contraintes majeures : limiter les ondes électromagnétiques afin de réduire les risques potentiels sur la santé humaine mais aussi transmettre des informations dans un milieu à haut champ magnétique. Il est donc très difficile de faire transiter de la donnée sans fil. De plus, une synchronisation fine des différents capteurs n'est pas aisée et peut être un point bloquant pour de nombreuses applications de l'industrie 4.0. Un moyen simple de s'affranchir de ces deux contraintes est la lumière. En effet, échanger des informations par canal optique est non invasif et n'entraine donc a priori aucun problème de santé puis, de par ses caractéristiques intrinsèques, permet une synchronisation des plus performantes. Cependant, pour réaliser un système complexe basé sur la communication par la lumière, il est indispensable limiter certains inconvénients, notamment la difficulté à effectuer une communication simultanée depuis plusieurs sources vers le même récepteur.

Comme l'illustre la figure 1.4, le cahier des charges initial a finalement été axé sur ces deux thématiques bien distinctes :

1. Dans un premier temps, cette phase consiste en l'étude et la mise en pratique des principaux acteurs des Low Power Wide Area Network (LPWAN). Enfin, suite à différentes demandes, l'objectif est de réaliser un réseau en étoile privé et unique pour chaque client basé sur le réseau LoRaWAN. La majorité de ces clients utilisant du matériel de chez NI, embarqué pour la plupart, il est crucial pour l'avenir de la société de gérer deux contraintes majeures. Premièrement, le conditionnement doit être le plus petit possible afin de pourvoir proposer un produit facilement intégrable aux plateformes NI ou bien autonome. Ensuite, afin de se démarquer de la concurrence, ce produit doit disposer de son propre serveur intégré. Step AT serait alors la première société mondiale à proposer cette solution dans l'environnement de National Instruments.
2. La deuxième étape, plus complexe, a pour but de réaliser un réseau en étoile

3. Réseau sans fil basse consommation, bas débit et longue portée

basé sur une communication sans fil lumineuse. Afin de séparer les différents verrous technologiques cette phase est dissociée en deux briques :

— Afin d'étudier l'existant, de comprendre les différentes problématiques et valider des protocoles, il faut dans un premier temps réaliser une communication standard point à point. Le but ici n'est pas de faire la course au débit mais bel et bien de valider et mettre en place les notions relatives à cette technologie.

— Une fois cette étape terminée, il faut mettre en place un réseau en étoile. Il est donc nécessaire de disposer d'un concentrateur et plusieurs modules disposant d'un récepteur et d'un émetteur lumineux. La difficulté réside dans la problématique de communication simultanée de toutes les sources vers le concentrateur.

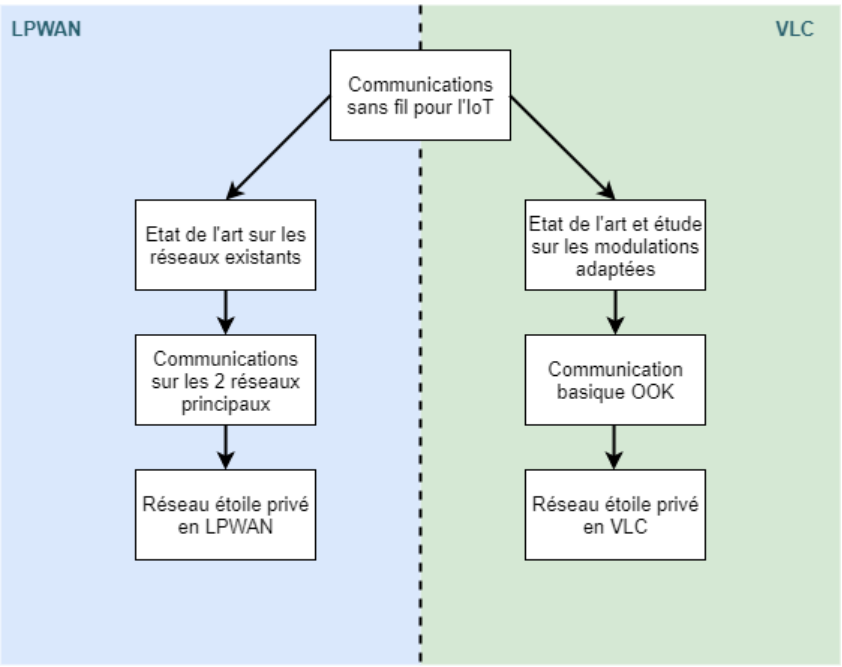


FIGURE 1.4 – Cahier des charges : les 2 axes de recherches

Comme présentée dans le cahier des charges, la phase initiale consiste à réaliser la partie gauche de la figure 1.4. Dans la suite de ce chapitre nous allons donc analyser plus précisément ces nouvelles technologies sans fil longue portée.

1.3 Réseau émergent de l'IoT : Les LPWAN

1.3.1 Présentation de la technologie

La communication ULP, longue distance, faible consommation constitue l'un des principaux défis à relever pour l'IoT et le M2M. Communément appelés réseaux

LPWAN, ils adoptent une architecture de réseau en étoile et permettent des communications jusqu'à une vingtaine de kilomètres en champ libre [36]. Cette topologie réseau repose sur un équipement central (le concentrateur) qui va diriger toutes les connexions. Chaque capteur va donc émettre des messages vers un concentrateur local mais ne pourra en aucun cas envoyer des messages directement à d'autres émetteurs.

Cette technologie permet d'émettre et recevoir des messages de très petites tailles, avec pour avantage majeur que les composants utilisés pour émettre ces messages sont très peu coûteux et très peu gourmands en énergie [36]. Il est désormais possible, avec une simple batterie, d'émettre quelques messages par jour pendant 10 ans. Cette durée de vie est possible grâce à trois notions importantes :

— La topologie du réseau : De nombreux réseaux actuels sont basés sur une structure mesh [4]. Chaque point du réseau est donc capable de relayer une information pour l'envoyer au concentrateur. Certains chemins critiques font qu'il peut arriver que certains modules soient plus utilisés que d'autres. L'autonomie globale est donc revue à la baisse. Dans le cas des LPWAN, la topologie étoile implique une connexion directe entre chaque élément du réseau et le concentrateur. Inutile donc pour des dispositifs de rester allumés en permanence pour relayer des messages hypothétiques.

— Le *duty cycle* : Comme vu précédemment, la basse consommation peut-être atteinte en éteignant certains composants énergivores des dispositifs IoT[37, 38] tels que les émetteurs radio. Dans le cas des LPWAN, le *duty cycle* permet de couper les transmetteurs et de les allumer uniquement lorsqu'une donnée doit-être émise ou reçue. Lorsqu'il s'agit de recevoir de la donnée depuis le concentrateur, différentes méthodes peuvent être mises en place, notamment la planification de l'ouverture de fenêtres temporelles pendant lesquelles les objets restent allumés. Dans ce cas, il sera nécessaire de paramétrer le dispositif dès lors qu'il rejoindra le réseau. Enfin, dans le but de réguler les échanges de données en fonction les bandes utilisées, il est imposé un temps de parole par dispositif ne dépassant pas 1% du temps sur une heure [39].

— Le protocole ALOHAnet [5] : Extrêmement simple à mettre en place, ce protocole consiste à faire envoyer des paquets de données à un émetteur dès qu'il le souhaite. Si des données sont corrompues ou perdues (pas d'acquittement de réception), ce paquet sera retransmis après un temps d'attente de durée aléatoire. Ce schéma est donc nettement moins gourmand en énergie que les protocoles Medium Access Control (MAC) classiques utilisés pour les réseaux cellulaires.

Tous ces éléments, permettant de diminuer considérablement la consommation des modules, sont indispensables pour abaisser les coûts de maintenance de façon

4. Topologie réseau dont tous les hôtes sont connectés les uns aux autres sans hiérarchie centrale. Chaque nœud peut recevoir, envoyer et relayer de la donnée

5. Plus connu sous le nom ALOHA

significative.

De plus, les réseaux LPWA se différencient des réseaux traditionnels courte portée tels que ZigBee, Bluetooth et les Wireless Local Area Network (WLAN). La portée de ces systèmes communicants qui plafonne à une centaine de mètres est parfois compensée par un maillage plus dense de passerelles ou une architecture mesh. Cela implique donc des coûts d'installation de l'infrastructure réseau et de maintenance bien plus élevés [40].

Enfin, les cas d'usages semblent plus se rapprocher des utilisations classiques de Global for Mobile communication (GSM) et Long Term Evolution (LTE). Bien que disposant d'une couverture importante, les réseaux GSM ne rivalisent pas sur les points vitaux de l'IoT, à savoir la consommation et les prix.

Afin de bien identifier les atouts et faiblesses de cette nouvelle technologie longue portée de façon plus complète, voici sur la figure 1.5 un comparatif LPWAN - ZigBee - GSM :

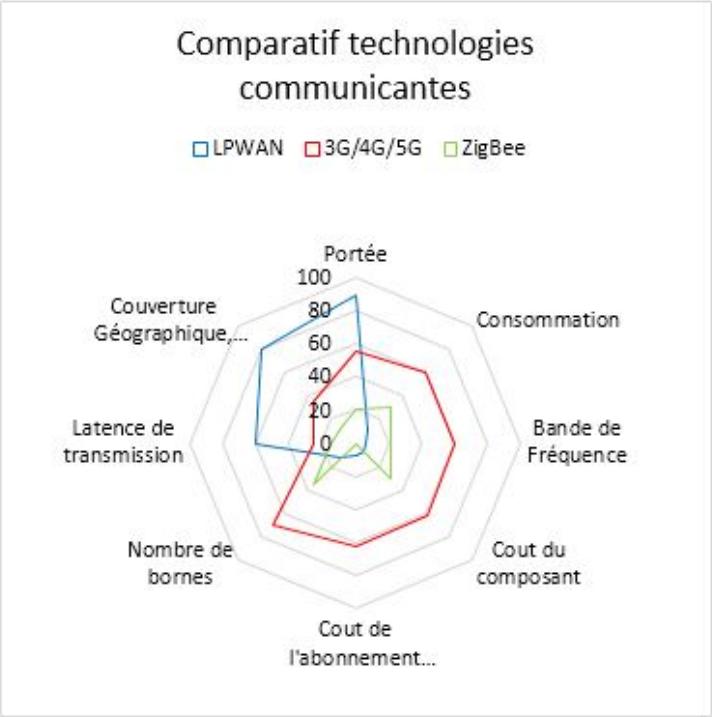


FIGURE 1.5 – Comparatif des technologies communicantes - Source Digital Dimension [2]

De façon plus précise, les LPWAN et GSM ne disposent en réalité que d'un seul point commun de taille, la couverture. Cependant, cette dernière est gérée artificiellement en GSM puisqu'il faut une densité bien plus importante de passerelles pour une couverture identique. Concrètement, il faut 10 à 20 fois moins d'antennes pour faire un maillage complet du territoire Français en utilisant des réseaux radio

longues portées tels que les LPWAN.

De plus, la complexité et le coût des dispositifs cellulaires sont élevés. Quelques dizaines d'euros pour le GSM contre quelques euros pour les LPWAN. Ceci est dû à la faculté d'opérer des formes d'ondes complexes, optimisées pour la voix et offrant des services haut débit [38]. D'un point de vue financier, la dernière différence est le prix de l'abonnement. Quelques euros par an pour la technologie Low Throughput Network, ou *Réseau bas débit* (LTN), par mois pour les communications par carte SIM classiques.

Enfin, et ce n'est pas le moins important, le fonctionnement des LPWAN sur des bandes de fréquence à usage libre [6] aide à diminuer les coûts. Il s'agit plus précisément des bandes ISM qui sont régulées à l'aide du *duty cycle* et d'une puissance maximale par des autorités afin de ne pas les surcharger. Les fréquences majoritairement utilisées sont le 868 MHz en Europe et le 915 MHz pour les États-Unis.

Dans le cas Européen, la bande de fréquence est plus précisément répartie en 6 bandes comprises entre 865 et 870 MHz disponibles sur la figure 1.6.

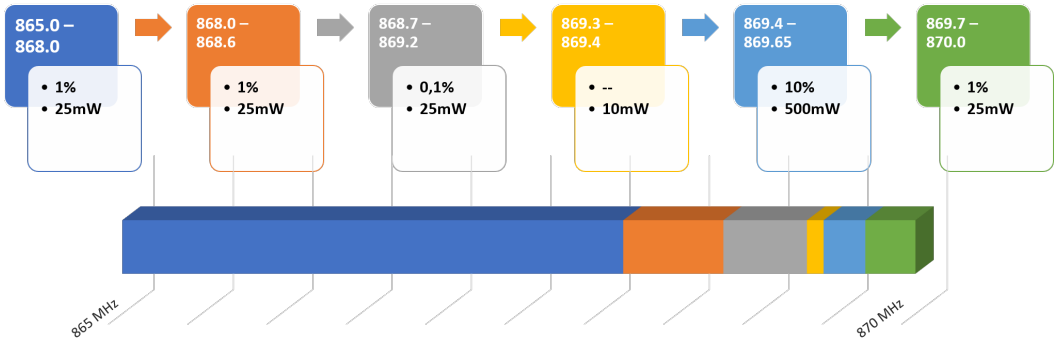


FIGURE 1.6 – Bande 865 - 870 MHz

Dans l'ensemble, la majorité des LPWAN communiquent dans la bande n°2 qui se situe aux alentours de 868.3 MHz. La puissance maximale autorisée est donc de 25 mW tandis qu'il est impossible d'émettre pendant plus de 36 secondes par heure suite au *duty cycle* fixé à 1%. Cependant, pour certains réseaux laissant le choix des bandes il peut être utile de se déplacer légèrement pour bénéficier de nouvelles propriétés.

En effet, la bande n°3 peut sembler plus contraignante de par son *duty cycle* à 0,1% alors qu'elle est très utile dans les applications échangeant très peu. Si nous prenons par exemple une application qui transfère des données au maximum 1 fois par jour elle n'est en aucun cas perturbée par les régulations et rencontre potentiellement moins de collisions avec les autres systèmes.

La bande n°4, quant à elle n'impose aucun *duty cycle*. Très peu utilisée de façon générale par les LPWAN à cause de sa puissance maximale autorisée très faible et sa

6. Sans licence

petite taille, elle devient très utile lorsque l'application ne nécessite pas une portée importante. Dès lors, cette bande apparait très intéressante puisque son absence de limitation d'envoi de données permet aux dispositifs de parler en continu.

Enfin, la dernière bande bénéficiant de propriétés différentes est la bande n°5. En effet, les objets communicants doivent respecter la plupart du temps la notion de base qui reste l'économie d'énergie. Ainsi les puissances d'émissions doivent être minimales, l'architecture générale doit être la plus simple possible et la fréquence d'émission doit rester faible pour éviter des consommations superflues. C'est l'inverse pour les concentrateurs qui sont généralement connectés à une alimentation et doivent communiquer avec une multitude d'objets. Cette bande autorise donc une puissance maximale 20 fois plus importante et un *duty cycle* de 10%. elle est donc le candidat idéal pour les communications descendantes.

Pour résumer, voici un tableau listant les points forts de chaque technologie :

	GSM	LPWAN
Consommation	-	+ +
Débit	+ +	- -
Coût	-	+
Latence	+	- -

Table 1.1 – Caractéristiques GSM/LPWAN

Au final, ce tableau montre bien que les LPWA sont totalement complémentaires aux technologies cellulaires. Leur portée et débit illustrés en figure 1.7 varient nettement des réseaux conventionnels, ce qui implique une utilisation à des fins différentes. En revanche comme le montre la figure 1.5 une intersection des espaces est présente. Ce qui implique ni plus ni moins des cas d'usages où les 2 solutions sont envisageables. En plus d'être complémentaires, ces deux technologies peuvent être interchangeables.

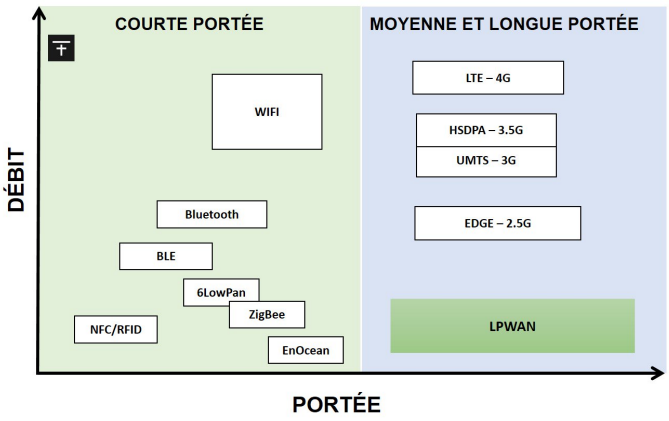


Figure 1.7 – Panel des principaux réseaux sans fils pour l'IoT [3]

Les cas d'usages ayant pour ligne de conduite les points suivants seront donc en position de tirer le meilleur de la technologie LPWAN :

— Longue portée
— Faible consommation
— Bas débit

Les domaines d'applications restent donc très variés et pourront toucher, comme le montre la figure 1.8, des applications aussi bien industrielles que grand public.

FIGURE 1.8 – Domaines d'utilisation de LPWAN - Source : Factory System

Certaines de ces applications utilisent ce support de communication pour tirer profits d'avantages bien particuliers. Par exemple, la faible consommation aura plus de sens dans le monitoring d'infrastructures comme un pont ou un building que sur un réfrigérateur. En effet, l'accès à l'alimentation est bien plus aisé sur ce dernier.

En revanche, le point commun de tous ces cas d'usages est une remontée ponctuelle de données. Que l'on soit sur des actifs industriels ou un parking connecté, une latence importante n'est pas rédhibitoire.

La figure 1.9 résume les principales caractéristiques d'une réseau LPWAN :

Caractéristique	Valeur cible
Portée	3 – 50 km selon l'environnement
Autonomie	Entre 5 et 15 ans
Débit	De 0.1 à quelques centaines de kbits par seconde
Coût d'abonnement	Quelques euros par an
Coût module	Quelques euros

FIGURE 1.9 – Les caractéristiques d'un réseau LPWA [3]

Les ordres de grandeur de la portée, du débit et de l'autonomie sont propres à ce type de réseau. Néanmoins, il est impossible de maximiser ces 3 grandeurs avec un seul et unique réseau. C'est pour cela qu'il existe une multitude de technologies LPWAN qui permettent d'effectuer des compromis en fonction des problématiques de l'application.

1.3.2 Les principales technologies LPWA

En pleine émergence, les réseaux LPWA sont à dissocier en deux catégories. Il s'agit des réseaux cellulaires et non cellulaires. Cette dernière, dédiée à l'IoT, est composée majoritairement de réseaux propriétaires tandis que la catégorie cellulaire s'appuie sur des réseaux existants.

Dans le cadre de cette thèse, compte tenu du cahier des charges initial, l'étude est principalement orientée vers la technologie la plus connue, à savoir le LoRa. Cependant, afin de tirer profit des avantages, de comprendre les points faibles de cette technologie et d'anticiper des demandes de certains clients nous avons dressé un portrait de son concurrent direct, le Sigfox, mais aussi des multiples acteurs majeurs moins connus du secteur dont la liste apparait sur la figure 1.10.

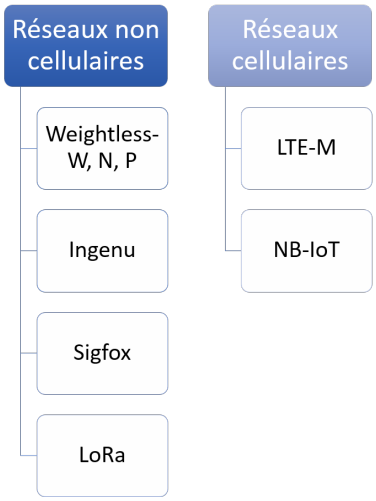


FIGURE 1.10 – Technologies majeures émergentes (LPWAN)

La première technologie de la figure 1.10 est le réseau propriétaire déployé par Ingenu qui propose une communication bidirectionnelle. Basé sur le Random Phase Multiple Access (RPMA), ce réseau est un des rares à fonctionner sur des fréquences supérieures au GHz, à savoir 2,4 GHz [41]. L'utilisation de cette bande, non soumise à des régulations de *duty cyle* en Europe et aux États-Unis, implique un débit élevé pour ce type de communication. Les chiffres atteints sont de l'ordre de la centaine de kbps. A contrario, la consommation est plus élevée que pour les autres technologies et la portée, estimée aux alentours de 5 kilomètres [42], est une des plus faibles du secteur.

Viennent ensuite trois standards développés par le Weightless Special Interest Group mis en place sur des bandes de fréquence Sub-1GHz [7] et sur des bandes libres attribuées précédemment à la diffusion hertzienne de la télévision.

De façon générale, chaque standard dispose de caractéristiques distinctes afin d'apporter des solutions pour les trois notions : la portée, le débit et l'autonomie. Le coût reste néanmoins un facteur essentiel, et c'est le Weightless-N qui tend à minimiser ce facteur. Ce standard, fonctionnant dans la bande Ultra Haute Fréquence (UHF) 800 - 900 MHz et basé sur la technologie Ultra Narrow Band (UNB), ne fonctionne que pour les communications montantes. Il est donc impossible, pour le serveur, d'envoyer des données aux nœuds communicants. La consommation du Weightless-N permet d'atteindre des autonomies allant jusqu'à 10 ans tout en ayant une portée relativement grande. De plus, en considérant le débit, qui se situe dans la moyenne des LPWAN en atteignant jusqu'à 100 kbps et des couts globaux bon marché, le Weighless-N est le candidat idéal pour réaliser un réseau rapidement et à moindre coût. En revanche, son incapacité à proposer une communication ascendante réduit nettement son champ d'application.

Le Weightless-W est donc une bonne alternative si le cas d'usage attache une importance particulière pour la communication bi-directionnelle. Il opère quand à lui dans une bande de fréquence plus faible, entre 470 et 790 MHz. Ce facteur, couplé à une architecture en bande étroite permet de multiplier un débit maximal par 10 tout en sacrifiant la portée et en augmentant la consommation du système communicant. De plus, la figure 1.11 montre que le gain de débit et la communication double sens impactent tous les autres paramètres, notamment le cout du terminal mais aussi celui du réseau.

7. Bande dont la fréquence est en dessous du seuil de 1 GHz. Typiquement, dans les intervalles 769 - 935 MHz et 315 - 468 MHz

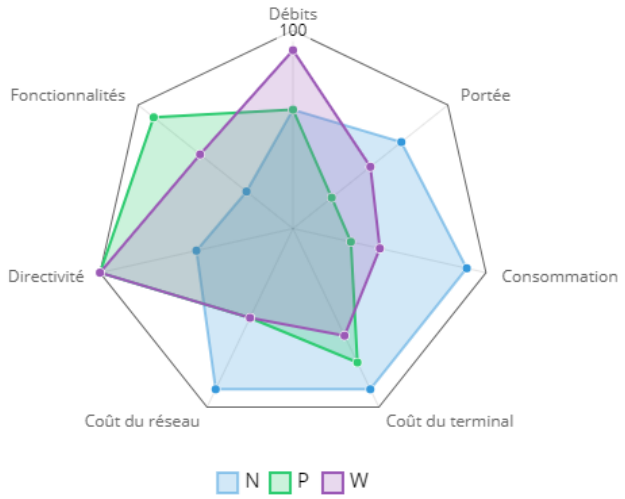


FIGURE 1.11 – Comparaison des trois standards Weightless

Enfin, proposé comme un moyen haute performance garantissant un haut niveau de qualité de service de communication LPWAN bi-directionnel , le Weightless-P peut opérer sur un panel de fréquences telles que 169, 433, 470, 780, 868, 915 et 923 MHz. En dépit d'un débit, d'une autonomie et d'une portée en berne par rapport aux autres standards du *Weightless Group*, les fonctionnalités incorporées de ce réseau permettent aux utilisateurs de mettre en place des systèmes bien plus complexes. Ainsi, le Weightless-P propose un cryptage des données en Advanced Encryption Standard (AES) [8] ou bien, par exemple, de gérer automatiquement le débit en optimisant les ressources radio suivant la qualité et la force du signal[43]. Ce dernier standard est donc utile dans des applications complexes nécessitant des fonctionnalités avancées. A l'avenir, il pourrait donc être d'intérêt de coupler ces différents standards pour proposer des communications bi-directionnelles ou bien optimiser certains paramètres.

Les deux derniers réseaux (non cellulaires) de la figure 1.10 sont les plus répandus à l'heure actuelle. Nous avons donc porté une attention particulière au LoRa et au Sigox afin de proposer une étude complète à nos clients désireux d'utiliser ces technologies ainsi que des applications optimisées au sens de leur besoin.

1.3.3 LoRa

Créée en 2009, la société grenobloise Cycleo propose quelques mois plus tard, une solution Radio Fréquence (RF) facilement intégrable (puce de 1 millimètre carré) permettant de réaliser une communication RF sur plusieurs kilomètres entre des systèmes ULP. Cette technologie, appelée LoRa [9], est vite perçue comme un moyen

8. Algorithme symétrique de chiffrement par blocs
9. Contraction de *Long Range* pour longue portée

de réaliser des communications M2M. En 2012, Semtech flaire le potentiel de la technologie et rachète Cycleo pour obtenir le monopole du LoRa sur ses puces. Malheureusement, le rachat de Cycleo engendre un retard par rapport à SigFox qui continue à se développer après plusieurs levées de fond. En 2014, la première puce LoRa, le modem SX1272, sort des usines de Semtech et quelques mois plus tard, les annonces d'équipements et de modules M2M compatibles se multiplient.

Néanmoins, le LoRa n'est pas un réseau LPWAN car ne dispose pas d'une architecture en étoile mais permet seulement une communication pair à pair. On parlera donc de technologie LoRa et non de "protocole LoRa" car l'essentiel du LoRa se situe dans la transmission de messages à longue distance ; il n'implémente aucun protocole hiérarchique et reste un moyen bas niveau de transmettre des données sans-fil à longue portée.
Le LoRa s'impose comme une technologie peu propriétaire : il suffit d'avoir une puce produite par Semtech pour faire fonctionner notre système LoRa. Il n'y a aucun abonnement, aucune limite de message par jour et la longueur d'un message n'est pas limitée.

— Le réseau est de type pair à pair, il n'existe aucune hiérarchie dans le réseau. L'architecture du réseau ne permet donc pas d'avoir un concentrateur de données comme le Sigfox qui a adopté une hiérarchie en étoile. Il est donc impossible d'obtenir avec un réseau LoRa, un système de supervision central.
— Les communications ne sont pas du tout sécurisées. L'émetteur et le destinataire sont identifiés par un IDentifiant (ID) donné dans la trame qui n'est pas cryptée.

1.3.3.1 Les spécificités techniques

Cette technologie s'appuie sur les bandes ISM, dont la répartition des fréquences et les réglementations varient suivant la région du monde. Les deux fréquences principalement utilisées sont le 868 MHz en Europe et 915 MHz en Amérique du nord. Cette couche physique repose sur une alternative à la Spread Spectrum Modulation, ou *Modulation à étalement de spectre* (SSM), nommé Chrip Spread Spectrum (CSS) qui étale le signal de base sur un domaine fréquentiel donné afin d'augmenter considérablement la bande passante dans le but d'accroitre la résistance aux interférences, réduire la consommation énergétique et intégrer un code correcteur d'erreur.

Ce type de modulation, très utilisée pour des applications radar dans le passé est désormais répandu pour les communications bas débit [44]. Comme l'illustre la figure 1.12, le CSS forme des symboles appelés chirp dont l'amplitude est constante et la fréquence croissante ou décroissante dans le temps.

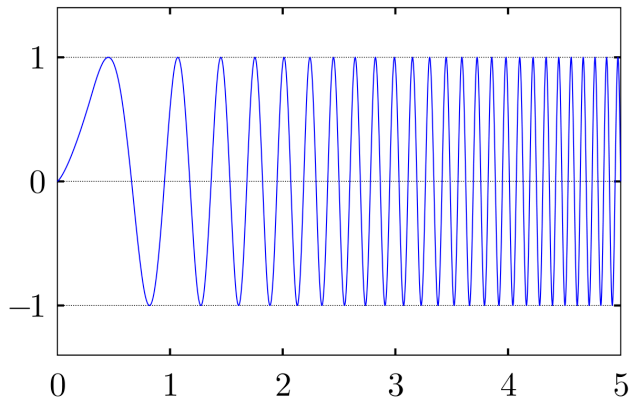


FIGURE 1.12 – Représentation temporelle d'un chirp

Lors d'une transmission, le Spreading Factor, ou *Facteur d'étalement* (SF) est réglable et impose une recherche préalable pour optimiser la valeur suivant différents critères. En effet, en partant d'une bande passante fixée [10], un SF haut implique directement une augmentation de la portée et du délai T_s de transmission d'un symbole exprimé en secondes. Ce dernier peut être calculé à l'aide de la formule 1.1 :

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \tag{1.1}$$

BW correspond à la valeur de la bande passante (Hz).

En revanche, toujours dans le cas d'un SF haut, le système communicant voit son débit diminuer mais dispose d'une meilleure sensibilité à la réception. La formule (1.2) présente la relation entre le débit final et le facteur d'étalement tandis que les courbes de la figure 1.13 expriment les différences de sensibilités du récepteur LoRa en fonction du SF.

$$BitRate = SF * \frac{BW}{2^{SF} * CR} \tag{1.2}$$

CR représente le code de correction $CR = \frac{4}{4+n}, n \in \{1, 2, 3, 4\}$ [45].

10. En LoRa, la bande passante peut prendre deux valeurs : 125 kHz et 250 kHz. Une dernière valeur à 500 kHz est disponible uniquement en Amérique du nord

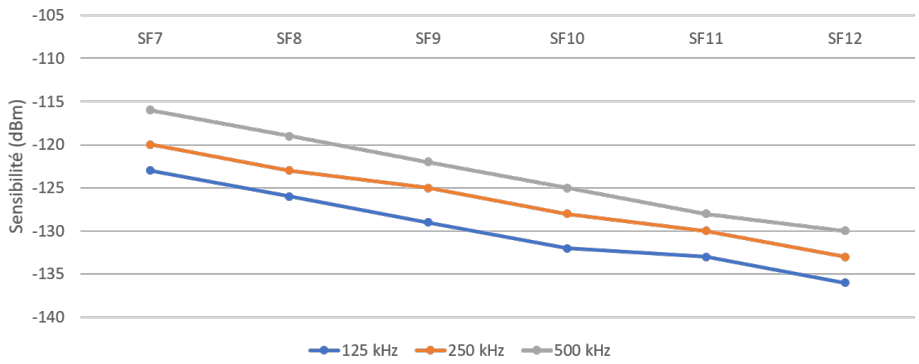


FIGURE 1.13 – Sensibilités du dispositif LoRa Semtech SX1276 - Source : Semtech

De façon plus détaillée, la technologie LoRa peut fonctionner sur des SF orthogonaux entre eux allant de 7 à 12. Cette notion d'orthogonalité permet aux récepteurs de capter plusieurs messages en même temps sans qu'ils ne rentrent en interférence. En utilisant la formule (1.2) pour chacun des six SF disponibles nous arrivons à des débits présentés en figure 1.14. Nous voyons bien ici qu'au plus le SF est grand, au plus la portée est accrue. En revanche, un SF de grande valeur impose un étalement plus important, ce qui altère directement le temps d'émission. Cela pose deux problèmes majeurs :

— Le *duty cycle*, qui régule le temps d'émission, est indépendant du facteur d'étalement. Dès lors, le dispositif communiquant avec un SF important devra limiter ses envois de données puisque il met plus de temps à les transmettre.
— Sur un objet connecté, la partie communication radio est un des organes qui consomme le plus. Il est donc très important de limiter les échanges afin de le mettre en veille le plus souvent possible. Un temps d'émission plus long impactera donc directement la batterie de l'équipement qui verra son autonomie amoindrie.

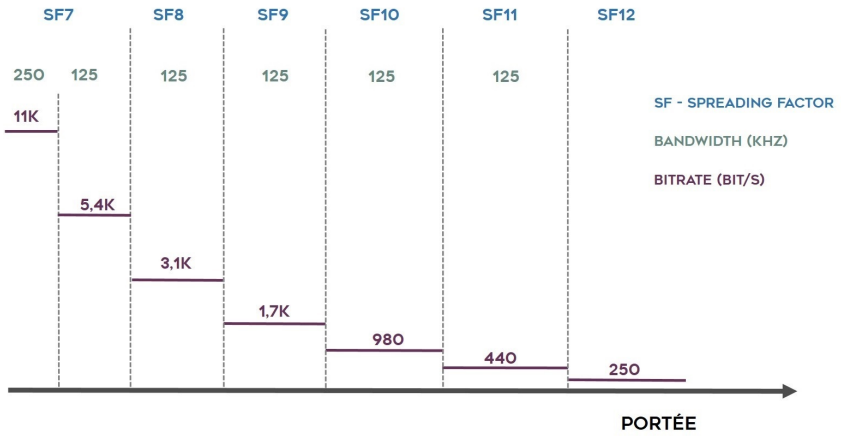


FIGURE 1.14 – Relations entre facteur d'étalement et débit [4]

Dès lors que tous les paramètres ainsi que le SF sont fixés, la transmission est envisageable. Une trame est composée de trois parties distinctes :

1. *Preamble :* 4 chrips croissants consécutifs
2. *Sync :* 2 chirps décroissants consécutifs
3. *Symbols :* Nombre variable de données. La fréquence de départ de chaque symbole dépend de la donnée qu'il véhicule. Par exemple, lors d'une transmission en SF8 (8 bits par symbole), le chirp est divisé en 256. Si la valeur à transférer est 128, le symbole aura pour fréquence de départ la valeur égale à la moitié de la bande passante.

La figure 1.15 représente une trame transférant la donnée suivante : 10, 80, 185, 55. Les émissions ont été réalisées sur un SF8 avec une bande passante de 125 kHz.

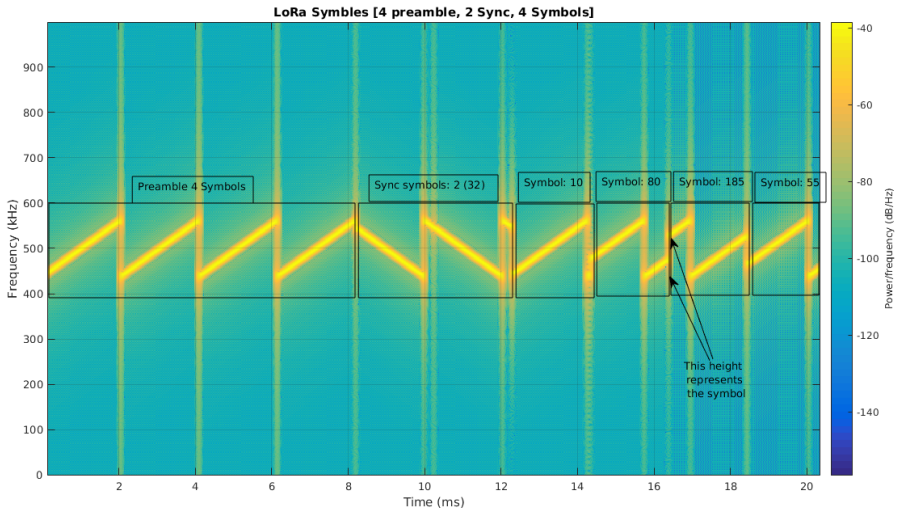


FIGURE 1.15 – Symboles LoRa [5]

Toutefois, la technologie LoRa ne permet pas d'être un acteur important des LPWAN, mais le fait de disposer d'une technologie longue portée quasiment non prioritaire constitue un atout majeur. C'est ainsi que de grands groupes ont décidé d'utiliser le LoRa dans un protocole plus abouti et robuste.

1.3.3.2 Le protocole LoRaWAN

Présentation

Malgré le fait que le LoRa ne propose pas un réseau disposant d'une architecture en étoile indispensable dans le monde de l'IoT, des grands industriels comme Cisco, IBM ou Microchip croient en cette technologie et participent avec Semtech à la fondation du consortium LoRa Alliance dont le principal objectif est de spécifier et supporter une implémentation de réseau LPWAN avec la technologie LoRa. Le

résultat de cette collaboration, appelée LoRaWAN, constitue une solution robuste rivalisant avec les autres LPWAN en reprenant les forces de la technologie LoRa tout en ayant une influence forte sur la durée de vie des batteries, la capacité de charge du réseau, la qualité de service ainsi que la sécurité.

Le réseau LoRaWAN est organisé suivant une topologie étoile d'étoiles. La communication proposée dans ce réseau est bi-directionnelle tout en favorisant nettement les transmissions montantes vers les concentrateurs [46]. Cette organisation, illustrée sur la figure 1.16 est en fait composée d'une multitude de concentrateurs qui relayent les informations reçues depuis les nœuds vers un serveur central à l'aide d'un protocole GSM ou Ethernet dans la plupart du temps. Le serveur central permet d'éliminer les doublons reçus par les différents concentrateurs, gère les débits des nœuds afin d'optimiser la capacité du réseau et de prolonger l'autonomie des dispositifs sans fil. Quand au serveur d'application, il procède au décryptage des messages et à l'envoi des consignes aux points de terminaison.

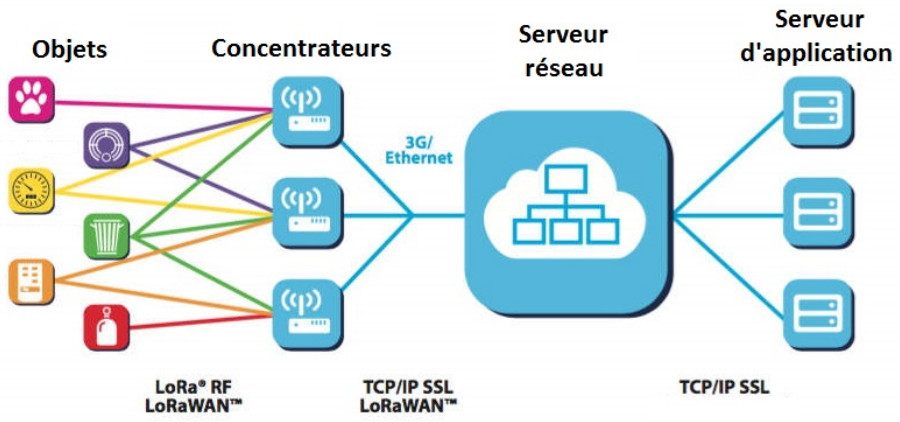


FIGURE 1.16 – Architecture d'un réseau LoRaWAN [6]

Les canaux

A l'instar des bandes de fréquences, les canaux utilisés dépendent de la région. On distingue deux cas de figure. D'un coté, le système nord Américain et Australien et de l'autre le système Européen.

Dans le premier cas, en Amérique du Nord, huit sous-bandes de 125 kHz et une de 500 kHz sont dédiées aux communications montantes, et huit autres sous-bandes aux communications descendantes profitant d'une bande passante de 500 kHz. Il s'agit ici de fréquences situées entre 902 et 928 MHz.

La différence entre le système Nord Américain et Australien vient du fait que les sous bandes de communication montantes sont basées sur des fréquences plus importantes pour ce dernier.

La spécification est différente pour le cas Européen puisqu'elle ne définit que trois canaux de 125 kHz de bande passante pour les communications descendantes, aux fréquences 868,1, 868,2 et 868,3 MHz. Toutefois, au moment où un nœud rejoint le réseau, il est possible de rajouter jusqu'à cinq canaux de 125 kHz, qui permettront des échanges de données bi-directionnels.

Les classes

La spécification LoRaWAN définit trois classes d'objets communicants. Le choix d'une classe doit être judicieux en fonction de l'application puisqu'il impacte directement la consommation du dispositif :

1. *Classe A :* Ce mode là est le moins gourmand en énergie. En effet, le module est en veille pendant la majeure partie du temps. Le concentrateur ne peut donc pas communiquer avec lui. Cependant, un moyen de garantir une communication bi-directionnelle est d'ouvrir deux fenêtres temporelles d'écoute suite à l'envoi de messages vers le concentrateur. Ces fenêtres, présentes uniquement si le message envoyé devait être acquitté sont paramétrées par une durée, un offset et un débit. Cette classe impose donc une latence élevée en terme de communication descendante. Il faut donc attendre un message montant pour que le concentrateur puisse parler à l'objet.
2. *Classe B :* Cette classe est un compromis entre latence et économie de batterie. En effet, contrairement au mode A, où deux fenêtres étaient ouvertes après envoi d'un message à acquitter, celui-ci ouvre des fenêtres temporelles de réception périodiquement à des fréquences paramétrables. La latence est donc diminuée, en revanche, la consommation en est directement impactée.
3. *Classe C :* Ce mode doit-être utilisé pour des objets communicants ayant une alimentation spécifique. En effet, dès lors que le dispositif n'émet pas de messages vers le concentrateur, il est à l'écoute d'une transmission descendante. La latence est ainsi minimisée mais dans la majorité des applications utilisant cette classe, le nœud est alimenté sur secteur.

Ces trois classes peuvent néanmoins être implémentées sur des dispositifs communicants sur le même réseau.

Le Adaptative Data Rate, ou *Débit adaptatif* (ADR)

Cette fonctionnalité, propre au LoRaWAN permet d'optimiser le débit, le temps de propagation et la consommation de la batterie d'un objet. L'ADR, qui ne peut être utilisée seulement sur des nœuds statiques, collecte les données des 20 dernières transmissions telles que le compteur de trame, le Signal to Noise Ratio, ou *Rapport signal sur bruit* (SNR) et le nombre de concentrateurs qui ont reçu le message [47]. Dès lors, si l'historique présente des signes comme un haut SNR ou de nombreux concentrateurs captant le message, le coefficient du SF peut être revu à la baisse.

L'activation d'un équipement et sécurité

Le protocole LoRaWAN est basé sur un système d'identification. Un objet communicant doit donc être activé afin de pouvoir transférer de la donnée sur ce réseau.

Activer un nœud consiste à lui renseigner ces 3 paramètres :

— *Device Address* (DevAddr) : Similaire à l'IP du device
— *Application Session Key (AppSKey)* : clef AES128 permettant de crypter/-décrypter des packets applicatifs
— *Network Session Key (NwkSKey)* : clef AES128 permettant de crypter/décrypter des packets associés au réseau

Sachant que chaque objet, ou device, possède ces champs :

— *Device EUI (DevEUI)* : Défini l'ID d'un device
— *Application EUI (AppEUI)* : ID de l'application à laquelle le device est rattaché.

Il existe deux méthodes d'activation : l'Activation By Personalization (ABP) et l'activation On-The-Air (OTA).

— L'ABP est la méthode manuelle puisqu'elle active un device uniquement lorsque l'on a renseigné manuellement un DevAddr, une NwkSKey et une AppSKey.
— L'OTA est un outil permettant au device et au serveur de se mettre d'accord sur des clefs de cryptage (AppSKey et NwkSKey) et un DevAddr. Cette méthode d'activation est bien plus sécurisée que l'ABP car elle permet de créer dynamiquement des clefs de cryptage à chaque activation d'un device. Elle nécessite la transaction de deux messages : un JOIN_REQUEST et un JOIN_ACCEPT.

L'annexe A.1 montre la suite de la manipulation pour ajouter un nœud au réseau LoRaWAN des deux façons différentes.

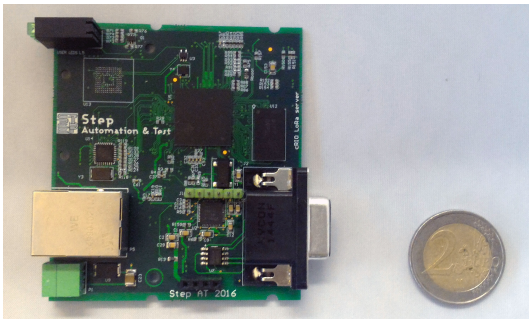
1.3.3.3 Application : Passerelle et capteurs

De nombreux clients s'intéressant de plus en plus à cette technologie, la branche recherche de Step AT s'est penchée sur la mise en place d'un réseau LoRaWAN dans sa globalité. Il a donc été question de réaliser non seulement les objets mais aussi le concentrateur. Après étude de la toute première spécification, nous avons choisi d'ouvrir le monde de l'IoT à l'univers de National Instruments en développant le premier module concentrateur CompactRIO [11] compatible LoRaWAN, permettant ainsi d'envoyer, de créer un réseau local et de superviser un environnement de capteurs. Le but est de s'imposer comme le premier partenaire NI à proposer des solutions clef en main sur ce type de réseau.

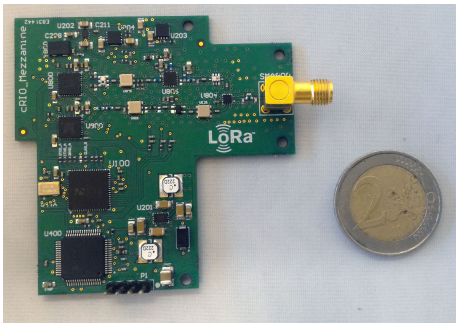
Nous avons donc réalisé une série de capteurs sans fil basés sur ce protocole réalisant différentes mesures telles que l'acquisition de température, d'humidité, de niveaux de cuve, de qualité de l'air, ... L'autonomie varie selon le type de capteur utilisé, mais nous obtenons en moyenne une durée vie pour chaque objet, sans intervention de notre part, d'au moins trois ans. Afin de connecter ces capteurs à un réseau, nous avons développé notre propre concentrateur avec serveur intégré, ce qui permet de proposer aux clients une application autonome. Une fois livré, le réseau est totalement privé et ne nécessite aucun abonnement. Notre passerelle, présentée en figure 1.17 est composée de deux cartes superposables afin de garantir un facteur de forme le plus petit possible pour qu'elle puisse rentrer dans un module CompactRIO. Les deux cartes électroniques sont les suivantes :

— *Carte mère :* Cette carte est le cœur du système puisqu'elle embarque le strict minimum nécessaire au fonctionnement d'un ordinateur à carte unique. Elle dispose d'un processeur ARM Cortex-A8 cadencé à 1 GHz, de 512 MB de RAM ainsi que d'un port Ethernet et d'une connectique permettant de relier notre module au système d'acquisition NI et ainsi transférer les données reçues. La carte mère, constituée de six couches, embarque un Operating System, ou *Système d'exploitation* (OS) Linux Debian.
— *Carte radio :* La carte fille, ou carte radio, est branchée directement à l'aide d'un connecteur et est basée sur le design de référence du module SX1301 de chez Semtech. Il sert de concentrateur LoRa d'un point de vue RF et reste piloté par la carte mère.

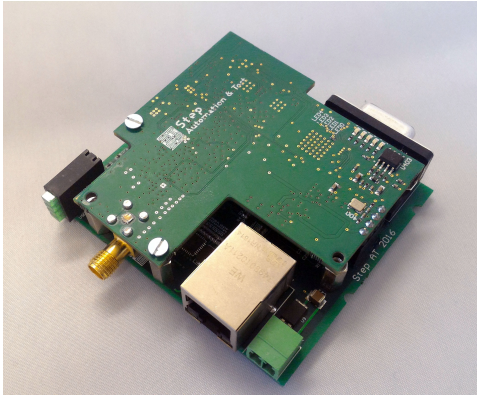
11. CompactRIO : plateforme matérielle National Instruments embarquant un coeur FPGA et un cœur temps réel, programmable en LabVIEW et personnalisable grâce à des modules complémentaires. Les derniers CompactRIO fonctionnent sur le système d'exploitation NI Linux Real-Time.



(a) Carte mère



(b) Carte radio



(c) Module complet

FIGURE 1.17 – Concentrateur LoRaWAN pour module CompactRIO

Afin de pouvoir servir de concentrateur LoRaWAN, la carte mère lance 3 processus au démarrage :

— Le *Packet Forwarder :* Fourni par Semtech, ce programme permet de transférer par UDP les messages radios LoRaWAN vers un serveur distant. Dès la réception d'un message, il décode la trame radio et pousse la donnée vers le serveur.
— Le *Semtech Bridge :* Ce code réalise l'interface entre les ports UDP (Montants et descendants) du *Packet Forwarder* et un topic MQTT [12].
— Le *LoRaWAN Server :* Il gère les sessions et l'encryptage entre les publications du *Semtech Bridge* et l'application.

Dès lors, chaque message reçu par le concentrateur peut-être lu par l'utilisateur final en sortie du *LoRaWAN Server*. Bien que ce dernier soit un serveur du marché, nous avons implémenté le notre disponible en annexe A.2, en LabVIEW, pour deux raisons. La première est que nous avons pu appréhender de manière complète la spécification LoRaWAN 1.0. Tandis que, dans un second temps, nous pourrons nous servir du code réalisé pour faire différentes applications, notamment de la caracté-

12. MQTT est un service de messagerie TCP/IP simple et extrêmement léger

risation de nouveaux modules RF. Step AT est alors la première société mondiale a proposer ce genre de matériel avec serveur intégré.

Enfin, nous avons pu commercialiser la solution dans sa globalité, à savoir la chaine de l'acquisition jusqu'à la supervision. Néanmoins, afin de répondre au plus juste aux demandes des clients, nous avons pris soin de mesurer les portées en conditions réelles, à savoir dans des environnements libres de tout objet pouvant obstruer le canal optique mais aussi dans des milieux urbain. Les portées obtenues sont affichées sur la figure 1.18

(a) Portée urbaine (b) Portée en ligne de vue

FIGURE 1.18 – Portée d'un capteur LoRa en pratique

Les tests, ont été réalisés dans l'agglomération Toulonnaise (83, France) réunissant les deux milieux. Les puissances d'émissions ont été réglées à +14 dBm (25 mW) et, afin de minimiser les interférences, nous choisi d'utiliser un SF fixe de 9.

La figure 1.19 représente le spectre du signal émis qui correspond parfaitement aux paramètres utilisés (Bande passante de 125 kHz et +14 dBm d'amplitude, réalisé avec un atténuateur 10 dB)

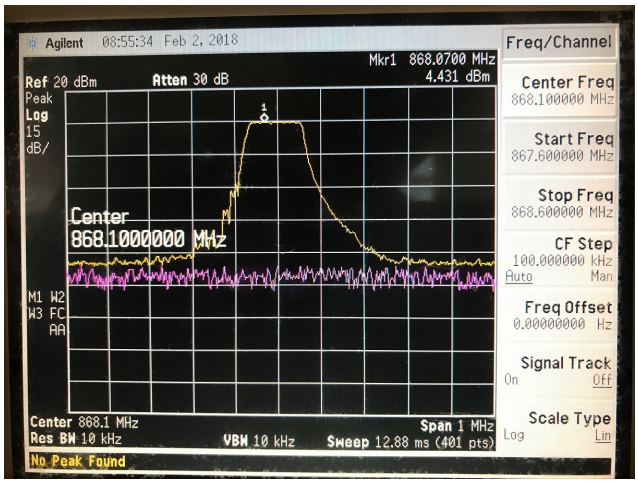


FIGURE 1.19 – Spectre du signal LoRa émis

Dans les deux cas de figure, le concentrateur était placé en ville, sur le toit d'un immeuble.

Lors du premier test, nous avons placé nos capteurs de température au sommet du mont Faron culminant à 584m et ayant une vue directe sur le toit de notre immeuble. Bien que la distance entre les modules, fixée à 3,2 kms, ne soit pas proche de la portée maximale pour ce type de communication, cette expérience à permis de satisfaire les différentes demandes de nos clients. De plus, nous avons pu optimiser l'échange jusqu'à transférer des données avec un SF7 tout en ayant une Received Signal Strength Indication, ou *Indication de la puissance de réception* (RSSI) de -113 dBm pour un SNR de 3 dB. Nous sommes donc loin de la portée maximale.

Le second test, réalisé en ville, donne des résultats bien différents de ceux obtenus en LOS. En effet, communiquer dans un milieu dense, en étant caché par plusieurs immeubles réduit considérablement la portée. La preuve en est, sur la figure 1.18a, nous n'avons pas pu dépasser 500m de distance en SF9.

Bien que ce dernier test offre, sur le papier, des résultats en demi teinte, il nous a permis d'assurer notre premier projet d'installation de réseau privé LoRaWAN dans la ville de Singapour. La demande initiale du client était de réaliser un réseau en étoile pour une cinquantaine de capteurs à base de matériel d'acquisition NI. Il s'agissait en fait de monitorer l'inclinaison de building suite à des excavations. Une mesure par jour devait être réalisée sur chaque immeuble environnant. Leur problématique résidait sur deux points : les communications pouvaient s'établir jusqu'à 500m et la précision des mesures d'inclinaison devait se rapprocher du millième de degré. La technologie LoRaWAN, ainsi que notre concentrateur pour CompactRIO répondait parfaitement au besoin et nous avons donc déployé notre réseau avec succès. L'autonomie des modules, tout comme la maintenance simplifiée grâce à une mesure du niveau batterie quotidienne permet d'apposer les modules sur les gratte-ciels et de les oublier pour quelques années. Plus précisément, cette autonomie est de l'ordre de 500 microampères en veille tandis qu'elle peut atteindre 70 mA pendant quelques secondes lors d'une émission RF.

1.3.3.4 Les limites

Ce réseau propose donc, en plus des caractéristiques principales des LPWAN telles la longue portée, la basse consommation et le bas débit, de véritables avantages par rapport à la concurrence. Outre les prix des composants radios très faibles permettant de limiter les dépenses d'investissement et l'autonomie impliquant des dépenses d'exploitations quasiment nulles, le fait de pouvoir créer un réseau privé et de ne pas être obligé de passer par des opérateurs est un réel atout. De plus, la sécurité obtenue à l'aide d'un encryptage AES128 permet une utilisation dans des domaines critiques. Enfin, il est tout à fait possible d'utiliser cette technologie dans des buts de localisation à l'aide d'une technique mesurant les écarts de temps d'arrivée du message entre différents concentrateurs.

Cependant, cette technique ne permet pas de remplacer un système GPS puisque

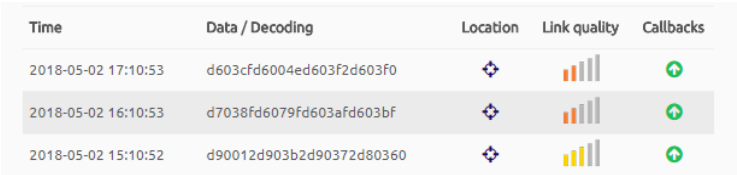
les précisions atteintes vont d'une vingtaine de mètres à 200m suivant les conditions [48]. De plus, certains paramètres restent également limitant lors du choix d'un réseau de communication sans fil et la latence en fait partie. Le bas débit, la communication descendante limitée et la latence font donc du LoRa un réseau limité pour des applications déterministes et temps réel. Des études telles que [49] ont aussi montré que le dimensionnement des concentrateurs est indispensable pour éviter des collisions à répétition et garantir le meilleur service possible.

1.3.4 Sigfox

1.3.4.1 Présentation

Depuis plusieurs années, la société SigFox s'est spécialisée dans un standard de communication M2M basé sur des réseaux bas débit et plus précisément sur la technologie LPWAN. Baptisé du même nom que sa société, le SigFox apporte depuis 2009, une solution clef en main aux problématiques de l'IoT[50]. La société arbore la double casquette fournisseur-opérateur télécom en proposant des modules RF par le biais de fournisseurs, des gateways ainsi que des abonnements mensuels ou annuels.

En France et dans de nombreux pays Sigfox opère et commercialise son réseau. Une fois que celui-ci est mis en place l'opérateur n'a plus qu'à proposer un abonnement et une plateforme pour récupérer les données. Dès lors, l'utilisateur a juste besoin d'acheter des objets du marché ou des puces RF à intégrer et inscrire son dispositif sur une interface web appelée *backend* (représentée en figure 1.20). Afin de réaliser cette manipulation il aura besoin d'un identifiant unique à chaque puce. L'objet sera alors en mesure de transmettre de la donnée. Directement disponible sur le *backend*, cette donnée peut être récupérée à l'aide de différents protocoles notamment via API rest.



Time	Data / Decoding	Location	Link quality	Callbacks
2018-05-02 17:10:53	d603cfd6004ed603f2d603f0			
2018-05-02 16:10:53	d7038fd6079fd603afd603bf			
2018-05-02 15:10:52	d90012d903b2d90372d80360			

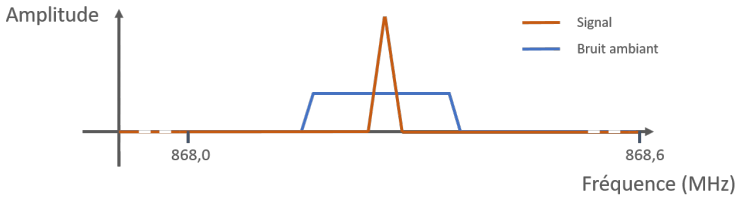
FIGURE 1.20 – Backend SigFox

Comparé aux autres LPWAN, cette technologie est fortement propriétaire. En effet, l'utilisateur est entièrement dépendant de la structure Sigfox, de l'état de l'infrastructure et des coûts d'abonnement. De plus, comme le montre le schéma précédent, la donnée passe directement par les réseaux internes à SigFox, c'est-à-dire qu'un client Sigfox sera toujours dépendant de l'état des serveurs et de leur infrastructure.

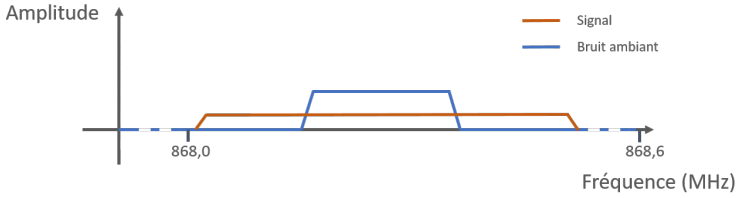
1.3.4.2 Spécificités techniques

D'un point de vue technique, Sigfox diffère du LoRaWAN de par sa modulation et ses débits. En effet, l'opérateur base ses échanges de données sur la technologie UNB qui concentre le peu d'énergie nécessaire sur une bande de fréquences la plus étroite possible. En l'occurrence, nous sommes ici sur un canal de 100 Hz lors de chaque émission alors que la bande passante disponible est de 200 kHz. Cela induit directement 2000 canaux de communications et évite ainsi au maximum les collisions.

La figure 1.21 compare le spectre des signaux utilisés dans les deux technologies LoRaWAN et Sigfox.



(a) Sigfox (UNB)



(b) LoRaWAN (Étalement de spectre)

FIGURE 1.21 – Spectres de signaux des deux principaux LPWAN

Une émission LoRaWAN 1.21b est basée sur un étalement de spectre. L'énergie est donc répartie sur différents messages couvrant une large bande de fréquences. Cela permet de communiquer sur de longues distances tout en s'affranchissant du bruit ambiant. Au contraire, la figure 1.21a présente un signal d'amplitude très élevée, bien au dessus du bruit, mais sur une bande très fine, c'est l'UNB.

De plus, le type de modulation employé pour faire transiter des informations n'est pas le même. En effet, Sigfox s'appuie sur la Differential Binary Phase Shift Keying (D-BPSK). Cette modulation est un dérivé de la BPSK qui véhicule l'information binaire à l'aide de la phase d'un signal de référence. Elle utilise plus précisément deux phases distinctes séparées de la moitié de la période, soit 180°. Les deux symboles possibles pour un bit à 1 ou à 0 sont donc représentés dans une trame disponible en figure 1.22

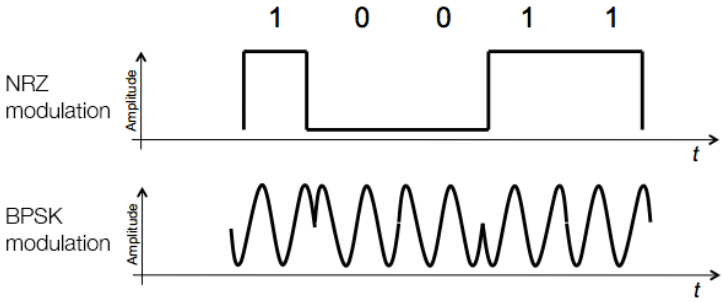


FIGURE 1.22 – Modulation BPSK [7]

La modulation BPSK nécessite généralement un récepteur cohérent dans l'étage de démodulation. Celui-ci doit ainsi comporter, entre autre, un dispositif de synchronisation. La D-BPSK permet de simplifier ce montage puisque un récepteur non cohérent peut être utilisé [51]. La différence vient alors du fait qu'au lieu d'envoyer les données binaires brutes, on remplace chaque bit par le XOR entre lui-même et celui qui le précède. Un bit "0" aura donc un signal avec une phase identique au dernier élément, tandis qu'un "1" verra son signal affecté par un changement de phase de 180°.

Chaque message Sigfox est donc une succession de deux types de symbole afin de représenter successivement les différents bits d'un message. En revanche, afin de garantir une meilleure fiabilité lors de la réception, un bit n'est pas seulement représenté par une période mais plusieurs. De plus, en tête de trame, une succession de 0 et de 1 est nécessaire afin de synchroniser correctement la trame.

Les deux technologies sont donc véritablement opposées mais permettent toutes deux de communiquer sur de grandes distances avec un bruit ambiant non négligeable.

De plus, lors d'une émission Sigfox, trois messages identiques sont envoyés sur trois canaux différents. Ainsi, si deux messages rentrent en collision ou bien qu'une fréquence est momentanément noyée dans un bruit, le deuxième ou le troisième message pourra transférer l'information avec succès. Cette notion est représentée en figure 1.23 où apparaissent une transformée de Fourier du signal en temps réel ainsi qu'une représentation 3D de l'amplitude du signal en fonction de sa fréquence sur l'axe des abscisses et du temps sur l'axe des ordonnées.

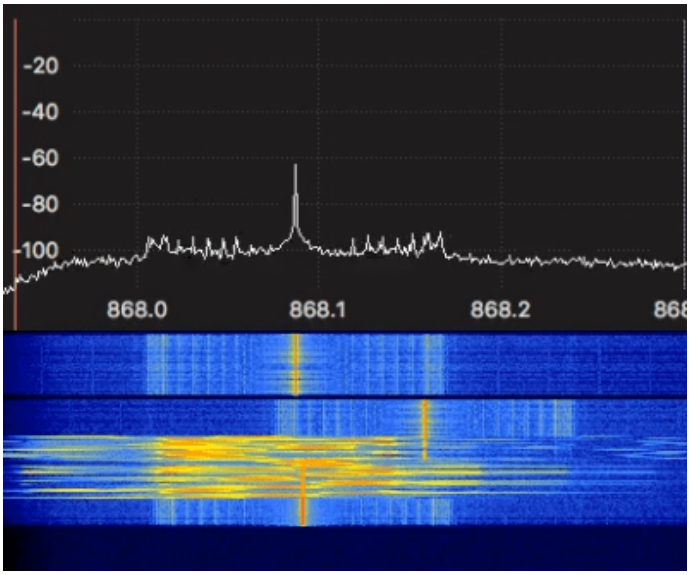


FIGURE 1.23 – Signaux Sigfox et LoRa [8]

Cette figure nous expose, pendant une courte durée, la transmission de deux signaux aux alentours de 868,1 MHz. Nous pouvons en effet visualiser la salve de trois messages Sigfox, en UNB, ainsi qu'un signal provenant d'un émetteur LoRaWAN dont le spectre est étalé sur un peu plus d'une centaine de kilohertz. Dans le cas présent, bien que deux signaux de technologies différentes se superposent, les deux transferts ont été réalisés avec succès. En effet, dans le premier cas, l'étalement de spectre permet de ne pas être interféré par le premier signal UNB. Dans le second cas, il faut attendre le troisième message Sigfox pour que le bande soit libre de tout bruit. En revanche, l'amplitude atteinte avec cette technologie est telle que le premier message avait déjà été transmis avec succès.

A l'instar du LoRa, cette technologie offre aux utilisateurs une consommation faible ainsi qu'une longue portée. Cette dernière est d'ailleurs une des meilleures dans l'univers des LPWAN grâce à la notion d'UNB. La distance en Line Of Sight, ou *Ligne de vue directe* (LOS) peut atteindre jusqu'à cinquante kilomètres. Toutefois le record atteint avec cette technologie est de l'ordre du millier de kilomètres en comptant sur des conditions particulières tel que le milieu utilisé. En effet, Il s'agissait d'une communication au dessus de la Méditerranée, entre l'Italie et l'Espagne. Cette portée induit un coût de mise en place du réseau bien plus faible que d'autres réseaux puisqu'il faut 1500 antennes pour couvrir le territoire Français [52]. C'est plus de deux fois moins que pour le LoRa et dix fois moins que pour le réseau cellulaire [53]. Bien que ces antennes soient nombreuses, il est tout de même possible de faire de la géolocalisation en fonction des antennes qui ont reçu le même message. La figure 1.24 est tirée du backend Sigfox qui affiche une zone probable d'émission. Cette localisation n'est pas assez précise pour remplacer les GPS mais peut être très utile dans certains cas d'usages où la justesse de la mesure n'est pas une priorité.

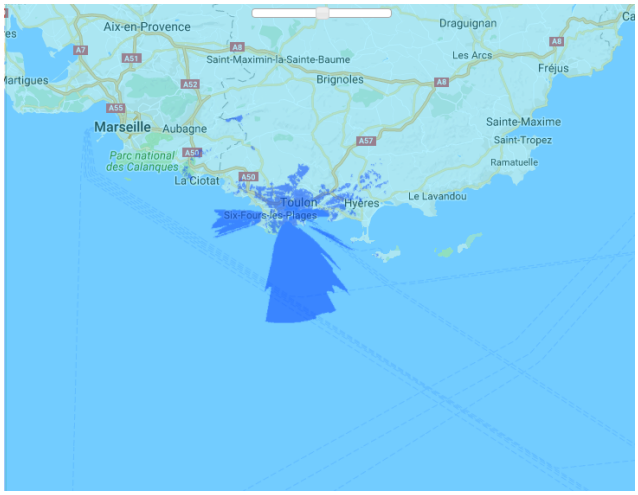


FIGURE 1.24 – Localisation SigFox

Ces communications restent néanmoins normalisées à 25 mW pour l'émission radio, ce qui correspond à un diminution de puissance d'un facteur 80 par rapport au GSM [54]. Ce n'est pas le cas aux États-unis où le réseau ne dispose pas seulement d'une puissance plus élevée mais aussi d'un débit accru. En effet, celui-ci est de 600 bps outre Atlantique [55], alors qu'il reste à 100 bps en France.

Contrairement aux autres réseaux du secteur, Sigfox impose à ses utilisateurs un nombre de messages limité ainsi qu'une taille réduite. Plus précisément, la donnée utile dans un message ne peut dépasser 12 octets afin de limiter la taille globale de la trame, en comptant notamment les champs d'adresse, d'authentification et détection d'erreur (Cyclic Redundancy Check (CRC)) à 26 octets. Le but de cette spécification est de garantir un temps maximum d'émission de 6 secondes et ainsi préserver la batterie du nœud communicant. Il est alors possible, en diminuant la taille de la donnée à transférer, de diminuer le temps d'envoi. En revanche, puisque le rapport donnée utile - taille totale est approximativement de 50% il est très difficile de réduire considérablement le temps d'émission. Par exemple, dans certaines applications même une trame vide permet de véhiculer de l'information.

Ce temps d'émission est d'autant plus important que dans ces bandes de fréquence le *duty cycle* doit être respecté. Fixé à 1% du temps par heure, cela représente 6 messages de 12 octets toutes les 60 minutes et 140 émissions par jour.

Enfin, le réseau proposant une communication bi-directionnelle, il est envisageable d'envoyer des données depuis le backend vers un objet en particulier. Toutefois, le lien est asymétrique puisqu'il n'est théoriquement pas possible de générer plus de 4 messages par jour de 8 octets. En pratique, ce seuil peut être dépassé si seulement le concentrateur qui émet respecte le *duty cycle*.

Toutes ces caractéristiques font de Sigfox un acteur majeur dans le monde des

LPWAN. Pour rendre cette technologie mature, les créateurs de ce réseau ont dû effectuer des compromis afin de démarquer leur produit de la concurrence. Le réseau ne convient donc pas pour tous les types d'applications.

1.3.4.3 Les limites

Cette technologie est en réalité très simple à mettre en place et à utiliser. De plus, le réseau étant identique dans le monde entier, il n'y a aucune difficulté de connexion due à la notion de *roaming*[13]. Il faut néanmoins rester prudent sur la fréquence utilisée par un objet afin d'être en adéquation avec la norme de la région courante.

Le choix de Sigfox de limiter la consommation est judicieux pour de nombreuses applications. En contrepartie, la taille des messages très faible ainsi que la fréquence d'émission maximale d'un 1 message toutes les dix minutes limite également les usages.

La technologie UNB et la forte amplitude des signaux fiabilisent grandement ce moyen de communication. Toutefois, du fait que l'émission d'un message dure plusieurs secondes, Sigfox n'est pas une technologie performante lorsque l'objet est en mouvement.

1.3.4.4 Expérimentations

Afin de pouvoir proposer à nos clients une expertise globale sur les acteurs majeurs des réseaux bas débit - longue distance nous avons mis en place une solution de supervision de la température et de l'humidité sur des domaines viticoles. Cela permet donc de suivre en temps réel des grandeurs indispensables à la qualité finale en utilisant nos propres design électroniques. Les capteurs étant à des positions fixes, dès lors que les objets n'étaient pas derrière des murs très épais (>50 centimètres) ou dans des souterrains profonds, aucune trame n'a été perdue.

En revanche, suite à la demande accrue de placement de capteurs sur des objets en mouvement nous avons également réalisé une série d'études sur la fiabilité de cette technologie avec des dispositifs placés dans ces conditions.

Parmi tous les tests effectués, nous avons choisi de présenter un voyage sous couverture Sigfox. Le but de cette expérience est de montrer la fiabilité de la communication durant 24 heures en définissant cinq phases distinctes :

1. 22h00 -> 04h30 : le capteur est fixe, positionné dans une pièce d'une maison située dans l'arrière pays Varois.
2. 04h30 -> 05h45 : Ici, le capteur est en mouvement. Il est placé à l'intérieur d'une voiture qui fait le trajet vers la gare de Toulon. La vitesse est variable, entre 10 et 110 km/h.

13. Le *roaming* est une fonctionnalité permettant d'utiliser un objet sur un réseau même si celui-ci n'est pas détenu par l'opérateur initial..

3. 05h45 -> 09h45 : Durant cette phase, l'objet est soumis par moments à un environnement comportant du relief mais surtout à une vitesse bien plus élevée pouvant avoisiner les 310 km/h.
4. 09h45 -> 12h00 : Cette phase est composée de marche à l'air libre et de transports en commun tels que le métro.
5. 12h00 -> 22h00 : Enfin, le capteur est placé sur le bureau d'une chambre d'hôtel en banlieue Parisienne.

Le module choisi pour ces tests, réalisé en interne en suivant les recommandations pour le design d'antenne, est un capteur de température/humidité/pression utilisé pour notre problématique viticole. A l'aide du port USB disponible en façade, nous avons paramétré une fréquence d'envoi toutes les 10 minutes afin de respecter le *duty cycle* et d'envoyer un maximum de trames.

Le jour J, nous avons suivi l'évolution de la température, et la présence ou non de nouvelles données, à l'aide d'un site web développé pour l'occasion. Celui-ci stocke les points dans une base de données et les affiche en temps réel. La figure 1.25 représente les températures obtenues pendant les 4 premières phases du test. La dernière étape étant réalisée dans les mêmes conditions que la première, elle n'est pas affichée pour garantir une meilleure lisibilité sur les zones en mouvement.

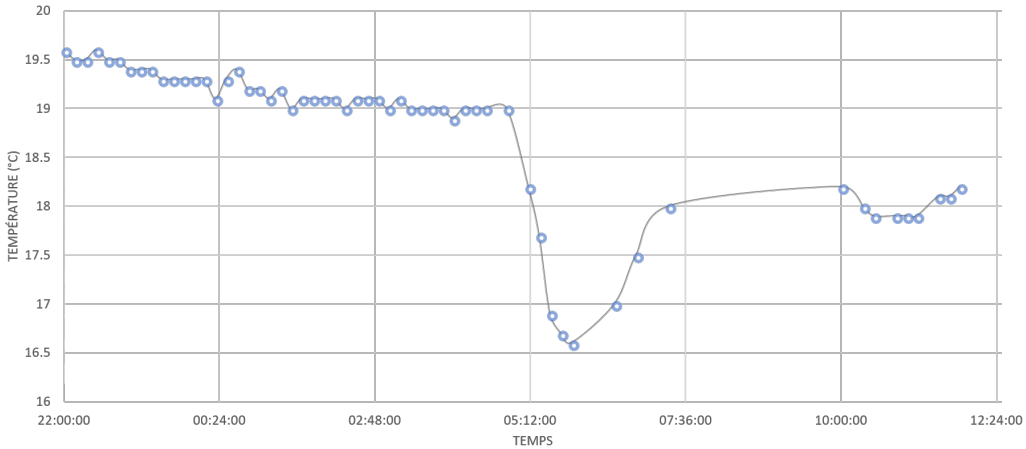


FIGURE 1.25 – Un voyage sous couverture Sigfox

Les résultats obtenus sont en adéquation avec la théorie énoncée précédemment. En effet nous ne rencontrons aucune difficulté à transmettre l'information lorsque l'objet est immobile tandis que des points sont perdus dans le cas où il est en mouvement. Nous voyons effectivement sur la figure 1.25 une densité de relevés nettement moins importante lors de ces phases.

La figure 1.26 représente la proportion de messages reçus par rapport aux messages envoyés sur les cinq phases de test. Les durées de celles-ci étant différentes, le nombre d'échantillons varie d'une phase à une autre.

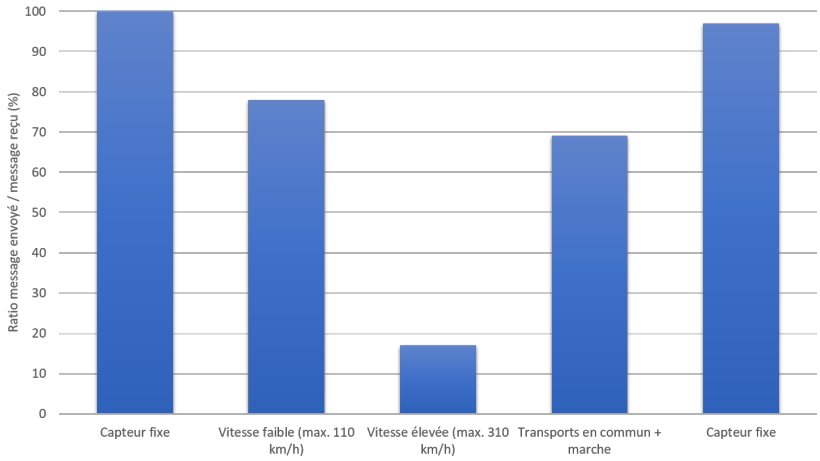


FIGURE 1.26 – Probabilité de réception en fonction de la vitesse de déplacement

En conclusion, il est toute de même possible de communiquer sur des réseaux Sigfox si les objets sont en mouvement. Il faut néanmoins que l'application n'ait pas besoin d'une latence très faible. Par exemple, si un utilisateur a besoin de récupérer les coordonnées GPS d'un véhicule au moins une fois par jour, il peut tout à fait répondre à son cahier des charges en utilisant cette technologie qui transmettrait alors ses données le plus rapidement possible afin d'assurer une fiabilité maximale.

1.3.5 Les antagonistes

Ces réseaux, particulièrement adaptés à l'univers de l'Internet de Objets, rencontrent cependant des problématiques de mise en place. En effet, le déploiement de l'infrastructure servant à couvrir un territoire donné est extrêmement couteux. Ainsi, comme abordé dans la section 1.3.2 certains industriels ont orienté leur objets vers des réseaux cellulaires ayant des caractéristiques propres aux LPWAN qui s'appuient sur des antennes existantes. Ce développement est devenu possible grâce à de nouvelles normes permettant aux modules cellulaires de consommer une quantité très faible d'énergie dans des cas particuliers.

Bien que ces technologies, poussées par des grands groupes et standardisées par la 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [14], n'impliquent pas de devoir mettre en place une infrastructure dans sa globalité, elles ne sont pas encore rependues. Leur mise en place restant complexe, imposant un allongement des délais de déploiement, d'autres technologies ont eu le temps de devenir matures. Néanmoins, certaines caractéristiques font des LPWAN cellulaires de sérieux candidats à la course du nombre de dispositifs connectés.

14. Coopération entre organismes de standardisation qui publie les spécifications techniques pour les réseaux mobiles de 3° génération

1.3.5.1 NB-IoT

Le NB-IoT, porté par quelques grands groupes de télécommunications tels que T-Mobile, Vodafone ou Huawei se rapproche d'un modèle bon marché et propose des débits plus faibles que son concurrent direct, le LTE-M.

Ce réseau de communication est basé sur la technologie bande étroite et propose l'utilisation de bandes de fréquences de 200 kHz. Le fait est que le spectre fréquentiel global est une ressource limitée, il faut donc l'utiliser de la façon la plus efficiente possible [56]. Ainsi, en utilisant l'NB-IoT, la communication peut être mise en œuvre de trois façons différentes illustrées sur la figure 1.27 :

— De façon totalement autonome ou bien en utilisant des canaux GSM réaffectés
— En réutilisant des blocs LTE [15] libres
— En se servant des fréquences inutilisées dans les intervalles de garde des porteuses

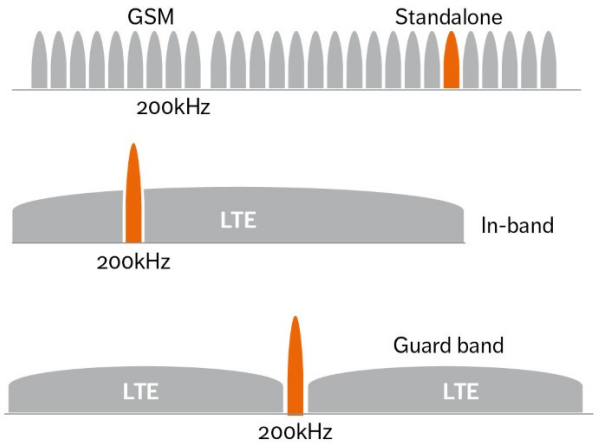


FIGURE 1.27 – Options d'utilisation du spectre pour la technologie NB-IoT

Les infrastructures sont dans la majorité des cas déjà déployées. Il n'y a donc pas besoin de construire un nouveau réseau. En revanche, suivant certaines options, il faut rajouter un modem peu couteux qui induit un réel inconvénient de logistique par rapport à son concurrent direct. A contrario, un avantage notoire du NB-IoT est de proposer un réseau sans passerelle puisque tous les messages sont directement envoyés vers le serveur principal.

Cette technologie permet donc de proposer aux utilisateurs une durée de vie des batteries de 10 ans en théorie, due notamment au fait que les signaux ont des formes simples à traiter. Le débit maximum est quant à lui de 250 kbps et permet de couvrir ainsi, des applications infaisables avec des LPWAN classiques.

15. Norme de troisième génération proche de la 4G, en constante évolution

1.3.5.2 LTE-M

De son côté, le LTE-M est rentré dans la course avec des arguments impressionnants comparés au NB-IoT. Coexistant avec le 2G, 3G et le LTE sa technologie ne nécessite pas un changement des stations de base ni de l'infrastructure en règle générale. Il faut néanmoins réaliser une mise à jour logicielle à distance qui implique une indisponibilité du réseau et un coût négligeable. De plus, ses taux de transferts plus élevés à hauteur de 384 kpbs permettent de supporter des applications vocales, sa latence très faible avoisinant les 50 ms permettant de faire communiquer des objets en mouvement tels que des voitures et ses communications basées sur un protocole TCP-IP ont attiré un nombre d'acteurs croissants, notamment 9 des plus grands opérateurs mondiaux tels que AT&T, Verizon ou Orange.

1.4 Bilan : Les LPWAN sont-ils en train de changer les communications ?

Les avancées technologiques au cours de ces dernières années ainsi qu'une continuité dans la mise en place des infrastructures ont fait de 2017 une année qui aura creusé l'avance de LoRa et Sigfox sur les autres LPWAN non cellulaires, alors que la prise de part de marché est aujourd'hui critique pour ces deux technologies face aux déploiements massifs du NB-IoT et LTE-M prévus très prochainement.

Toutefois, les porteurs de ces derniers rencontrent des difficultés à les mettre en place. A tel point que Sigfox a eu le temps de couvrir plus 700 millions de personnes à travers le monde et LoRa opère dès à présent dans 41 pays. Sur le papier, le NB-IoT et le LTE-M sont donc très prometteurs mais il est difficile de prévoir la place qu'ils occuperont parmi leur concurrents.

D'ici 2021, 700 millions d'objets seront connectés à l'aide de réseaux LPWAN [57] dont les principaux sont listés dans la table 1.2.

	SigFox	LoRaWAN	Ingenu	Weightless-W	Weightless-N	Weightless-P
Bande	EU(868MHz), US(902 MHz)	EU(433 et 868MHz), US(915 MHz)	2,4 GHz	470-790 MHz	EU(868MHz), US(915 MHz)	Sub-GHz
Portée	50km	15km	15km	5km	3km	2km
Communication symétrique	X	✓	✓	✓	X	✓
Topologie du réseau	Étoile	Étoile d'étoiles	étoile	étoile	étoile	étoile
Taille donnée utile montante	12B	Jusqu'à 250B	10kB	>10B	20B	>10B
Sécurité	X	AES 128b	AES 256b	AES 128b	AES 128b	AES 128/256b

Table 1.2 – Spécifications techniques des acteurs majeurs des LPWAN

De par le cœur de métier de l'entreprise, nous sommes en première ligne pour étudier les besoins d'innovations de nos clients. Nous avons vu au cours de ces trois dernières années deux notions particulières prendre le dessus :

— Le cloud ainsi que le big data
— Les communications bas débit

De prime abord ces deux notions ne vont pas ensemble, à juste titre puisqu'elles ne ciblent pas les mêmes applications. Nous sommes actuellement en train de vivre une disruption avec la mise en place d'algorithmes prédictifs et cognitifs qui nécessitent d'énormes flux des données. L'avènement des communications bas débit joue en fait un rôle important puisque même si la quantité de données remontées par un objet est faible, leur nombre est conséquent. Ces deux notions sont donc, en fait, étroitement liées.

Depuis des années maintenant, lorsque nous parlons communications nous parlons immédiatement de débit. Aujourd'hui, et dans la grande majorité des cas, lorsque l'on met en place une application basée sur l'IoT, nous réfléchissons plutôt en nombre de messages journaliers. Les notions telles que la basse consommation et la longue portée prennent donc le pas sur une maximisation du débit.

En revanche, cette technologie atteint quelques limites. Notamment puisque certains cas d'usages restent infaisables étant donné que le trio portée/débit/consommation reste un compromis. De plus, certaines études telles que [49] montrent que ces réseaux risquent de subir de fortes interférences dans un premier temps et une surcharge dans un second temps. De plus aucune étude n'a pu prouver que ces ondes n'étaient pas nocives pour l'être humain. Il faut donc trouver des alternatives afin de pouvoir continuer à faire communiquer des objets et ainsi limiter les émissions d'ondes dans les bandes ISM.

Chapitre 2

Un système de communication non invasif : La lumière

"Ne voit la lumière que celui qui est éclairé."

Réda Hadjouti

Sommaire

2.1 Les origines **61**
2.2 Communiquer par la lumière au 21° siècle **63**
2.2.1 Principe de fonctionnement 63
2.2.2 La technologie 63
2.2.2.1 La source lumineuse 64
2.2.2.2 Le photo-récepteur 65
2.3 Intérêt et champs d'application **66**
2.3.1 La communication véhicule à véhicule 67
2.3.2 Les communications sous marines 67
2.3.3 Le milieu hospitalier 69
2.3.4 Le LiFi 70
2.4 Les structures des expérimentations **72**
2.4.1 Axes de réflexion 72
2.4.2 Notions de codage de l'information 73
2.4.2.1 Les méthodes de codage numérique en bande de base 73
2.4.2.2 La modulation du signal 76
2.4.2.3 La DPPM appliquée 77
2.4.3 Module d'émission 79
2.4.3.1 Carte électronique 79
2.4.3.2 Logiciel de commande 81
2.4.4 Module de réception 84
2.4.4.1 Carte électronique 84
2.4.4.2 Logiciel de réception 87
2.5 Conclusions expérimentales **88**

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les ondes électromagnétiques (OEM) appartenant aux bandes ISM [1] (inférieures à 1 GHz) apportent certaines limites, notamment d'un point de vue dimensionnement des réseaux ou risques sur la santé. De plus, la latence de l'ordre de la seconde nous empêche de synchroniser les données inter-capteurs. Dans le but de changer d'approche, nous nous sommes penchés sur les Optical Wireless Communications (OWC).

Les OWC sont répartis en 3 bandes distinctes :
— Ultra Violet Communications (UVB-C)
— VLC
— Free Space Optics (FSO). Cette dernière est répartie en 3 blocs avec le proche Infrarouge (IR) et 2 sous bandes correspondant aux fibres optiques.

FIGURE 2.1 – Répartition des bandes dans les OWC

Cependant, les systèmes que l'on développe sont amenés à être utilisés dans des environnements habités par l'homme. Les ultraviolets étant nocifs pour le corps humain et l'infrarouge pour les yeux si la puissance n'est pas contrôlée, il a fallu adapter l'étude à la bande du milieu, plus étroite, qui est celle du visible. L'étude portera donc sur la bande VLC.

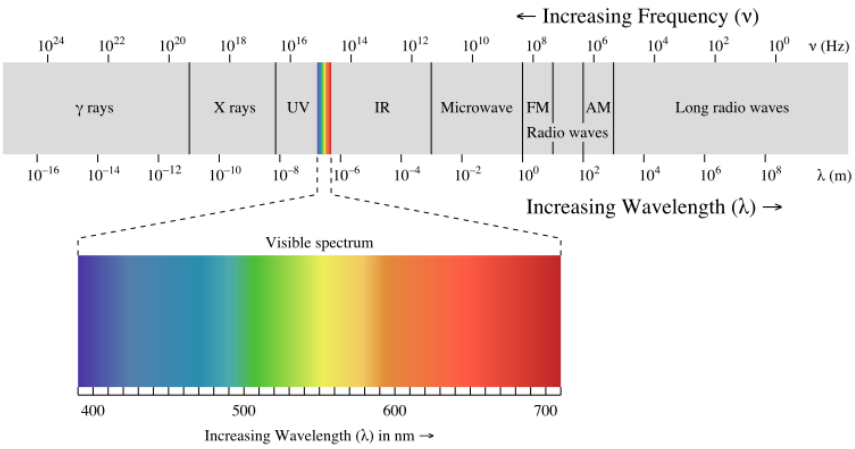


FIGURE 2.2 – Spectre électromagnétique [9]

1. Bandes de fréquence pouvant être utilisées dans un espace réduit pour des applications industrielles, scientifiques, médicales ou domestiques

L'indice de réfraction de l'air étant très proche de 1,0003 dans les couches basses de l'atmosphère [58] nous pouvons considérer que la vitesse d'une OEM dans ce milieu est égal à la célérité de la lumière dans le vide. A savoir environ 300 000 km/s.

Étant donné que nous souhaitons faire communiquer des objets à une distance de l'ordre de quelques mètres, les délais de réception de messages vont être extrêmement faibles. Dès lors la synchronisation va grandement gagner en précision. De toutes les solutions retenues, celle-ci semble être la plus adaptée pour les problématiques de synchronisation multi-capteurs.

De plus, cette bande est non régulée, ce qui permet de l'utiliser directement sans avoir besoin de licence.

2.1 Les origines

L'histoire de la communication est aussi ancienne que l'histoire de l'humanité. Depuis les origines, l'homme a eu besoin de communiquer. Il a donc inventé des procédés différents à l'aide de codes, de gestes, d'alphabets et même de langages.

De tout temps, l'objectif a été de communiquer vite et loin. Or, vers l'an 500 avant J.-C. il était difficile de se déplacer autrement qu'à pied.

La fameuse histoire de Philippidès, un messager grec, qui a donné sa vie pour parcourir le plus vite possible la distance de 40 kilomètres entre Marahton et Athènes pour annoncer la victoire des grecs contre les perses le confirme, il y a un réel besoin d'améliorer les moyens de communication.

Entre l'an 500 et 450 avant J.-C. Homère et Eschyle s'illustrent dans l'art d'utiliser la lumière pour transmettre l'information [59]. Le premier procède à l'installation de feux pour signaler une flotte venue aider les assiégés tandis que le second optimise encore plus le principe. En effet, dans Agamemnon, Eschyle détaille les relais lumineux. Ceux-ci étaient placés aux sommets de montagnes grecques et, par continuité, ils permettaient d'émettre des messages sur 550 kilomètres.

Vers 150 avant J.-C. les romains reprennent un procédé qu'ils perfectionnent : les tours à feu [60]. Ils construisent ainsi le long des routes de leurs territoires, vers 150 avant Jésus-Christ, des tours à feu à cinq torches, dites de « Polybe », qui permettent de transmettre des messages lettre à lettre. Le réseau part de Rome pour traverser les Gaules et l'Espagne, pénètre en Afrique, puis revient en Italie. Ces tours révèlent toute leur efficacité dans la lutte contre les invasions barbares. Après la chute de l'empire, les tours à feux continueront d'être utilisées, notamment par la république de Gênes jusqu'à la fin du XVIIIe siècle.

C'est en 1794 que Chappe propose le télégraphe optique (tours avec des bras articulés dont la position codifie l'alphabet). Ce projet plut en raison de la rapidité de transmission par rapport aux messages transportés par cheval. La nouvelle annonçant la reprise du Quesnoy, prélude à la victoire de Valmy, fut le premier message transmis.

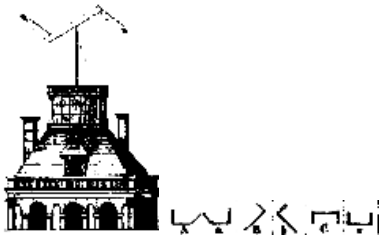


FIGURE 2.3 – Télégraphe optique [10]

Le principe de communication par la lumière n'a pas subi de grande révolution pendant quasiment deux millénaires. Il faut attendre la fin du XIXe siècle pour voir une évolution majeure grâce à l'inventeur du téléphone Graham Bell.

A la fin de l'année 1879, Bell et Tainer fabriquent un prototype permettant de communiquer en extérieur. Le ciel doit être clair et le soleil visible [61]. Techniquement le transmetteur consiste en un cornet acoustique à l'extrémité duquel est fixée une fine membrane souple argentée. Un ensemble de lentilles concentre les rayons lumineux du soleil sur cette membrane qui réfléchit le rayon à travers un autre ensemble de lentilles vers l'organe de réception. Le récepteur est équipé d'un réflecteur parabolique qui collecte les rayons lumineux et les concentre sur un barreau de sélénium placé à son point focal. La cellule de sélénium est insérée dans un circuit électrique constitué d'une batterie et d'un écouteur téléphonique. Lorsqu'un son est émis dans le cornet acoustique du transmetteur, il entraine des vibrations de la membrane argentée. Le rayon lumineux est alors lui même affecté par ces vibrations. Quand le transmetteur et le récepteur sont placés en parfait alignement, ce rayon lumineux modulé agit sur le cristal de sélénium qui voit sa résistance varier au rythme de la modulation entrainant une variation de courant électrique, et en conséquence une reproduction du son initial dans l'écouteur. Le photophone est né.

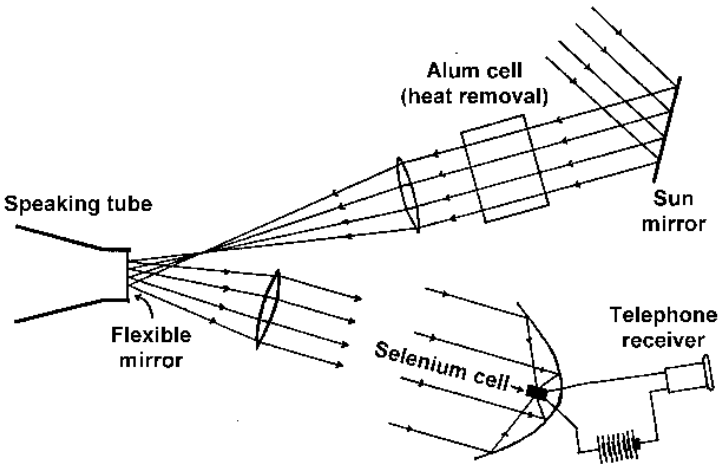


FIGURE 2.4 – Schéma du photophone de Bell [11]

On peut considérer cette invention comme un point marquant dans l'avènement des VLC et plus précisément des communications LiFi.

2.2 Communiquer par la lumière au 21° siècle

Le photophone, ancêtre de la technologie LiFi, comporte une contrainte technique non négligeable qui est sa source lumineuse. Le fait de communiquer grâce aux rayons du soleil entraine une incapacité totale de fonctionnement aussi bien par mauvais temps que lors d'une utilisation en intérieur.

Dans le but de communiquer en toute circonstance il est donc indispensable d'apporter à un système optique communiquant sa propre source lumineuse.

2.2.1 Principe de fonctionnement

Un système optique communiquant est composé de deux blocs principaux : un bloc d'émission et un bloc de réception. Ils sont représentés en figure 2.5. L'espace situé entre ces deux systèmes s'appelle le canal optique. Celui-ci joue un rôle important dans la représentation finale de la donnée. En effet, les contraintes environnementales ne sont pas les mêmes lors d'une communication dans l'air ou bien dans l'eau, possiblement salée, par 30 mètres de fond.

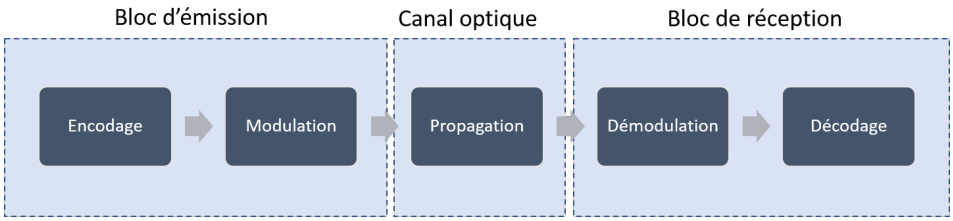


FIGURE 2.5 – Cheminement d'une donnée

En premier lieu, la donnée est encodée afin de rendre la transmission plus sure et robuste face aux dégradations subies dans le canal optique. Cette donnée est convertie en signal lumineux à l'aide d'un étage électronique composé de une ou plusieurs sources lumineuses. Ce circuit permet de faire varier l'intensité lumineuse des sources en fonction de la donnée à transmettre. Cette variation n'est autre qu'une modulation de l'intensité. Lors de la propagation dans le canal optique le flux lumineux se déforme en raison de l'environnement, des obstacles ou des conditions météorologiques. Le bloc de réception récupère donc une information plus ou moins biaisée. Ce signal reçu par un photo-récepteur est ensuite converti en courant électrique, démodulé et décodé.

2.2.2 La technologie

A l'instar du principe de fonctionnement de la communication par voie lumineuse, la technologie d'un système optique communiquant est basée sur deux organes

principaux. L'un sert à émettre de la lumière et l'autre à la détecter.

2.2.2.1 La source lumineuse

Depuis la fin des années 60 une nouvelle technologie nommée Light Emitting Diode, ou *Diode électroluminescente* (LED) a le vent en poupe. Révolutionnaire par rapport à toutes ses qualités en comparaison aux systèmes lumineux existants, ce dispositif est la clé de voûte des systèmes VLC grâce à son inertie lumineuse quasiment nulle. On est sur un ordre de grandeur de plusieurs millions de commutations par secondes. La figure 2.6 illustre ce propos puisqu'il s'agit de la réponse d'une LED standard à un signal carré. Il faut effectivement un certain temps pour que l'intensité finale soit atteinte. De même lorsqu'il s'agit d'éteindre la LED, un temps de réponse est observable.

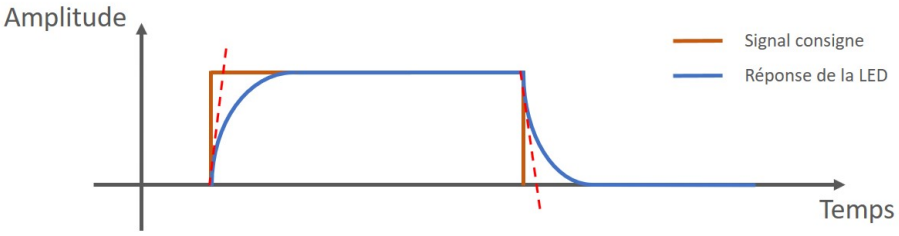


FIGURE 2.6 – Temps de réponse d'une LED

Ce temps de réponse, symbolisé par les tangentes (en rouge), est variable suivant la qualité des LEDs utilisées. En général, il vaut environ une dizaine de nanosecondes.

Le développement de cette technologie suit la loi de Haitz [62]. Analogue à la loi de Moore, elle prévoit que les puissances lumineuses des LED doublent tous les trois ans, pour des prix divisés par 10 tous les dix ans [63].

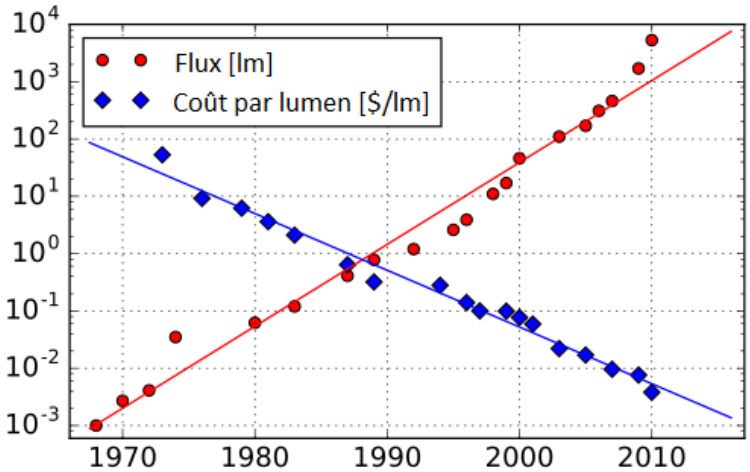


FIGURE 2.7 – Loi de Haitz [12]

Les systèmes communicants d'aujourd'hui ont besoin d'une source lumineuse suffisamment puissante pour fonctionner sur une distance de quelques mètres. Ils pourraient alors faire passer de l'information tout en éclairant un pièce, une rue ou tout autre lieu public. En partant de la figure 2.8, 450 lumens suffisent à éclairer la majorité des pièces. En corrélant ce résultat à la courbe de la figure 2.7, on montre que d'un point de vue technologique les VLC et plus précisément le LiFi n'auraient pas eu de sens avant la fin de années 2000.

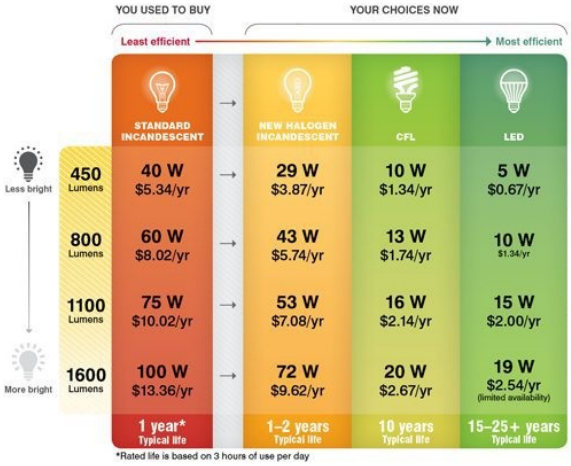


FIGURE 2.8 – Comparatif des différents types d'ampoules [13]

Enfin, outre cette faculté d'inertie lumineuse extrêmement faible, les LED disposent d'atouts majeurs permettant de les embarquer sur cartes industrielles comme grand public :

— Facilité d'intégration
— Consommation inférieure ou équivalente aux lampes classiques (cf figure 2.8)
— Résistance aux chocs
— Taille extrêmement faible
— Longue durée de vie
— Fonctionne en très basse tension
— Bas coût

Il est à noter que chaque point est indispensable à un bon projet relatif à l'Internet des Objets.

2.2.2.2 Le photo-récepteur

Un photo-récepteur est un transducteur de lumière qui donne un signal électrique en réponse à un rayonnement optique incident sur la surface du capteur. Les photo-récepteurs sont des mécanismes capables de convertir l'énergie optique en énergie électrique.

Il existe trois types principaux de photo récepteurs dont les caractéristiques sont

précisées sur la figure 2.9

Device	Photo resistor	Photo diode	Photo transistor	Photo diode and current amplifier	Photo diode, current amp, ADC and filter
Referenced part #	PDV-P500X	Everlight DTD-15	Everlight DPT-092	EL7900	ISL29001
Accuracy	Not guaranteed	Not guaranteed	± 75%	± 33%	15-bit resolution
Current (1000 lux)	Varies	3 µA	2.6 mA (70 klux)	0.9 mA	0.3 mA
Range	1 to 100 lux	7 to 50 klux	1 k to 100 klux	1 to 100 klux	0.3 to 10 klux
Response time	55 ms	6 ns	15 µs	0.5 ms	100 ms
Enable function	No	No	No	Yes	Yes

FIGURE 2.9 – Comparatif des différents types de photo-récepteurs [14]

Lors d'une communication optique, et comme nous l'avons vu pour la LED, il est primordial de minimiser le temps de réponse. Plus celui-ci est petit, plus on minimise les états intermédiaires dont il est difficile de déduire une valeur. En diminuant ce temps de réponse il est alors possible d'augmenter la vitesse de communication.

Le temps de réponse de la photo-résistance ne lui permet pas de prendre part dans les solutions retenues pour une preuve de concept.

Utiliser un photo-transistor permet de jouir d'une sensibilité très élevée. Cet atout majeur sur la photodiode perd de sa valeur puisqu'en couplant un étage d'amplification de transimpédance sur celle-ci nous pouvons augmenter la sensibilité de façon significative.

Bien que la vitesse de transmission ne soit pas, pour le moment, une priorité dans nos essais, nous avons privilégié la photodiode pour éliminer cette problématique future. Ses caractéristiques font de ce photo-récepteur un candidat parfait aussi bien pour la réception d'un signal lumineux classique que d'un signal modulé.

Enfin, dans le but de garantir une communication optimale même dans des conditions de luminosité très basses, nous avons opté pour une photodiode à avalanche. Ce type de détecteur peut se révéler très sensible puisqu'il est capable de ne détecter qu'un seul photon [64]. Il faudra en revanche veiller à une parfaite stabilisation de la tension inverse. Cela en fait un très bon candidat de récepteur FSO.

2.3 Intérêt et champs d'application

Des caractéristiques fondamentales comme une basse consommation, une large bande passante, un aspect non invasif ou encore le support d'une bande de fréquences

libre et non régulée donnent une forte attractivité à la VLC. De plus, le fait que ce type de communication soit basée sur la technologie LED implique un nombre d'installations déjà existantes considérable. Dès lors, une multitude de cas d'usages s'appuient sur ces points clés.

2.3.1 La communication véhicule à véhicule

A l'heure d'aujourd'hui, la majorité des voitures disposent de feux LED. C'est même une obligation pour les feux avants. Afin de concevoir un système VLC il manque donc des photo récepteurs aux véhicules. Or, le département de la surveillance de la sécurité des transports (NHTSA) veut rendre les caméras de recul obligatoires dès 2018 [65]. Certains pays devraient suivre ce mouvement et cela permettra ainsi de rendre les véhicules de moins de 4,5 tonnes totalement connectés par la lumière.

Bien que le principal intérêt de ces caméras soit de sécuriser les manœuvres, elles seront désormais utiles pour transmettre des informations routières aux autres véhicules. Ainsi, ces systèmes pourront avertir de collisions imminentes, aider à coordonner les régulateurs de vitesse ou vérifier que des changements de voies sont possibles.

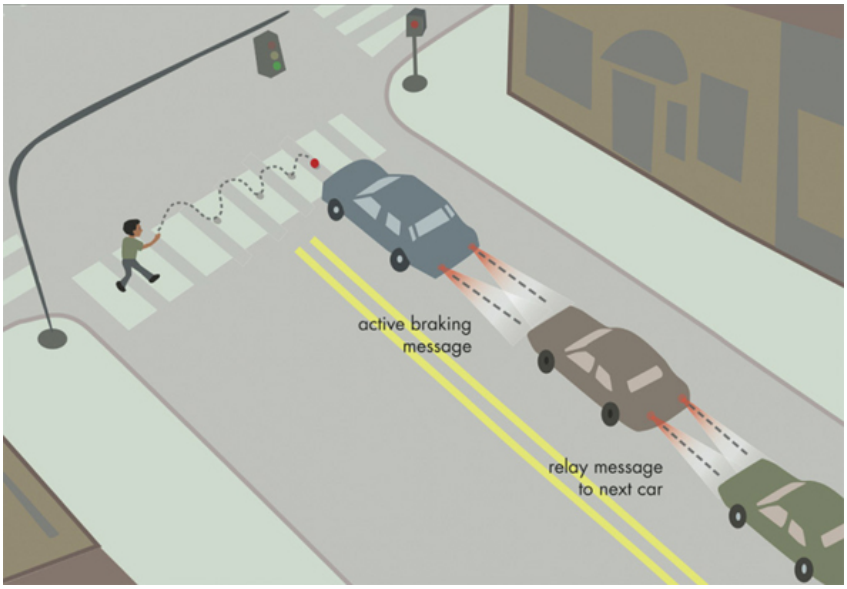


FIGURE 2.10 – Système d'alerte inter-véhicules [15]

2.3.2 Les communications sous marines

Actuellement, lorsqu'on parle de communications sous marines, différents moyens s'offrent à nous.

Le premier est la connexion filaire. Elle offre des débits importants ainsi que de

longues portées si le "fil" le permet. En revanche la mise en place de l'infrastructure et la maintenance sont contraignantes.

En second, l'un des moyens le plus répandu de nos jours, est la communication par signaux sonores. Ce domaine a été très largement exploré et il semblerait qu'aucune évolution majeure ne soit envisageable [16]. La portée est très intéressante mais les réflexions, la bande passante limitée, la durée de propagation et l'impact sur la vie marine sont vite limitant sur divers cas d'usages.

En considérant les nouvelles technologies c'est donc les ondes EM qui remplissent le plus de critères en matière d'exigences opérationnelles. La bande passante peut être importante, mais la portée est tout de même limitée par rapport à des signaux acoustiques. En effet, l'eau se comportant comme un filtre passe bas, il est extrêmement difficile de proposer des débits importants.

Range	< 10 m	50 m	200 m	> 1 km
Sea water	> 8 kb/s	300 b/s	25 b/s	< 1 b/s
Fresh water	> 3 Mb/s	150 kb/s	9 kb/s	< 350 b/s
Applications	AUV docking; diver's personal network	Networks; diver conversation	AUV control; networking; diver conversation	Deep water telemetry

FIGURE 2.11 – exemples de débits pour les ondes EM sous marines - Extrait de [16]

Enfin, les liaisons optiques peuvent être une solution comme système de communication dans ce milieu. Les cas d'usages restent limités en raison d'une portée plutôt faible comparé aux autres solutions. Cependant elles sont un bon compromis. La directivité reste, comme dans l'air, un inconvénient mais le débit est intéressant.

Notre pôle recherche étudie actuellement sur une application de docking[2] sous marin où un Autonomous Underwater Vehicle, ou *Véhicule sous marin autonome* (AUV) doit échanger des données avec une station sous marine. Lorsque celui-ci veut envoyer des messages à haut débit en RF, il doit se placer extrêmement proche de la cible, ce qui est très gourmand en énergie.

En revanche, via la VLC, il devra toujours se rapprocher de la station sans pour autant asservir de manière très précise sa position. Ce qui aura pour effet de réduire significativement la consommation d'énergie à ce moment précis.

La table 2.1 récapitule les différents avantages et inconvénients des solutions :

2. Procédé d'échange de données avec un station sous marine

	Filaire	Acoustique	RF (proche)	RF (lointain)	VLC
Portée	+ +	+ +	- -	+	-
Débit	+ +	- -	+ +	- -	+
Coût	- -	+ +	+	+ +	+ +
Alignement	+ +	+ +	- -	+ +	+ +

TABLE 2.1 – Comparatif des principales méthodes de communication sous marine

Pour conclure, il est à noter qu'à l'instar d'une communication lumineuse classique, une communication laser est envisageable en milieu sous marin. Bien que la directivité soit un frein majeur dans l'air, elle l'est un peu moins dans l'eau de mer. En effet, comme le montre la figure 2.12, le phénomène de diffusion dû aux particules en suspension est nettement plus marqué dans cette dernière. Cette solution peut donc être viable dans certains cas d'usage.

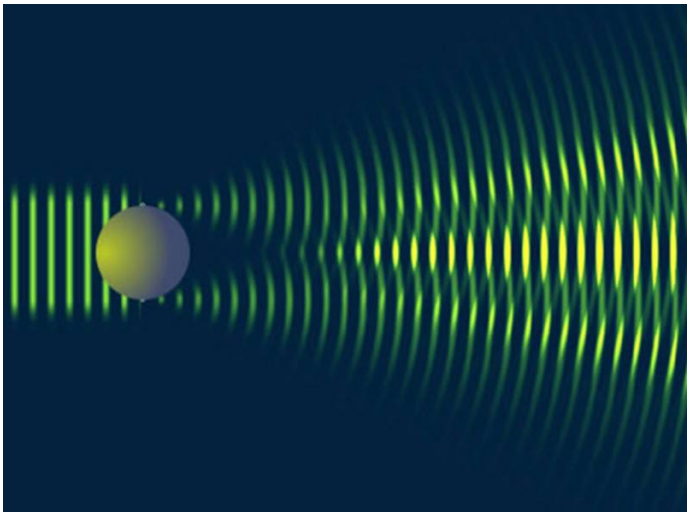


FIGURE 2.12 – Diffusion du faisceau laser - Source : Horiba

2.3.3 Le milieu hospitalier

Les services sensibles aux ondes EM dans les milieux hospitaliers sont très intéressés par la VLC puisque ce type de communication n'interfère pas avec le reste du matériel émettant ces ondes [66].

L'équipe travaille avec deux centres d'IRM de la région Toulonnaise. La technologie s'adapte parfaitement à leur problématique puisque la zone d'examen n'est séparée, par endroits, de la zone d'analyse que par une vitre. La lumière peut donc passer et a fortiori la communication est donc envisageable.

Cette alternative aux émissions RF offre de plus un aspect non invasif. Puisque ces ondes ne traversent pas le corps humain, elles sont potentiellement moins nocives et peuvent être plus largement répandues.

Les milieux hospitaliers ne sont pas les seuls touchés par cette problématique. En effet, dans l'aviation les interférences électromagnétiques peuvent avoir de grandes conséquences. A l'heure où l'on parle de rendre les avions connectés, cette technologie prend tout son sens.

2.3.4 Le LiFi

Le principe du LiFi repose sur le codage de l'envoi de données via la modulation d'amplitude des sources de lumière. En revanche, ce qui le différencie de la VLC est qu'il est basé sur un protocole bien défini et standardisé par le comité international IEEE 802.

C'est en 2011, qu'Harald Haas a baptisé ce nouveau paradigme LiFi [67, 68] comme analogie au Wireless Fidelity (WiFi) qui utilise des ondes RF [69].

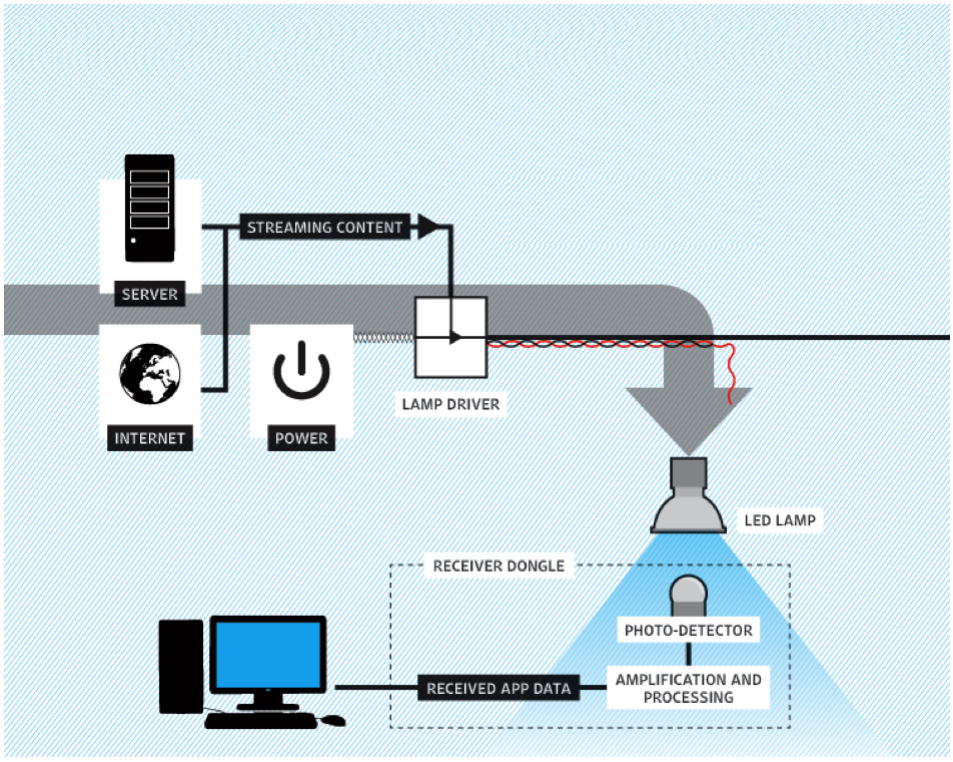


FIGURE 2.13 – Fonctionnement du LiFi [17]

De plus, le LiFi semble très adapté au monde de l'IOT [70] grâce son faible coût énergétique et à son débit extrêmement élevé. Une start-up francaise pionniere dans ce domaine, Oledcomm, réalise des communications descendantes en LiFi à une vitesse de 50 Megabits par seconde (Mbps) [71]. Certains chercheurs ont même réalisé des communications dont le débit est monté jusqu'à 224 Gigabits par seconde (Gbps) à 3 mètres de distance [72]. Avec un Field Of View, ou *Champ de vision* (FOV) plus

large, la communication baisse à 112 Gbps, ce qui reste 10 fois plus rapide que le Wi-Fi 802.11ac qui est la figure de proue actuelle.

Même si le débit constitue un atout majeur de ce type de communication, il est loin d'être le seul. En effet, l'aspect sécuritaire est non négligeable puisque les ondes optiques ne traversent pas les murs. Toute donnée émise à l'intérieur d'une pièce ou hors du champ de vision de la LED ne peut pas être récupérée. Néanmoins cela peut-être un frein dans certaines applications puisque ce cloisonnement affecte directement la portée. De plus, le LiFi offre une autre dimension à la géolocalisation en intérieur. Plus précisément, un utilisateur disposant d'un boitier LiFi peut, par exemple, se promener dans un musée et récupérer toutes les informations d'une toile uniquement grâce à la lumière qui l'éclaire. Ou bien, celui-ci pourra se localiser dans un endroit fermé, sans Global Positioning System, ou *Géo-positionnement par satellite* (GPS), grâce à des messages uniques envoyés par les différents éclairages du bâtiment.

Le spectre de la lumière visible couvre une bande fréquentielle d'environ 300 THz. En comparaison, les fréquences radio utilisées par les technologies de communications RF, comme le Wi-Fi ou la 3G, sont comprises entre 300 MHz et 6 GHz. Ces gammes de fréquences sont régulées par l'Union Internationale des Télécommunications ce qui rend généralement leur utilisation payante. Par ailleurs, ce spectre est aujourd'hui saturé par un nombre toujours croissant de terminaux mobiles [73]. Le Li-Fi et ses 300 THz de bande spectrale pourrait donc être utilisé pour soulager la bande radio qui est de plus en plus saturée. Le LiFi a donc plutôt vocation à compléter le WiFi.

Si le LiFi dispose d'une multitude d'avantages sur le WiFi il rencontre néanmoins quelques limites. Celles-ci se caractérisent principalement par une grande difficulté à gérer une communication complexe bi-directionnelle, une obligation d'allumer la lumière et sa faible portée en intérieur.

De plus, un réseau doit tout de même être déployé pour apporter l'information aux LED. C'est ce qu'on appelle une technologie "des derniers mètres".

Pour résumer, Le Li-Fi présente, outre quelques contraintes physiques, de nombreux avantages qui proviennent de l'avènement des LED et des propriétés de la lumière. Ce sont ces points clés qui impacteront la plus grande majorité des cas d'usage :

— Mise en place facilitée par une infrastructure déjà bien implantée. Le LiFi peut utiliser les LEDs déjà mises en place pour de l'éclairage. La persistance rétinienne [3] attribuant à l'œil une image rémanente durant $\frac{1}{25}$ seconde

3. La persistance rétinienne désigne la capacité de l'oeil à superposer des images qui viennent d'être vues à d'autres images montrées.

comparé à la vitesse de clignotement des LEDs permet de transmettre de l'information sans que l'être humain soit capable de distinguer une faiblesse d'éclairage.
— Débits élevés, bien meilleurs que ceux du WiFi sans utiliser une architecture électronique complexe.
— Sécurité accrue due à la haute fréquence des ondes lumineuses. Celles-ci ne traversent pas les murs, la fuite de données est donc contrôlée contrairement au WiFi qui s'étend dans le voisinage.
— La lumière visible n'interfère pas avec les fréquences radio. Il y a donc aucun conflit avec les technologies WiFi ou LTE. De plus les ondes lumineuses ne sont pas nocives pour la santé
— Le principal organe de la carte d'émission, la LED, consomme peu et devient de moins en moins onéreux.
— Géolocalisation rapide à mettre en place et peu coûteuse.

2.4 Les structures des expérimentations

2.4.1 Axes de réflexion

Dans le cadre de cette thèse industrielle, nous allons mettre en place un système communiquant optique sans fil. L'objectif final est de réaliser le module d'émission et le module de réception pour garantir à nos clients une communication bidirectionnelle par la lumière. La plupart des problématiques rencontrées sont de deux types :

— 2 actifs industriels doivent s'échanger de la donnée en temps réel. La liaison est directe.
— Une multitude de capteurs répartis dans un environnement proche doivent remonter des données à une supervision. Celle-ci doit en plus être capable de renvoyer de la donnée, soit pour synchroniser ses capteurs, soit pour les paramétrer à distance.

En d'autres termes, il s'agit d'utiliser deux des architectures principales de la topologie réseau, à savoir le point à point et le réseau en étoile.

Le réseau en étoile présenté sur la figure 2.14 est constitué d'un concentrateur et de plusieurs appareils. Chaque appareil peut émettre et recevoir de la donnée du concentrateur mais ne peut pas communiquer directement avec un autre appareil.

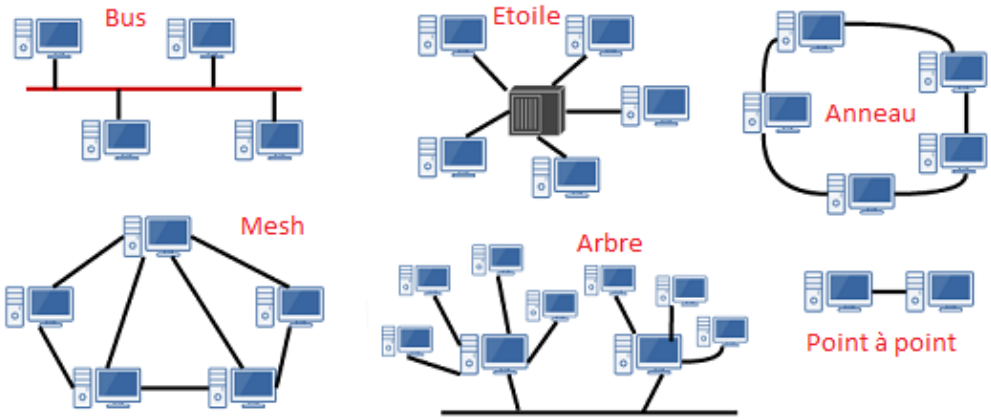


FIGURE 2.14 – Topologie physique des réseaux

La ligne de conduite des recherches va donc se baser sur la mise en place d'une communication basique entre 2 modules. Cela permettra de choisir un éventuel codage de l'information, d'isoler un type de modulation adapté puis de se pencher sur la problématique du concentrateur.

2.4.2 Notions de codage de l'information

2.4.2.1 Les méthodes de codage numérique en bande de base

Comme le stipule la figure 2.5 de la partie 2.2.1, page 63 il est généralement de bon aloi de coder l'information binaire. Le but de cette manipulation peut-être multiple pour éviter quelques désagréments de fonctionnement :

— Le spectre fréquentiel d'un signal binaire est concentré autour de la fréquence nulle, ce qui peut poser problème au niveau du support de réception qui filtre parfois la composante continue.
— La valeur moyenne est $\frac{1}{2}$. Il est préférable d'utiliser des signaux dont la valeur moyenne tend vers 0.
— Confusion de l'état 0 avec une rupture de transmission
— Si le signal est composé d'un enchainement de bits de même valeur, il peut y avoir des problèmes d'horloge et de dé-synchronisation du coté du récepteur.

Il existe divers types de codage numérique, cependant nous allons porter notre attention sur les 3 principaux utilisés. Ceux-ci sont codés suivant deux ou trois états, qui sont des niveaux de transitions. La figure 2.15 les répertorie en se basant sur un mot binaire de valeur 01011001.

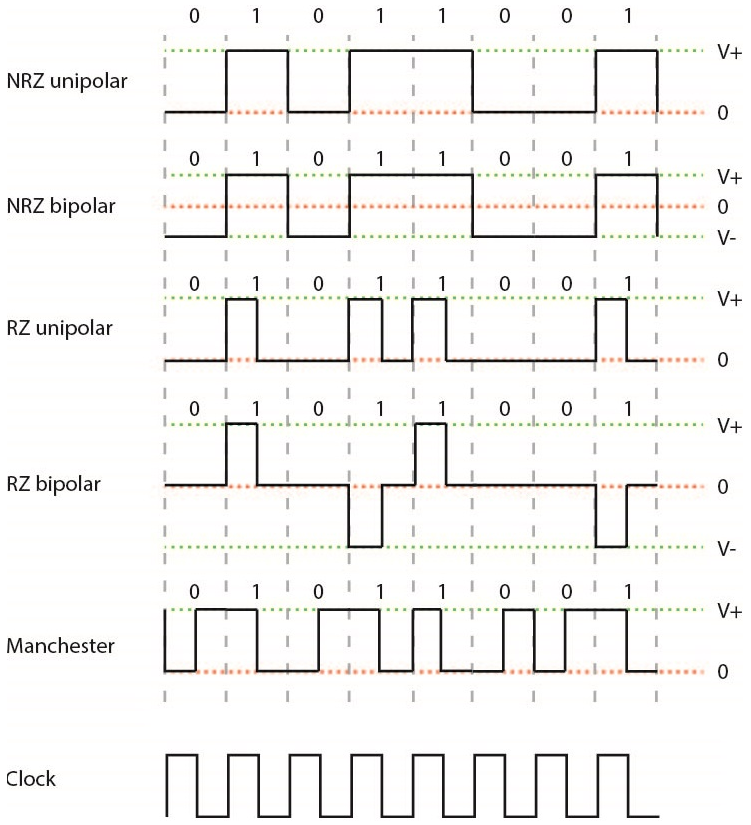


FIGURE 2.15 – Représentation de la donnée suivant différents codages [18]

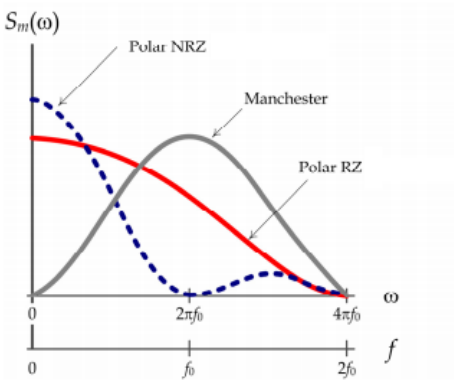
Le codage le plus simple [74] est le Non Return toZero (NRZ). Il consiste en un pulse rectangulaire positif pour représenter un 1 ou une absence de pulse pour un 0.

En utilisant un pulse rectangulaire négatif pour représenter les 0, la valeur moyenne du signal est rabaissée et la composante Composante continue (DC) est donc vraiment proche de 0. Comme vu précédemment, cela s'avère être un avantage lors du filtrage de réception. Ce type de codage est le NRZ bipolaire. De plus, la valeur Root Mean Square, ou *Valeur efficace* (RMS) du signal est plus importante que dans le NRZ classique, ce qui implique que celui-ci porte plus d'énergie et dispose d'un meilleur SNR.

Bien que ce type de codage reste synchrone, aucune notion d'horloge n'est intégrée dans la donnée transmise. Si une suite de 0 ou de 1 est à transmettre, il peut y avoir une désynchronisation.

Ensuite, le premier codage exploité fut le Return to Zero (RZ) car il dispose d'une grande facilité d'utilisation et de réalisation. Il est très similaire au NRZ mais diffère par son temps de tenue au niveau des pulses rectangulaires positifs. En effet, alors que le NRZ garde sa valeur positive pendant toute la durée où le bit à transmettre vaut 1, le RZ, lui, retombe à 0 à la moitié du temps de bit. Chaque 1 est donc représenté par une transition. Ce type de code présente donc une horloge lors d'une succession de 1 mais perd cette notion lorsque la séquence est une suite de 0. Ce problème est corrigé sur le RZ bipolaire de par le fait que le signal repasse par 0 au milieu de chaque pulse.

Pour palier au problème de passage d'horloge dans la donnée et éviter la valeur moyenne élevée il existe le codage Manchester. Chaque bit est représenté par une transition. Comme présenté en dernier dans la figure 2.15, un front montant est généré pour un 1 et un front descendant pour un 0. Cependant, du fait de ces 2 états par bit à transmettre la bande passante est doublée



Line Code	Bandwidth
Polar NRZ	f_0
Polar RZ	$2\,f_0$
Manchester	$2\,f_0$

FIGURE 2.16 – Spectre des 3 codages principaux et leur bande passante associée [19]

Suivant les voies de transmission utilisées, certains codages peuvent être plus efficaces. Cependant, d'une manière générale, les signaux numériques possèdent un très gros inconvénient : ils se déforment à grande distance [75].

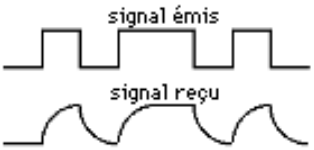


FIGURE 2.17 – Impact de la distance sur un signal numérique

Le transport est donc optimal au sens de la fiabilité sur des distances plutôt courtes. Pour des longues distances, il faut employer une autre méthode : la modulation.

2.4.2.2 La modulation du signal

En règle générale, le signal n'est pas adapté à la transmission directe par le canal de communication de base. La modulation est un processus permettant de transformer ce signal de base en une forme adaptée au canal de transmission. Pour cela, certains paramètres peuvent être utilisés tels que l'amplitude, la phase ou la fréquence.

Les techniques de modulation développées pour les systèmes OWC utilisant une fibre optique sont particulièrement bien adaptées au LiFi et plus globalement au milieu VLC [76]. A l'instar des OWC, la majorité des applications peuvent être mises en place avec des schémas de modulation et démodulation très simples. Par exemple, le On-Off Keying (OOK) consiste en une modulation d'intensité en tout ou rien de la porteuse optique à l'émission. La figure 2.18 illustre le principe de Modulation d'Intensité et Détection Directe (IM/DD).

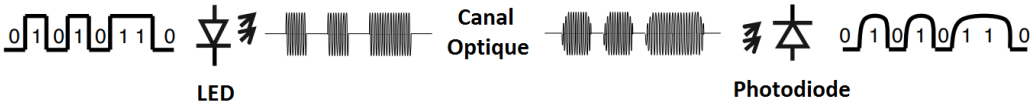


FIGURE 2.18 – Principe d'une transmission par IM/DD

L'OOK est le fer de lance d'une branche de modulation utilisée par la VLC, basée sur la Single Carrier Modulation (SCM). Cette technique qui fut la première utilisée pour des communications optiques [77] est particulièrement adaptée pour des échanges avec des débits modérés [20].

Contrairement aux systèmes mono-porteuses qui modulent sur une porteuse unique à un débit de Rs, le principe de la Multiple carrier Modulation (MCM) de type Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) consiste à transmettre les données de manière simultanée sur N porteuses modulées à un débit de $\frac{Rs}{N}$. Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation [78].

Ces deux premières techniques d'adaptation au canal de transmission proviennent de méthodes utilisées pour des transmissions classiques. Or, la LED offre un degré de liberté supplémentaire puisqu'en utilisant une RGB-LED [4] il est possible d'en modifier sa couleur. le standard IEEE 802.15.7 propose le Colour Shift Keying (CSK) comme une technique de modulation pour la VLC [79].

La figure 2.19 représente ainsi les principaux types de modulation utilisés pour la VLC.

4. LED composée de trois couleurs qu'il est possible d'ajuster en modifiant l'intensité de chaque élément

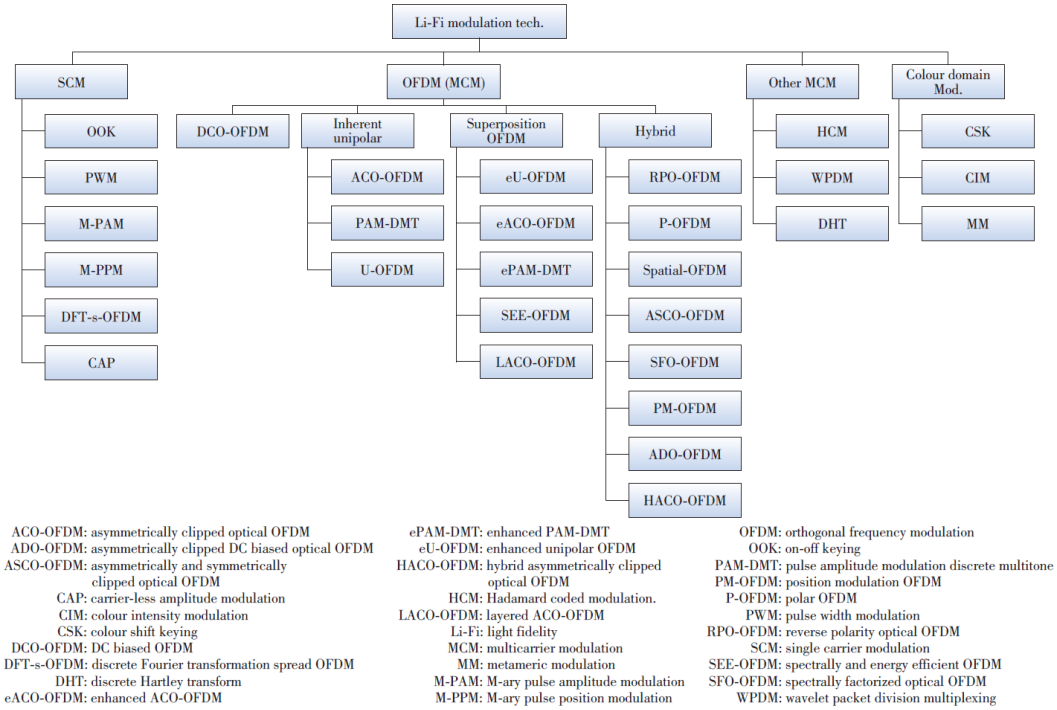


FIGURE 2.19 – Modulations principales pouvant être utilisées pour la VLC [20]

De manière générale, les conclusions sur le type de modulation à employer dans le domaines des VLC dépendent des considérations de base de l'application.

En effet, de nombreuses études réalisées, notamment dans [80] ont montré que plus le débit était élevé, plus la performance des SCM était limitée. Pour des cas d'usages où le débit est primordial tel que pour le LiFi, un système basé sur les MCM et plus précisément OFDM est indispensable.

Quand au CSK, il offre une toute nouvelle dimension à la modulation, néanmoins son coût et sa complexité n'en font pas un candidat optimal pour de nombreuses applications.

2.4.2.3 La DPPM appliquée

Comme établi au chapitre 2.4.1, le but de la manipulation va être de créer une communication basique entre 2 actifs industriels. La course au débit ne sera pas une priorité ici, mais il sera plutôt important de bien cibler les problématiques d'un tel type de communication novateur pour la société. A partir de ces conditions nous avons fait le choix de mettre de côté les modulations couteuses et complexes.

Nous avons donc écarté la partie CSK et MCM. L'OFDM est un procédé très prometteur et performant mais les erreurs de synchronisation lors des transmissions ne nous permettent pas de le conserver si on veut garder en ligne de mire un coût bas aussi bien d'un point de financier que d'effort de mise en place.

Nous nous sommes donc penchés sur les SCM, et plus précisément sur la méthode

PPM. Bien que cette technique requiert plus de bande passante que l'OOK pour un débit équivalent, ce qui est un inconvénient non négligeable, elle permet de faire transiter l'horloge directement dans la donnée. Il n'y a donc jamais de désynchronisation pendant les transmissions. Cette méthode peut-être utilisée directement en bande de base ou à l'aide d'une porteuse.

Il faut savoir que la PPM est sensible aux multi-trajets. Cette caractéristique a bien été prise en compte lors de notre recherche mais étant donné que nous travaillons sur des courtes distances par une transmission optique nous avons négligé ce phénomène.

A chaque coup d'horloge un nouveau bit est à transmettre. En fonction de sa valeur un pulse est généré plus ou moins rapidement. Dans une modulation PPM classique ces pulses ont la même amplitude et durent autant de temps. La figure 2.20 tirée de [81] illustre parfaitement ces propos.

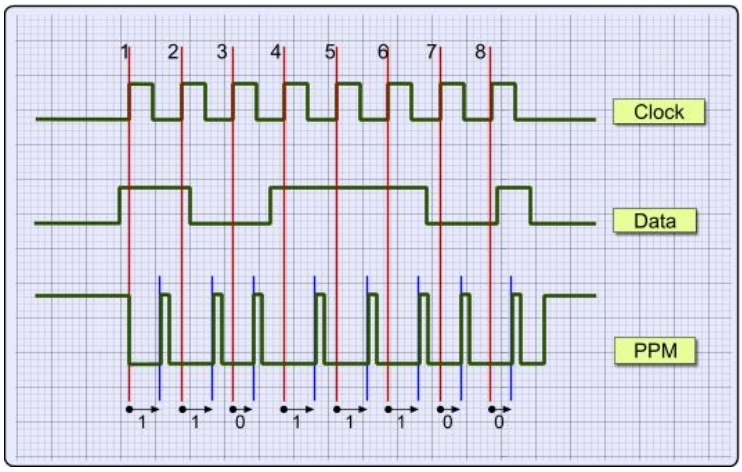


FIGURE 2.20 – Modulation PPM

Cependant, la modulation DPPM propose d'optimiser le PPM. La modulation est identique, sauf que les bits sont transférés les uns à la suite des autres sans attendre un coup d'horloge. Le gros avantage de cette solution est que le débit est amélioré.

Le débit varie donc dans le temps en fonction de l'information transmise. Cependant la cible n'a pas besoin de connaitre le débit pour restituer l'information.

En revanche, cette technique ne permet donc plus de faire transiter l'horloge. Le recours à une taille de pulse (ou temps "bit") proportionnel au temps d'horloge a donc été mis en place afin de garder cette notion d'horloge. Dans notre cas, nous avons choisi par simplicité de donner une taille de pulse correspondant à la moitié de la période de l'horloge.

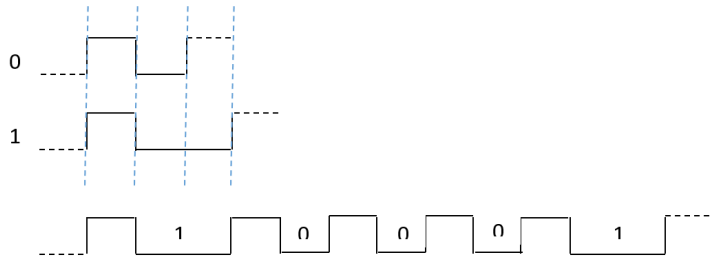


FIGURE 2.21 – Modulation utilisée tirée du DPPM

Pour transmettre un 0 il faut ainsi 2 cycles[5] alors que pour un 1 il en faut 3. La communication est donc 2.5x moins rapide en moyenne qu'une communication OOK classique.

Quel que soit le bit à transmettre, un cycle état haut suivi d'un cycle état bas est généré. La différence se traduit par un état bas supplémentaire lorsqu'un 1 doit être transmis.

Les messages étant segmentés en mots de 16 ou 32 bits, un temps de 5 cycles est imposé à la fin de chacun pour bien séparer les différentes données à transmettre. Il ne faut pas oublier de rajouter un 0 en fin de trame, cela permet de générer un front montant pour valider le dernier bit de la donnée utile.

Dès lors qu'une interruption d'au moins 4 cycles intervient le compteur d'enregistrement de données est remis à 0, ce qui permet d'être sûr de 2 choses :

— Une fois la donnée transmise, le compteur est remis à 0 pour la suivante.
— Si un problème de liaison a provoqué un délai de non réception, la donnée courante est perdue et le compteur est remis à 0 pour la prochaine.

Le récepteur n'a donc pas besoin de connaitre le débit d'émission, il s'adapte automatiquement au flux de données.

La partie de codage et de modulation étant validée, il faut désormais les mettre en application sur des systèmes réels.

2.4.3 Module d'émission

2.4.3.1 Carte électronique

La carte électronique d'émission est composée de 2 étages.

— Un contrôleur.
— Un étage d'émission de flux lumineux par LED.

5. Un cycle est une demie-période. Un temps cycle équivaut à un temps pulse

Etant partenaire de NI, nous avons fais le choix de baser notre architecture de contrôle sur la carte SingleBoard RIO 9607 qui dispose d'une multitude d'Entrées-Sorties (E/S) numériques indispensables pour pouvoir piloter une ou plusieurs LEDs. De plus, l'expertise reconnue de Step AT dans le monde NI nous a permis de prototyper l'expérience de manière optimale en termes de ressources, de temps et d'architecture globale.

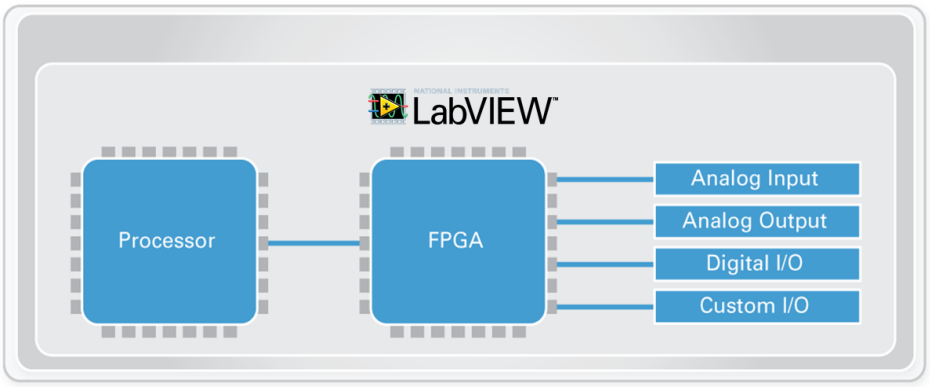


FIGURE 2.22 – Architecture d'une sbRIO-9607

La figure 2.22 illustre l'architecture complète de la plateforme NI par excellence. Dans notre cas de figure, nous voulons réaliser une modulation de signaux lumineux à 2 niveaux. La LED sera donc allumée ou éteinte et nous utiliserons pour cela les Digital I/O qui sont ni plus ni moins des lignes numériques. Celles-ci sont directement reliées au Field-Programmable Gate Array (FPGA)[6]. Bien que surdimensionnée pour cette application, la puissance de calcul d'un FPGA et le temps de réponse de ses E/S nous garantissent une exploitation maximale des caractéristiques de la LED.

La dernière partie du contrôleur, et non des moindres est le processeur. Basé sur une système d'exploitation Linux, il permet de récupérer les données du FPGA et de les traiter, c'est ce qu'on appelle la partie Real Time, ou *Temps réel* (RT). La communication établie entre ces deux organes est réalisée en First In First Out (FIFO) Direct Memory Access (DMA).

Au niveau de l'étage d'émission lumineuse nous avons fait le choix d'y placer un transistor. Celui-ci permet de piloter la LED et, à l'aide de voies analogiques disponibles sur la sbRIO, de choisir la tension applicable aux bornes de celle-ci.

6. Circuit intégré en silicium programmable en redéfinissant le circuit intégré lui-même

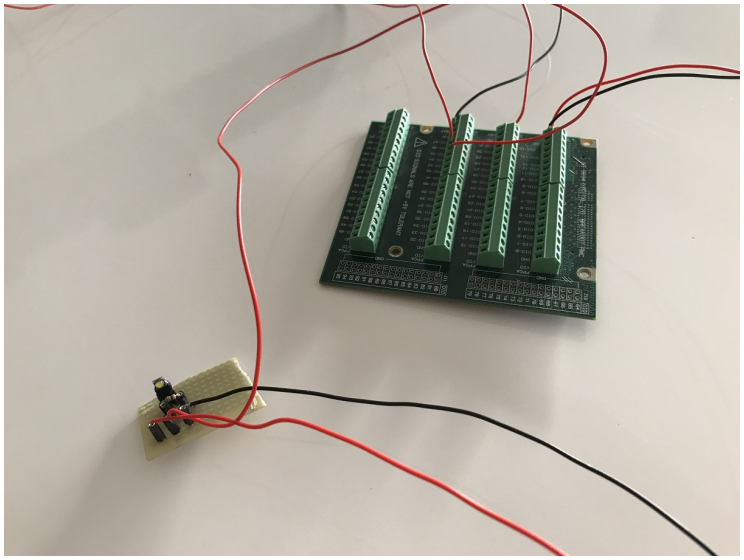


FIGURE 2.23 – Étage électronique d'émission

2.4.3.2 Logiciel de commande

Le logiciel de pilotage reprend les deux composants présentés dans la figure 2.22 tout en rajoutant une partie de contrôle depuis un ordinateur reliée directement en réseau.

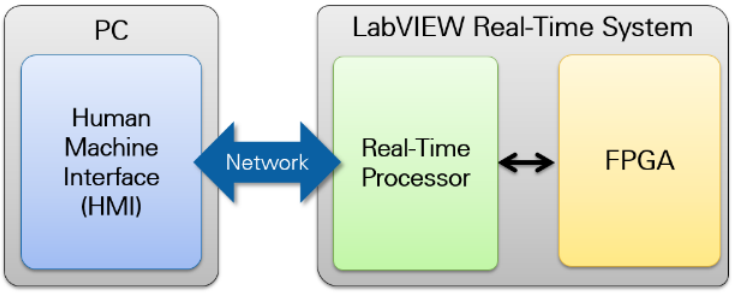


FIGURE 2.24 – Étage électronique d'émission

L'Interface Homme Machine (IHM) installée sur le PC permet à l'utilisateur de gérer non seulement la connexion à son module d'émission mais aussi les données à envoyer ainsi que le débit de la communication. Celles-ci sont regroupées en plusieurs types :

— Envoyer un nombre, 16 ou 32 bits. C'est le message de plus bas niveau
— Envoyer une image
— Streamer[7] un fichier audio.

7. Technique consistant à transmettre des données à un utilisateur en temps réel, sans téléchargement

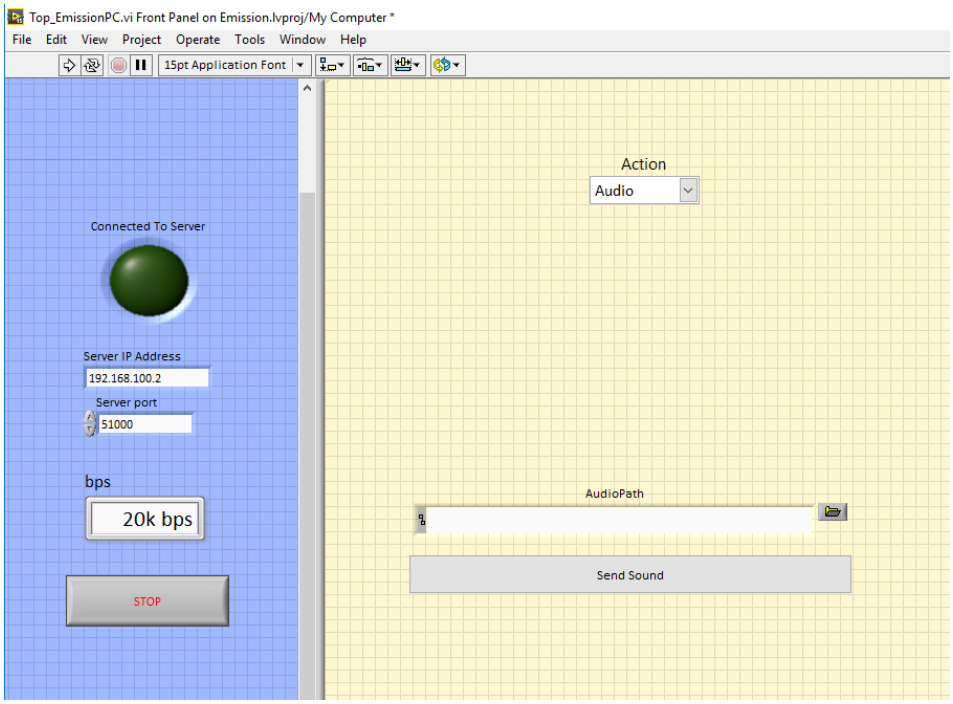


FIGURE 2.25 – IHM d'émission de données

Dès lors que l'utilisateur a paramétré l'adresse réseau et le port il est à même de se connecter au module d'émission et ainsi lui envoyer des données.

La partie RT, qui est exécutée en continue une fois alimentée, attend donc de recevoir un message par le réseau. Si une commande en provenance du PC est réceptionnée, elle est analysée et envoyée directement au FPGA.

Enfin, le FPGA module la donnée fournie et agit directement sur la diode à l'aide du code disponible en annexe A.3.

Comme l'illustre la figure A.1 disponible en annexe, cette modulation est gérée sous forme de mots entiers signés de taille paramétrable. Actuellement le codage est fixé à 16 bits pour disposer du meilleur compromis Echantillons par seconde (S/s)/précision. Ce mot de taille 16 est alors transformé en tableau de bits.

Une machine à état composée de 2 ou 3 étapes permet ensuite de transférer bit par bit le message. Elle va donc répéter 16 fois cet enchainement :

1. Passer la ligne numérique de la LED à l'état haut et attendre pendant la durée d'un cycle
2. Passer la ligne numérique à l'état bas, lire le bit courant et incrémenter l'index. Si celui-ci vaut 0 recommencer pour le bit suivant sinon passer à l'étape 3. Attendre pendant un cycle

3. Garder la ligne à l'état bas et attendre pendant la durée d'un cycle.

La durée de cycle est paramétrable, c'est d'ailleurs le seul paramètre qui permet d'ajuster le débit d'émission. Une fois que la totalité du mot a été envoyé un temps d'attente est respecté afin de faire comprendre au logiciel de réception qu'un nouveau mot va être généré. Nous avions fixé théoriquement ce temps à 5 cycles ce qui donnait de bons résultats, cependant le débit final était dépendant du mot lui même. En effet, la modulation agissant sur un temps différent suivant le bit à transmettre il y a forcément un décalage.

Pour palier à ce problème nous avons incrémenté une variable qui compte le nombre de bits à 1 dans un mot. Cette information nous donne le nombre de cycles supplémentaires attendus par rapport à l'entier 0. Il suffit alors de retrancher ce nombre à 16 et d'attendre le nombre de cycles correspondant. Cela réduit le débit maximum mais assure une stabilité dans le déterminisme du processus.

Par exemple, pour un mot de 16 bits, il faut donc 53 cycles en utilisant cette modulation, ce qui est environ 3,3 fois plus que pour une OOK classique. Ce coût en débit nous permettra de gérer des applications à débit variable en fonction de la qualité du canal optique à l'instant t.

Une évolution prochaine de la modulation sera d'abaisser la taille des pulses et ainsi diminuer la valeur moyenne à transférer. Attention cependant, la diminution des pulses peut provoquer des clignotements suivant le débit. Il faut vérifier que le cas d'usage le permette.

2.4.4 Module de réception

2.4.4.1 Carte électronique

Tout comme la partie d'émission de donnée, la réception est composée de deux étages : Le contrôleur, une NI MyRIO qui reprend exactement la même architecture qu'une sbRIO et l'étage de réception pour récupérer le message transitant dans flux lumineux.

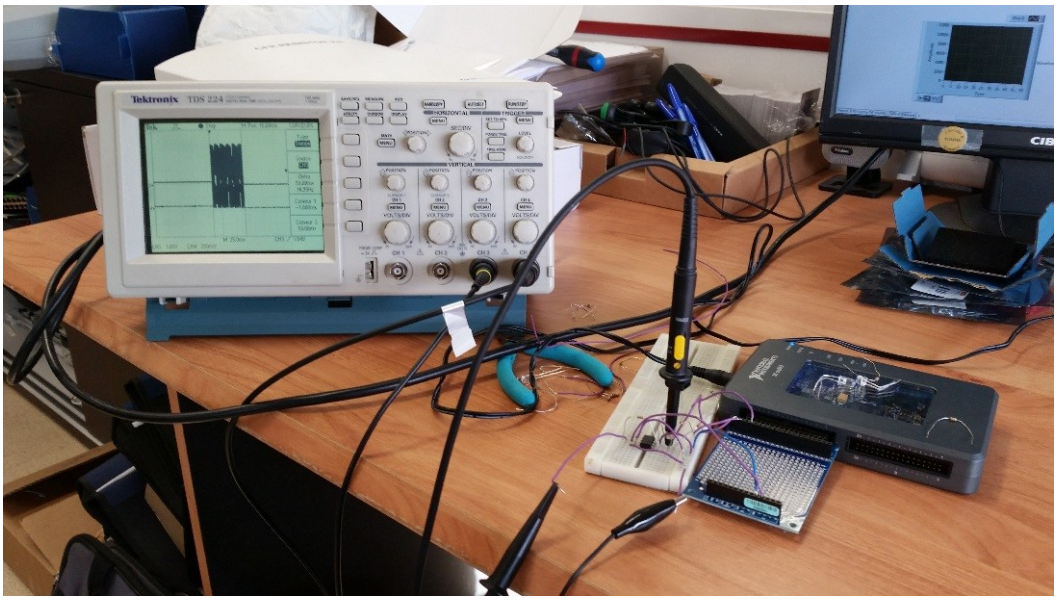


FIGURE 2.26 – Montage de base de réception du flux lumineux

Afin de garantir un débit et une robustesse toujours plus élevés, le montage a beaucoup évolué durant les expérimentations. Dans un premier temps, et afin de valider le protocole nous avons uniquement placé une photodiode en face de la diode émettrice. En appliquant la loi d'Ohm $U = Ri$, une résistance en sortie de la photodiode permettait de récupérer une tension qui variait suivant les changements de luminosité. Cette première expérience fut bénéfique pour valider le bon fonctionnement de tout le logiciel, c'est-à-dire l'architecture et tout ce qui concernait la modulation, démodulation.

Les créneaux n'étant pas très marqués la communication était limitée à environ 2 kbps.

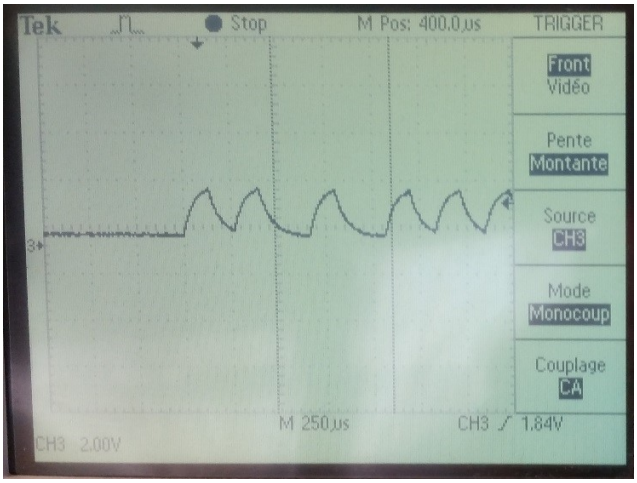


FIGURE 2.27 – Signal reçu lors de la première expérience à un débit de 2 kbps

Dans le but d'obtenir des signaux de plus grandes amplitudes, il a été placé un Amplificateur opérationnel (AOP) en réception pour augmenter le niveau du signal reçu. Le montage réalisé est un non inverseur de gain $G = 1 + \frac{R1}{R2}$. La communication peut alors atteindre des débits allant jusqu'à 30 kbps.

Ce débit n'est toutefois pas suffisant pour nos applications. Il faut donc isoler les différents éléments du système qui limitent la montée en débit.

La première piste d'amélioration est l'acquisition. En effet, jusqu'à présent, le module NI faisait l'acquisition d'un signal analogique. Le fait de placer un comparateur analogique avec un seuil identique au précédent, nous permet dorénavant de lire la donnée depuis une entrée numérique. Le débit en est impacté puisque les 130 kbps ont été atteint. Cela réduit aussi la complexité du module d'acquisition puisque nous n'avons plus besoin d'entrées analogiques.

Pour permettre d'aller avoisiner le Mbps, il faut que nos composants puissent, théoriquement, suivre des pulses larges de 400 ns. Afin de limiter les effets de bord, nous nous laissons un temps de montée et un temps de descente de 40 ns (un dixième de la largeur de pulse). Le temps de propagation sera ignoré car l'émission sera indépendante de la réception.

Le problème réside donc dans notre photodiode qui comporte des temps de transitions entre deux états de l'ordre de la microseconde. En effet, les photodiodes permettant d'atteindre des temps de transitions de quelques nanosecondes pour des Vbias faibles sont des dispositifs valant au moins une dizaine d'euros l'unité. Ceci est incompatible avec l'idée d'obtenir une solution réellement faible coût. Le prix cible de l'étage de réception ne devrait pas dépasser 30 ?. Or, le prix de cette photodiode ampute déjà plus de 30% du coût total.

Afin de réduire les coûts nous avons placé deux photodiodes en parallèles : le rapport signal sur bruit est augmenté donc le comparateur peut travailler plus ef-

ficacement dans les basses tensions, à savoir là où son slew rate[8] bas garantit une réponse rapide et nous arrivons à atteindre des débits de 190 kbps voire 200 kbps dans des conditions optimales. Malgré cela, les pentes ne sont pas plus raides et nous avons toujours un temps de montée de 1 microseconde sur la photodiode. La solution n'a donc pas été retenue.

Nous devons donc optimiser le montage électronique avec la photodiode actuelle sans appliquer ce Vbias élevé.

Au final, nous avons opté pour l'utilisation d'un montage Amplificateur de transimpédance (TIA) qui garantit une tension de sortie proportionnelle à la différence des courants d'entrée. Il faut cependant rester prudent avec ce montage puisqu'il est très sensible aux radiations électromagnétiques. Ce montage est directement associé à un filtrage pour atténuer les composantes continues, le 50-60 et le 100-120 Hz. S'en-suit alors un étage de mise en forme et de comparaison. En fait, le signal traverse une capacité de liaison pour le rendre flottant et un pont de résistance permet de le fixer autour de Vdd/2. Le seuil du comparateur est fixé à Vdd/2. Afin d'éviter une haute instabilité lors d'une absence d'émission, la résistance de pull-down du signal est légèrement baissée afin de fixer à 0 l'état de non-signal.

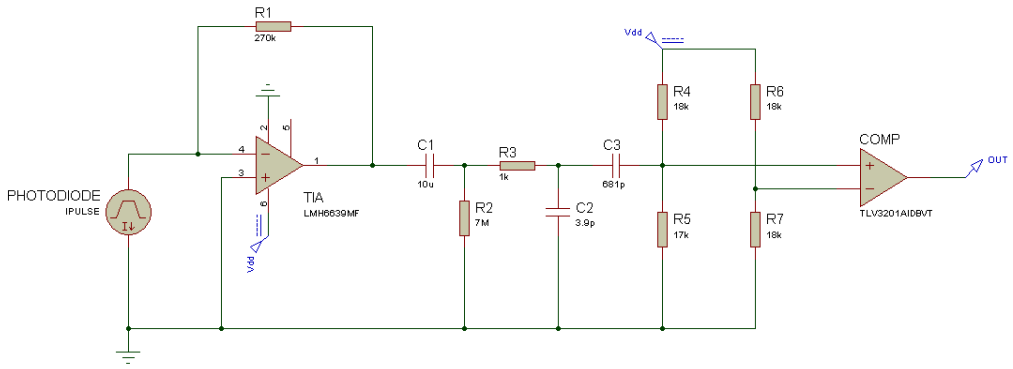


FIGURE 2.28 – schéma électronique final pour communication de type VLC avec modulation DPPM

Le débit avoisine désormais les 720 kbps en utilisant la modulation DPPM. Comme expliqué précédemment celui-ci atteindrait environ 3 fois plus avec de l'OOK, c'est-à-dire approximativement 2 Mbps. Nous arrivons donc aux limites de la technologie analogique utilisée. Un débit théorique équivalent en OOK de 2 Mbps donne des pulses de 250 ns de large. C'est 10 fois plus qu'un créneau d'horloge généré par le matériel NI. Celui-ci n'est donc pas encore limitant pour le moment. Pour aller plus loin il faudrait donc utiliser par exemple une modulation multi-fréquences de type OFDM.

8. Vitesse de variation maximale que peut reproduire un amplificateur

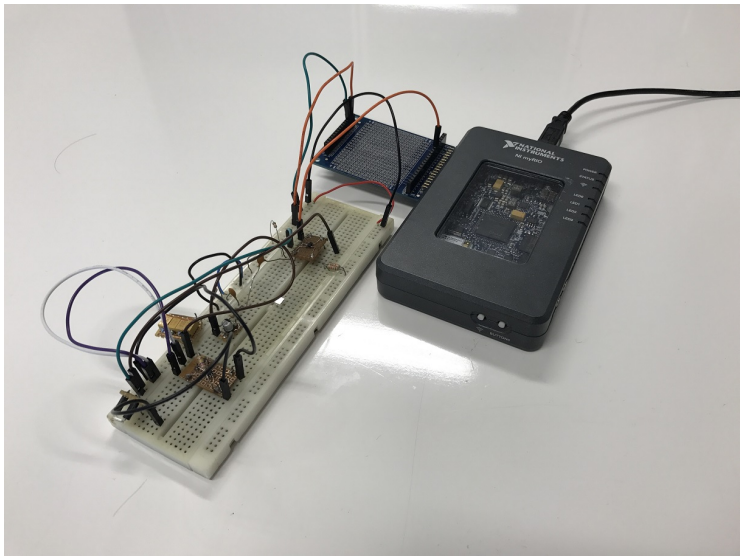


FIGURE 2.29 – Montage final pour communication de type VLC avec modulation DPPM

2.4.4.2 Logiciel de réception

L'architecture logicielle reprend les mêmes bases que pour l'émission. La partie FPGA réalise l'acquisition des signaux, la démodulation et envoie le mot par FIFO à la partie RT. Cette partie collecte la donnée, l'analyse et la transfert par protocole réseau à une supervision PC connectée. L'utilisateur peut ainsi voir les données qu'il reçoit en temps réel depuis une plateforme non déterministe.

Encore une fois, la complexité algorithmique se trouve dans le FPGA. En effet, il s'agit de démoduler directement le signal reçu qui a été altéré par le canal optique. Optimiser cette étape est donc primordial pour réduire au maximum les erreurs liées à la transmission sans-fil.

Dans un premier temps, le logiciel réalisé récupérait le signal analogique transmis par la photo-diode. Il fallait ensuite appliquer un seuil pour déclarer s'il s'agissait d'un état haut ou d'un état bas. Cette technique étudiée page 85 ne nous donnait pas entière satisfaction. Par la suite, c'est un comparateur analogique qui déterminait l'état.

L'algorithme repose ensuite sur la détection de changement d'état de la ligne numérique. Tout d'abord, la détection d'un front montant, synonyme de l'arrivée d'un nouveau bit, déclenche un compteur. Dès qu'il y a un front descendant celui-ci est relevé, nous avons donc défini la valeur d'un cycle à l'instant t. Etant donné qu'il est calculé en continu, l'algorithme peut supporter de légères variations de débit tout en continuant à décoder l'information de manière efficace.

A partir de ce moment là il ne suffit plus que d'attendre le prochain front montant et de regarder si sa durée se rapproche plus d'un cycle ou de 2. Nous pourrons alors

prendre une décision sur la valeur du bit courant. Le code correspondant à cet algorithme est disponible en annexe A.4.

Un second compteur permet de compter le nombre de bits reçus. Dès lors que celui-ci vaut 16, le mot est assemblé et envoyé par FIFO à la partie RT et ce compteur est ensuite remis à 0.

Si le temps d'attente entre un front descendant et le front montant suivant est trop long, la donnée est considérée comme inconnue.

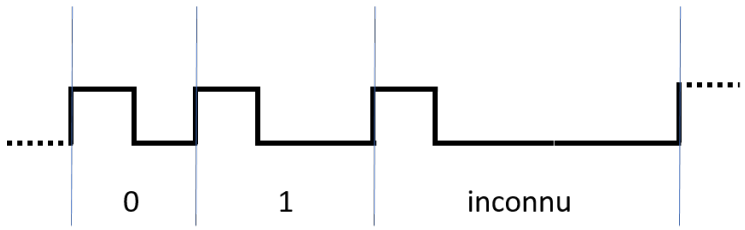


FIGURE 2.30 – Cas possibles lors de la démodulation

Trois cas de figures peuvent donner un comportement inconnu :

— Fin d'un mot
— Perte de la connexion
— Bug de transmission

Dans tous les cas la variable qui gère la bonne formation d'un mot est remise à 0 ce qui entrainera une perte d'information sauf si le mot était valide.

2.5 Conclusions expérimentales

Lors de nos avancées sur l'étage de réception électronique nous rencontrions fréquemment des limites ne permettant pas de dépasser un certain débit de transmission. A chaque fois, nous pouvions résoudre ce problème avec des efforts modérés jusqu'à atteindre 720 kbps. A ce stade, les changements couteux à venir, tant d'un point de vue financier que temps de mise en application, nous ont permis de prendre du recul et de nous recentrer sur les besoins initiaux.

Un signal échantillonné à 45000 échantillons par secondes avec une résolution de 16 bits engendre un débit binaire de 720 kbps. la valeur atteinte des deux notions échantillonnage/précision répond parfaitement à notre cahier des charges initial. De plus, avec un tel débit nous pouvons synchroniser nos capteurs de manière très efficace en descendant sous la barre des 100 ns.

Afin de pouvoir proposer ce cas d'usage aux différents prospects nous avons réalisé une démonstration dont la version de base est illustrée par la figure 2.31.

FIGURE 2.31 – Streaming de musique qualité CD en VLC

Un CD du commerce dispose d'une fréquence d'échantillonnage à 44100 Hz et une résolution de 16 bits. Avec notre système nous sommes donc en mesure de faire transiter des morceaux musicaux optimisés pour une qualité CD en temps réel sans latence. Il faut toutefois que l'alignement LED/photodiode soit parfait mais qu'il soit aussi peu éloigné.

Afin de modéliser ce problème de perte de donnée en changeant ces paramètres nous avons réalisé une mesure du Bit Error Rate, ou *Taux d'erreur binaire* (BER) à distance et angle différent. Le résultat est le suivant :

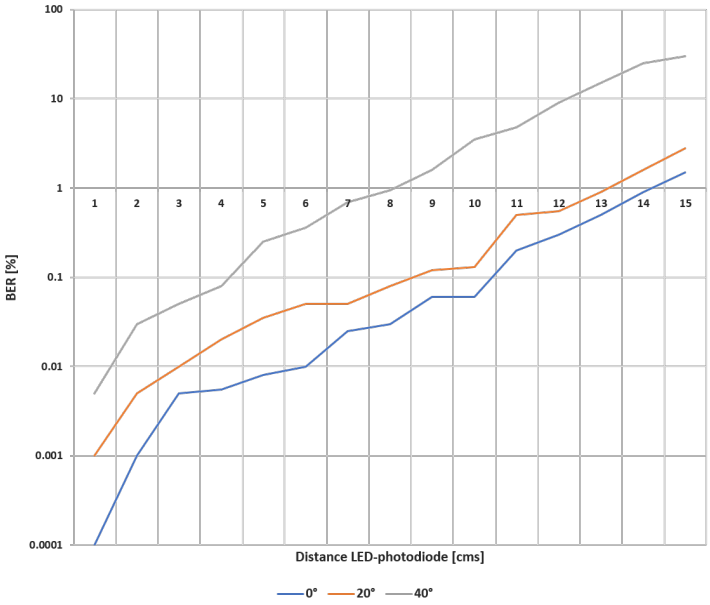


FIGURE 2.32 – BER en fonction du couple de paramètre distance, angle

Cette étude à été menée avec une LED rouge d'intensité 10 mcd[9] d'une part et une photodiode optimisée pour une meilleure sensibilité à 850 nm et un angle de 60° d'autre part. Cette expérience montre l'impact de la directivité sur la qualité globale du signal reçu. Ceci peut-être grandement amélioré avec un jeu de lentilles mais restera un problème pour certaines applications où le capteur est excentré ou même en mouvement.

De plus, en reprenant la topologie réseau de la figure 2.14 nous n'avons rempli qu'un objectif sur les 2 envisagés. Notre solution est parfaite pour une communication point à point mais ne peut convenir pour un réseau en étoile.

La partie broadcast de la donnée depuis le concentrateur vers les capteurs ne pose pas de problème est peut-être gérée avec notre système précédent. En revanche, dès lors que deux capteurs vont vouloir renvoyer de la donnée en même temps il sera totalement impossible pour le concentrateur de discriminer celles-ci. Une méthode consisterait à travailler avec plusieurs LED dans des domaines de longueurs d'onde différents mais les possibilités restent limitées.

Afin de répondre à cette problématique il faut trouver un photo-récepteur pour le concentrateur qui soit capable de récupérer plusieurs sources lumineuses en même temps. C'est alors que nous nous sommes penchés sur les appareils de prise de vue optique.

9. Le candela (cd) est une unité de base du système international. Elle sert à mesurer l'intensité lumineuse. mcd représente des millicandelas

Chapitre 3

Du binaire au bidimensionnel : La caméra

"Ce qu'aucun œil humain n'est capable d'attraper, aucun crayon, pinceau, plume de fixer, ta caméra l'attrape sans savoir ce que c'est et le fixe avec l'indifférence scrupuleuse d'une machine."

Robert Bresson

Sommaire

3.1 Bande passante montante accrue 93
3.1.1 La caméra 93
3.1.2 L'image numérique 95
3.1.3 Limite technologique majeure 96
3.2 Traitement appliqué au décodage de l'information . . . 98
3.2.1 Notion de temps réel 98
3.2.2 Détection de source lumineuse 100
3.2.3 Redimensionnement de la zone d'intérêt 103
3.2.4 Conclusion 111
3.3 Détails expérimentaux de la communication montante . 111
3.3.1 Optimisation de la détection et de la démodulation DPPM 112
3.3.1.1 Influence de la précision de la porte 114
3.3.1.2 Influence des seuils de détection 117
3.3.1.3 Amélioration du traitement de la zone d'intérêt 119
3.3.2 Mesure de la distance du module communiquant 121
3.4 Produit et champ d'application 128
3.4.1 Le système global 128
3.4.2 Preuve de concept : dongle LED USB 130

Lors du chapitre précédent, nous avons abordé les différentes notions des communications VLC, leur force mais aussi leur faiblesse.

Aujourd'hui, d'un point de vue global, la majorité des recherches ont été menées dans le but d'optimiser la vitesse de communication. Nombreuses sont les applications qui proposent soit un échange de données point à point, soit un broadcast [1] simple. Dans ce dernier cas, il n'est pas toujours aisé de remonter la donnée vers l'émetteur en raison des interférences. Ce débit montant est donc souvent limité et pose problème dès lors que plusieurs sources veulent transférer des données en même temps. Le flux lumineux est donc brouillé et le récepteur ne peut en aucun cas récupérer une donnée cohérente. Il faudrait donc que les sources émettent leurs messages les uns à la suite des autres, ce qui est techniquement très difficile à réaliser et peu intéressant d'un point de vue applicatif.

Le travail réalisé précédemment va cependant être d'une aide précieuse pour la suite des recherches et être partie intégrante de notre futur système. En effet, il sera nécessaire de tirer profit de son débit important pour broadcaster de la donnée.

Plus précisément, en réalisant cette communication point à point, nous avons rempli la moitié du cahier des charges. L'intérêt maintenant est de réaliser une topologie réseau de type étoile. En partant du principe que nous sommes en mesure de réaliser la communication descendante, à savoir l'émission d'informations depuis le concentrateur vers tous les capteurs pouvant récupérer cette lumière, il ne reste à traiter que la communication montante.

La principale solution existante à l'heure actuelle permettant de réaliser ce type de topologie est basée sur le réglage de la longueur d'onde [82]. Le principe est d'émettre en parallèle avec des LED de couleurs distinctes et, une fois que le récepteur dispose de filtres adaptés, il est possible de récupérer ces informations sans que celles-ci ne soient rentrées en collision. Cette solution implique par contre une couleur d'éclairage variable mais aussi un nombre limité de sources potentielles. En effet, les longueurs d'onde des LED peuvent s'étaler sur plusieurs cinquantaines de nanomètres. Ainsi, un nombre trop important de longueurs d'ondes différentes pourrait forcer le système à confondre des couleurs trop proches. Cette solution n'est donc pas envisageable pour nos cas d'usages puisqu'il est souhaitable que le nombre de sources dépasse allègrement la dizaine.

Afin de résoudre cette problématique commune à une multitude de designs VLC nous nous sommes penchés sur le composant limiteur : le photo-récepteur. La question fût simple, comment peut-on le modifier pour qu'il puisse discriminer plusieurs sources lumineuses comme le fait si bien l'œil humain ?

La solution apportée est illustrée sur le schéma de la figure 3.1. Le fait de remplacer la photodiode par une caméra permet non seulement de collecter des données de plusieurs capteurs de façon totalement simultanée mais aussi d'avoir un angle

1. Diffusion de paquets de données à de nombreux clients éventuels sans discrimination

d'ouverture bien plus grand. D'autres avantages comme de la géolocalisation ou du tracking seront abordés plus en détail à la section 3.3.

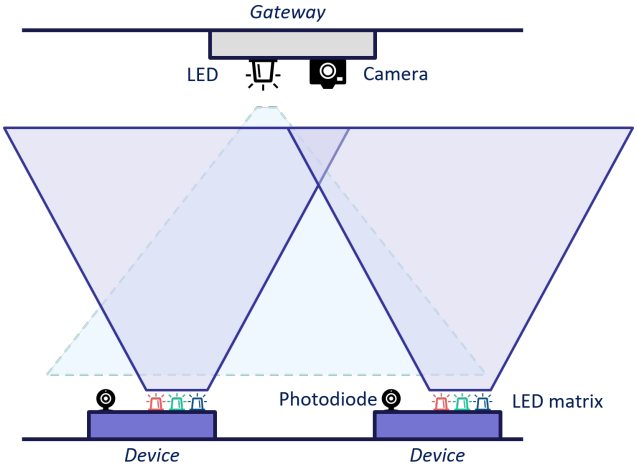


FIGURE 3.1 – Schéma d'une communication full duplex en VLC

3.1 Bande passante montante accrue

3.1.1 La caméra

Les appareils photos et caméras comme nous les connaissons aujourd'hui ont subi récemment la transformation de l'ère du numérique. La majorité des caméras ne fonctionnent donc plus avec des films photographiques mais traite la donnée de façon entièrement numérique. Cette révolution est matérialisée par le capteur d'image qui assure la transformation des signaux lumineux provenant des lentilles de l'objectif en signaux électriques.

Ce capteur est composé d'une matrice d'éléments photosensibles [21] appelés les photosites. C'est le plus petit élément qui réagit à l'intensité lumineuse et quatre sont nécessaires pour créer un pixel. Cette surface photosensible est composée de silicium qui produit de l'électricité si elle détecte de la lumière [2]. Ce signal électrique est ensuite amplifié, numérisé et enfin traité dans le but d'obtenir une image numérique.

2. Elle détecte plus précisément les particules élémentaires de la lumière, à savoir les photons des rayonnements électromagnétiques Ultra Violet (UV), visible ou IR .

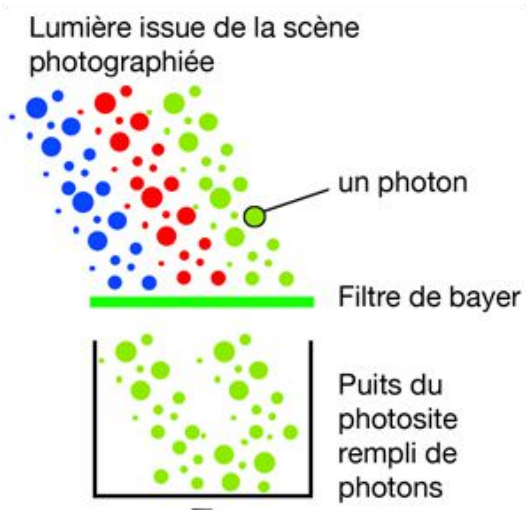
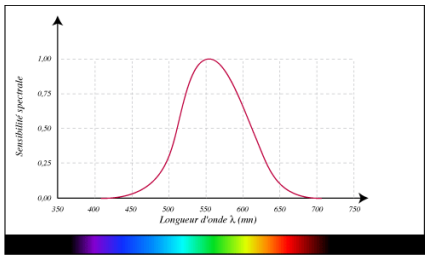


FIGURE 3.2 – Lumière et photosite [21]

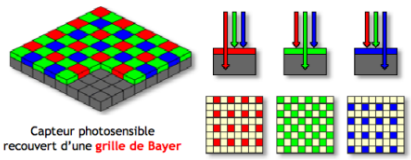
Deux technologies ont le monopole sur le marché des capteurs d'image.

La Charge-Coupled Device, ou *Dispositif à transfert de charge* (CCD) est la plus ancienne tandis que la Complementary Metal-Oxyde Semiconductor (CMOS) est moins chère et plus récente. La différence entre ces deux types est d'ordre conceptuel. Le CMOS diffère de la définition précédente car il n'emploie par de photosites simples mais il est plutôt composé de photodiodes sensibles à une seule des trois couleurs primaires Red Green Blue (RGB). Coté CCD, cette différenciation de couleur est gérée à l'aide d'un filtre de Bayer. La matrice de Bayer n'est autre qu'un ensemble de filtre ne laissant passer qu'une seule des composantes RGB. Plus en détail, cette matrice est composée de 50% de filtres verts, 25% rouges et 25% bleus. Le nombre de filtres verts est plus important car l'œil humain est bien plus sensible à la gamme de fréquences correspondante.

Ce type de filtre est presque universel sur les appareils photo numériques grand public, cependant des alternatives existent et sont principalement des dérivées de Bayer.



(a) Sensibilité spectrale de l'œil humain [83]



(b) Représentation du filtre de Bayer [84]

FIGURE 3.3 – Notion de matrice de Bayer

La dernière étape nécessaire à la reconstitution des couleurs est un procédé qui

permet de calculer la valeur des composantes RGB des pixels et donc à recréer la couleur grâce aux pixels adjacents.

Enfin, les avancées techniques sur les deux technologies depuis quelques années rendaient le choix difficile. Au final, la table 3.1 met en avant les différences.

Caractéristique	CCD	CMOS
Résolution	Identique	
Sensibilité	Élevée	Moyenne
Bruit	Faible	Élevé
Risque de saturation	Élevé	Faible
Rapidité	Élevé	Très élevé

TABLE 3.1 – Comparatif des deux principaux capteurs d'image du marché

Pour résumer, il faut donc choisir entre un CCD qui est de meilleure qualité, notamment au niveau de sa sensibilité à la lumière ou le CMOS qui offre des rendus intéressants à moindre coût s'appuyant sur une technologie simple et proposant une rapidité supérieure très intéressante dans notre cas d'usage.

3.1.2 L'image numérique

Ume image numérique est constituée de points appelés PICture Element (pixel). Ces pixels sont considérés comme les plus petits éléments constitutifs d'une image et sont répartis sur deux dimensions. Ils permettent ainsi de créer une image qui dispose de trois caractéristiques essentielles :

— Dimension
— Résolution
— Définition

La dimension représente la taille de l'image. La résolution, souvent utilisée de façon erronée, correspond au nombre de pixels contenus dans une longueur donnée. Son unité est le Dots Per Inch, ou *Points par pouce* (DPI) qui n'est ni plus ni moins que le nombre de pixels contenus dans 2.54 cms. Enfin, la dernière grandeur est la définition. Il s'agit du nombre de pixels global de l'image exprimé en pouces suivant les deux dimensions.

FIGURE 3.4 – Impact d'un DPI différent [22]

Une fois ces trois caractéristiques fixées, l'image est disponible. Elle est donc composée d'un grand nombre de pixels ayant chacun leur propre couleur.

Il peut être important de bien régler ces paramètres suivant l'application concernée. En effet, Si le but est d'afficher une image de qualité sur un écran, il est important d'avoir une haute résolution. Dans notre cas, réduire la taille de l'image pour diminuer les temps de traitement semble plus cohérent.

3.1.3 Limite technologique majeure

Bien que les caméras permettent techniquement de pouvoir réceptionner les données de plusieurs sources lumineuses en même temps, ce qui remplit parfaitement notre cahier des charges, une limite majeure est à prendre en compte.

Aujourd'hui, lorsqu'on choisit une caméra ou un mode de capture il est primordial de se pencher sur deux paramètres principaux. La définition de l'image et le nombre de Frames Per Second, ou *Images par secondes* (FPS)

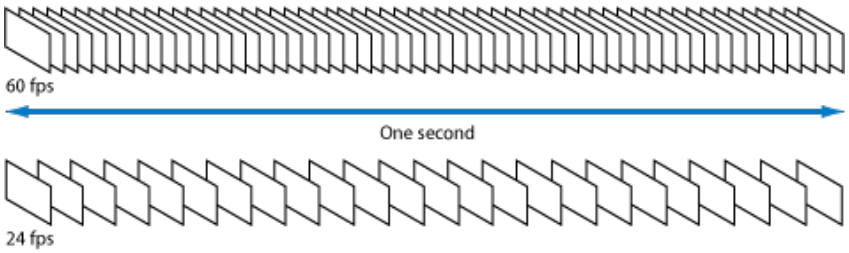


FIGURE 3.5 – Notion de FPS [23]

La figure 3.5 illustre parfaitement ce dernier paramètre et c'est celui-ci qui va être décisif pour notre système. En effet, tout comme dans le chapitre précédent avec la photodiode, les limites technologiques nous imposent un débit maximum. Dans notre première expérience, celui-ci dépendait de la capacité de la photodiode à commuter et de son slew rate. Ici tout est relié au FPS. Il faut donc à tout prix éviter que la diode se mette à clignoter pendant une seule et même image. Il y aurait ainsi une perte d'information.

Plus nous augmenterons les FPS, plus nous pourrons disposer d'un débit important et avoir une meilleure granularité. Comme le montre la figure 3.6, à 72 FPS bien plus d'états sont capturés.

FIGURE 3.6 – Rendu d'un objet en mouvement avec des FPS différents - Source : CyberLink

D'un point de vue théorique, il est tout à fait possible d'estimer le débit maximum.

La principale limite découle du théorème de Shannon-Nyquist qui dit que la fréquence d'échantillonnage doit être au supérieure au double de la fréquence maximale du signal étudié pour permettre sa description non ambiguë. Dans notre cas, nous pouvons en retirer la formule suivante :

$$F_{led} < \frac{F_{PS}}{2} \tag{3.1}$$

F_{PS} représente le nombre d'images par secondes de la caméra tandis que F_{led} est la fréquence de clignotement de la source lumineuse. Cela implique que le débit théorique ne peut pas dépasser la moitié des FPS de la caméra.

Dès lors, en utilisant une caméra à 240 FPS, le débit maximal permis sera de 120 Bits par seconde (bps). Ce débit est extrêmement faible par rapport à la communication réalisée au chapitre 2 où il était au moins 1000 fois plus grand. Cette contrainte ne peut être négligée dans de nombreuses applications actuelles.

Bien que ce débit soit théoriquement plutôt faible, il permet d'effectuer un réseau en étoile en utilisant les VLC. Il est important de prendre en compte que cette limite est fixée par la technologie embarquée dans les caméras. Il y a quelques années il était très difficile de trouver un appareil permettant de dépasser les 90 FPS. Aujourd'hui, certaines de celles-ci peuvent dépasser les 20 000 FPS.

La constante évolution de la technologie embarquée dans ces boitiers permettra sans aucun doute de rendre ce photo-récepteur compétitif par rapport à certains plus classiques d'ici quelques années. Néanmoins, un tel débit représente une image toutes les 50 microsecondes. Il faudra alors gérer une autre contrainte, la rapidité du temps de traitement de l'image.

3.2 Traitement appliqué au décodage de l'information

3.2.1 Notion de temps réel

Lorsqu'il s'agit de faire transiter de la donnée vers une caméra, deux traitements sont envisageables. Soit par post-traitement en dépouillant les enregistrements image par image et en récupérant les informations, soit en temps réel. Dans le deux cas, la séquence est représentée sur la figure 3.7.

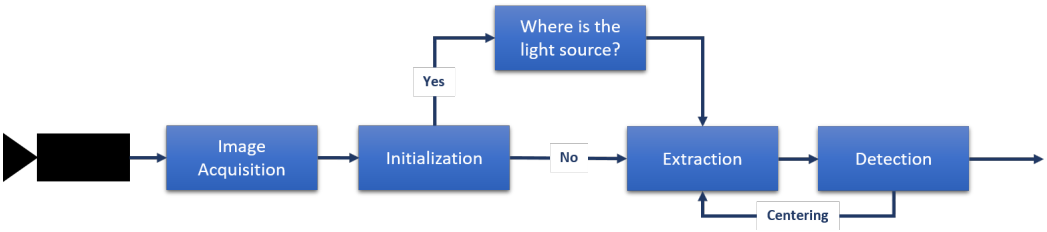


FIGURE 3.7 – Schéma de traitement de l'image reçue

Dans des conditions de temps réel, cette succession d'étapes doit absolument être faite pendant le temps imparti entre 2 images. L'objectif principal est donc de diminuer au maximum le temps de traitement de l'information. Ainsi, le détail de la séquence est le suivant :

1. Acquisition de l'image. La caméra récupère l'information et la renvoie au logiciel de traitement.
2. Phase d'initialisation. Cette étape permet de diminuer considérablement le temps de récupération de la donnée. En effet, traiter l'image entière serait une grande perte de temps. Cette phase, gérée de façon manuelle ou automatique à l'aide d'une mire, permet de localiser la source lumineuse et ainsi de ne traiter qu'une zone ou plusieurs zones précises de l'image. Le nombre de pixels sera donc nettement inférieur, ce qui impactera directement le temps de calcul. Il est possible de réaliser cette phase à l'allumage du système ou bien de la faire de façon périodique afin d'éviter de perdre de l'information si un décalage se produit.
3. L'étape d'extraction est basée sur les coordonnées renvoyées par l'initialisation. Ce bloc permet d'isoler les zones d'intérêt et envoie directement une ou plusieurs sous-images au logiciel de traitement.
4. La phase de détection permet de récupérer des blocs d'images limités en nombre de pixels et, à l'aide d'algorithmes, valider si la source lumineuse est allumée ou éteinte à l'instant t. Il est tout à fait possible d'y ajouter un détecteur de mouvement à l'aide d'une méthode de corrélation par exemple. Si tel est le cas un centrage semble nécessaire et permettrait d'ajuster les zones d'extraction. Si tel est le cas, il n'est plus indispensable de gérer la phase d'initialisation périodiquement. Celle-ci ne peut donc être faite qu'une fois

que le système se met en route.

Ce processus est donc optimisé pour minimiser le temps de décodage des données et ainsi éviter un décalage de traitement dans des conditions temps réel.

Enfin, la dernière partie susceptible d'être chronophage reste l'algorithme de détection. Nous avons pu réaliser quelques tests décrits dans les parties suivantes, cependant, une manipulation est restée commune à chacun d'eux : la correction des couleurs.

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a, dans sa recommandation 709, codifié la luminance [3] d'un mélange de lumières rouge (R), verte (V) et bleue (B), comme combinaison des intensités de chacune d'entre elles :

$$Y_{709} = 0.2125 * R + 0.7154 * V + 0.0721 * B \tag{3.2}$$

Utiliser la luminance sur cette problématique ne nous a pas fait perdre d'information et permettait ainsi de réduire considérablement le nombre de données à traiter lors de chaque nouvelle acquisition. La figure 3.8, représentant les proportions des différentes couleurs dans la luminance 709, met en avant le fait que le vert est prépondérant sur les autres.

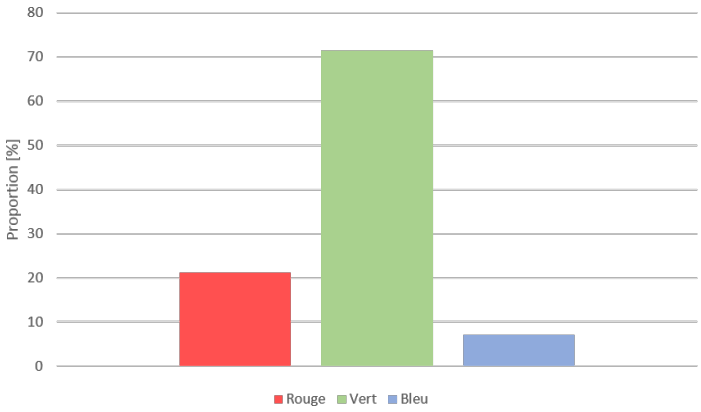
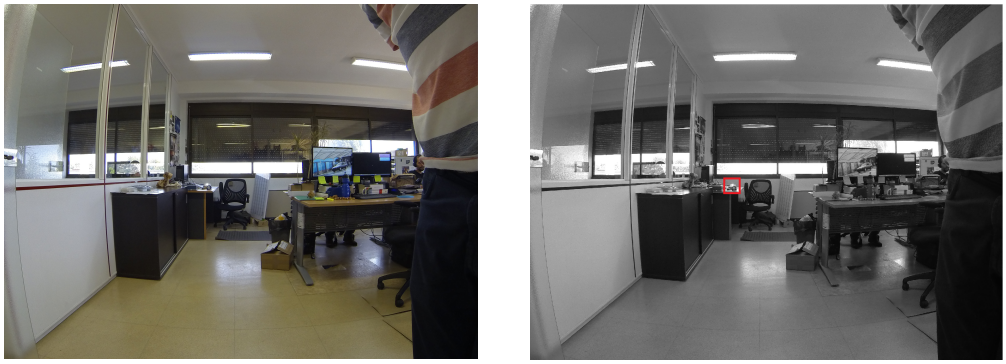


FIGURE 3.8 – Répartition des couleurs RGB dans la définition de la luminance

Cette disproportion est telle que nous avons fait le choix de ne garder que la composante verte de notre image. Cela permet ainsi de diminuer grandement le temps de calcul et de conserver un format de nombre entier. Le rendu final de cette transformation est illustrée par la figure 3.9, qui représente une mise en condition d'échange de données par flux lumineux à une distance de 4,5 mètres. La résolution de cette image est de 72 dpi tandis que sa définition vaut 3000x2250.

3. L'intensité lumineuse perçue.



(a) Image réelle acquise par la caméra (b) Image en niveaux de gris

FIGURE 3.9 – Correction des couleurs

Pour résumer, l'image acquise est transformée en niveaux de gris puis découpée en différentes zones dont le nombre est égal à la quantité de modules transférant de la donnée. Par exemple, l'image représentée en figure 3.10 n'est autre que la zone d'intérêt (en rouge) récupérée des images présentes en 3.9.

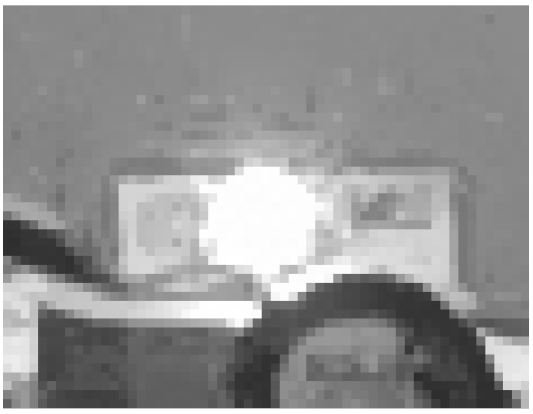


FIGURE 3.10 – Zone d'analyse de la source lumineuse

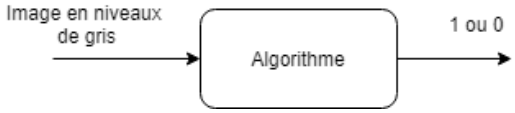
Celle-ci dispose de la même résolution mais sa définition ne vaut plus que 45x30. Le nombre de pixels à traiter pour étudier l'information est donc 5000 fois plus faible que si l'on avait travaillé sur l'image entière. Ceci est sans compter le fait que nous travaillons sur une seule des trois couleurs.

Cette sous-image en niveaux de gris, fournie à l'algorithme de détection sous forme de tableau de deux dimensions, dispose donc d'une taille réduite d'un facteur de 15000 par rapport à un traitement direct sur l'image en sortie de caméra.

3.2.2 Détection de source lumineuse

Le but de cette étape est de permettre de valider si la source lumineuse est allumée ou éteinte à l'instant t. Comme défini précédemment, l'algorithme de traitement

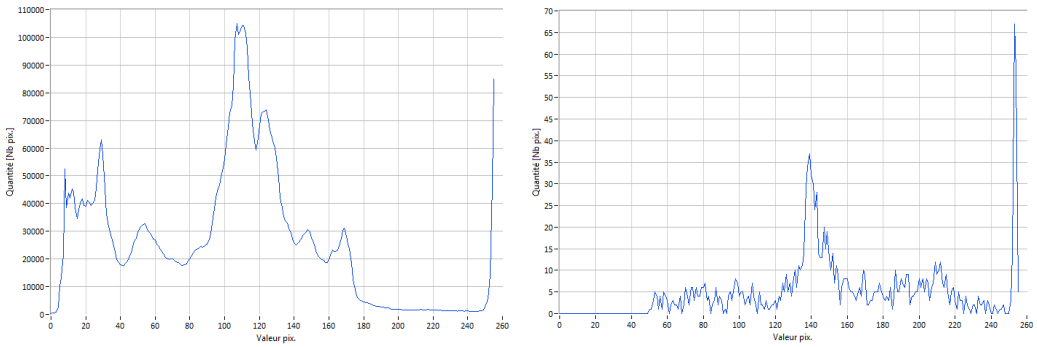
prend comme entrée une image en niveaux de gris et renvoi une valeur binaire : 1 si la source est allumée, 0 sinon.



A l'instar des phases précédentes, celle-ci doit respecter une certaine économie de temps de traitement. Il en découle que des algorithmes complexes de détection ne sont pas envisageables et qu'il faut absolument passer par des techniques basiques. Dans ce contexte, nous avons choisi de retenir deux solutions. La première est basée sur une analyse par seuils de niveaux tandis que la deuxième utilise la notion d'image différence.

La solution basique, consistant à comparer la valeur d'une zone de pixels à un seuil, tire son efficacité du fait qu'à notre époque, les caméras utilisées pour les détections disposent d'une mise au point et d'une correction d'exposition automatique. L'image est donc nette quelque soit la distance de l'objet mais surtout l'équilibrage des couleurs est optimisé afin d'éviter que l'image ne soit ni trop claire, ni trop sombre. Dès lors, à moins d'être en plein contre jour, le seuil fixe suffit à discriminer les différentes états d'une source lumineuse.

La figure 3.11 illustre la méthode permettant de trouver le seuil. En 3.11a nous retrouvons l'histogramme de l'image étudiée en figure 3.10, tandis qu'en 3.11b nous observons celui de la figure 3.10 représentant la zone d'intérêt correspondante. Dans les deux cas, une valeur de 0 est un pixel noir tandis que 255 représente un pixel blanc.



(a) Histogramme de l'image complète (b) Histogramme de la zone d'intérêt

FIGURE 3.11 – Histogramme de l'image

Les points lumineux signent vers un niveau proche de 250. Cependant, si nous placions notre seuil trop proche de cette valeur nous perdrions de la donnée utile relative au halo qu'induit la source. Il ne faut néanmoins pas descendre trop bas

puisque, comme le montrent les histogrammes, de nombreuses informations se situent entre 180 et 220 suivant l'entrée considérée. Le seuil a donc été fixé à 240.

Cette méthode nous offre de bons résultats, cependant une limite est apparue au cours de certaines expérimentations. En effet, si un changement soudain de luminosité ambiante intervenait, la donnée courante transitant dans le flux lumineux serait alors erronée.

Afin d'éviter ce problème, nous avons opté pour une solution basée sur la notion de dérivée temporelle. Elle permet de mesurer le changement d'apparence des pixels entre deux images consécutives. Le logiciel sera donc bien plus réactif aux changements d'exposition lors d'une communication. De plus, comme l'ont observé certains auteurs [85], cette méthode permet également de détecter des zones en mouvement. Cette technique est donc très intéressante pour faire un tracking des sources lumineuses.

En revanche, la réactivité du système ne garantit pas une récupération totale du message transmis. En effet, si une transition lumineuse intervient de manière rapide, le message sera tout de même altéré.

Il faut donc trouver une solution qui viserait à redimensionner la zone d'intérêt en fonction de différentes informations présentes sur celle-ci.

3.2.3 Redimensionnement de la zone d'intérêt

Isoler des régions d'intérêt depuis l'image source comporte deux bénéfices majeurs. Le premier reste évidemment la diminution du nombre d'informations à traiter, ce qui implique un baisse considérable du temps de calcul tandis que le deuxième vise à réduire les fausses alarmes potentielles. Il reste néanmoins des cas de figures où cette zone, comprenant la source lumineuse, n'est pas suffisamment précise et laisse apparaitre, dans le cadre, des perturbations. Bien que nous ayons observé précédemment la faculté de la caméra à régler automatiquement la luminosité et le contraste, l'apparition d'une lumière parasite dans le champ peut à tout moment engendrer des pertes d'informations. Un exemple simple, créé à l'aide d'un volet roulant, est illustré en figure 3.12.

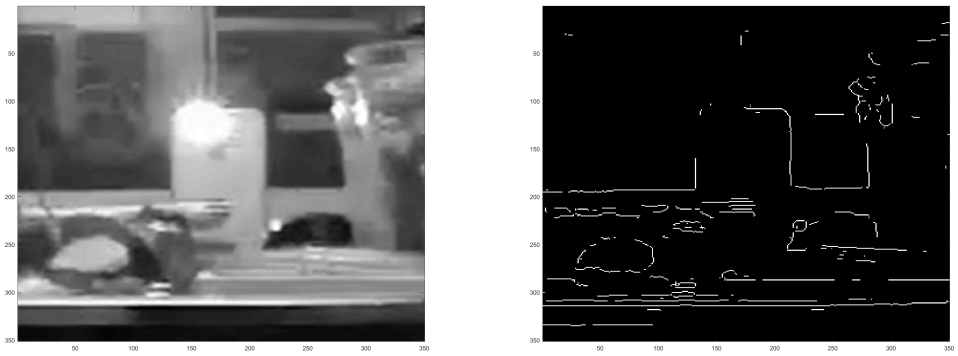
(a) Environnement sombre (b) Environnement à contre jour

FIGURE 3.12 – Source lumineuse soumise à deux environnements

Admettons que nous soyons en pleine transmission d'un message dans l'environnement 3.12a lorsque le volet se lève. L'apport de lumière dans la zone d'intérêt serait alors critique pour le reste du message transmis. Il est donc nécessaire de prévoir un algorithme permettant de discriminer une lumière externe et notre source lumineuse d'intérêt.

Dans un premier temps, nous sommes partis du principe qu'une LED allumée sur une image signait sur des hautes fréquences, c'est à dire que le contour de l'éclairage était parfaitement délimité. Toujours dans l'optique de diminuer le temps de calcul, nous avons choisi d'appliquer un filtre de détection de contour simple, le filtre de Sobel. La figure 3.13 représente une image comportant une source lumineuse avant

et après l'application du filtre.



(a) Image initiale (b) Image filtrée

FIGURE 3.13 – Application du filtre de Sobel

Le test n'est finalement pas concluant puisqu'il est impossible de retrouver l'information pertinente initiale après application du filtre, à savoir la LED allumée.

En réalité, l'hypothèse initiale ne permet pas d'arriver aux résultats escomptés. En effet, le halo engendré par une diode allumée est tel que sa signature n'est pas haute fréquence. Appliquer un filtre de détection de contour ou un filtre passe haut calibré ne permet donc pas d'isoler notre information utile.

Étant donné qu'une LED allumée génère un halo, nous avons décidé de changer notre hypothèse de départ. Pour la suite des manipulations, nous avons supposé qu'une source lumineuse représentée par une LED pouvait être assimilée à une gaussienne dont la représentation 2D est disponible sur la figure 3.14.

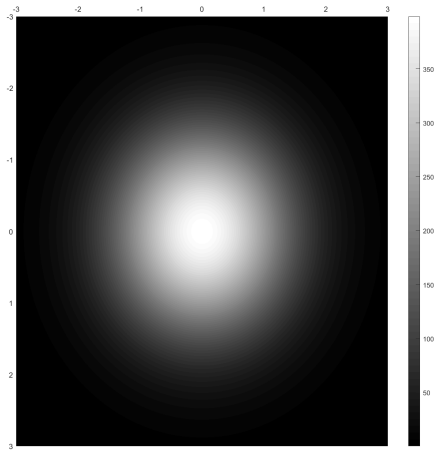


FIGURE 3.14 – Représentation 2D d'une gaussienne

Cette représentation semble reproduire avec justesse la diode allumée en figure 3.13a. En guise de test, nous avons donc construit une image, représentée en figure 3.15, comportant 7 points lumineux gaussiens de niveaux d'amplitude différents. De plus, parmi ces points, un seul dispose de lobes plus larges afin de perturber les autres sources.

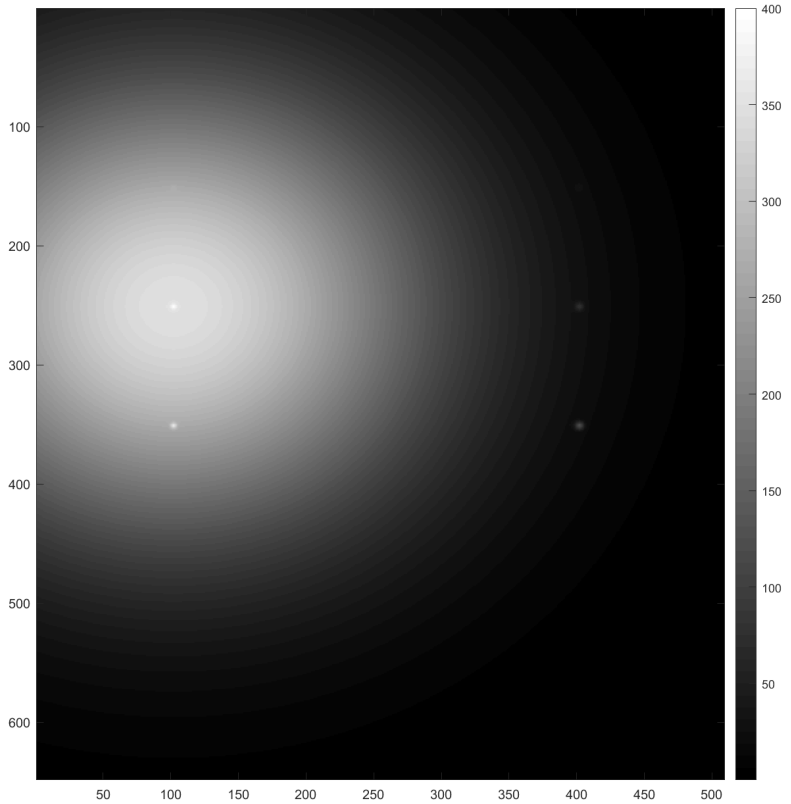
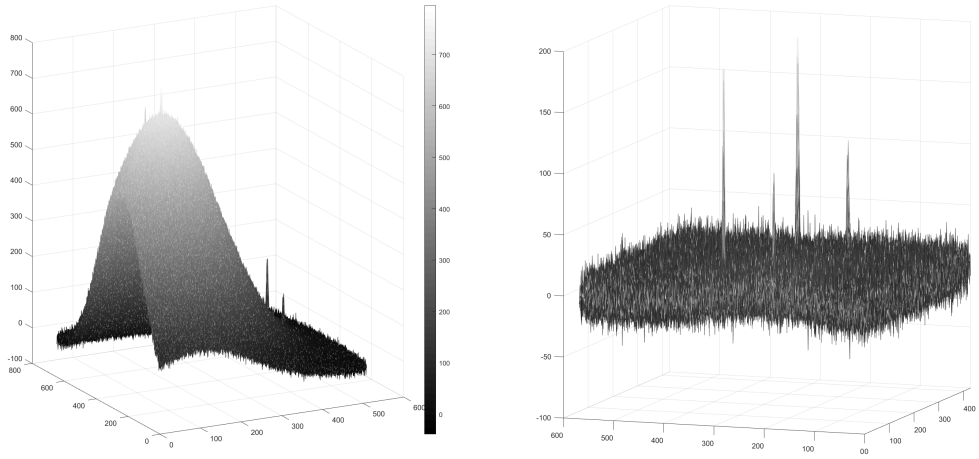


FIGURE 3.15 – Sources lumineuses simulées par des gaussiennes

Dès lors, en réalisant des convolutions entre notre image simulée et une gaussienne calibrée sur une taille suffisamment proche de la taille de notre source lumineuse d'intérêt, nous pouvons l'isoler.

Avant de mettre en place cet algorithme sur un émetteur réel, nous avons validé ce raisonnement en pratique. L'image en figure 3.16a est la représentation 3D de nos simulations de gaussiennes tandis que la figure 3.16b affiche cette même image après convolution avec une gaussienne calibrée (De même taille que les 6 points lumineux de l'image). Enfin, dans le but de rajouter des perturbations et détériorer le rapport signal à bruit, nous avons pris soin de superposer un bruit blanc à toute l'image d'origine.



(a) Avant convolution (b) Après convolution

FIGURE 3.16 – Convolution de l'image simulée et bruitée avec une gaussienne

Les résultats obtenus en figure 3.16b montrent bien la capacité de cet algorithme à isoler la majorité des sources lumineuses. Seules certaines, de trop faible amplitude, n'ont pas pu être discriminées. Toutefois, comme le montre la figure 3.16a, elles étaient déjà difficilement observables avant le traitement.

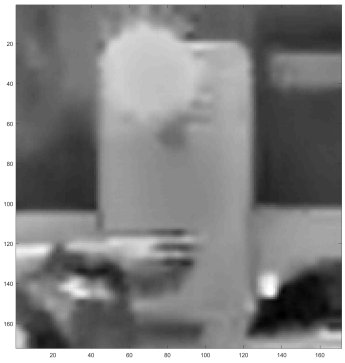
Enfin, dans le but de rendre l'image initiale plus conforme à la réalité, nous l'avons superposée à un fond non noir. La figure 3.17 illustre la différence entre l'image initiale et l'image finale avec le même traitement que précédemment.

(a) Avant convolution (b) Après convolution

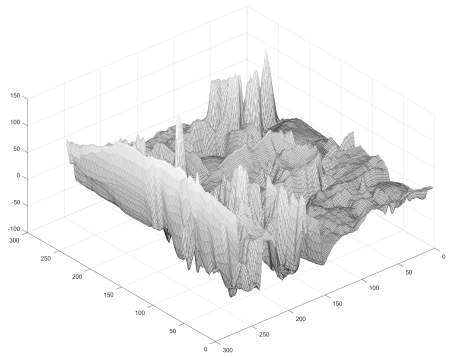
FIGURE 3.17 – Superposition de 3 calques puis convolution

Cet algorithme semble donc suffisamment intéressant pour l'appliquer à un cas réel. A l'instar de la précédente, la figure 3.18 représente donc l'image source et le

résultat obtenu en adaptant la taille de la gaussienne à celle de la LED.



(a) Avant convolution



(b) Après convolution

FIGURE 3.18 – Convolution d'une gaussienne avec une image obtenue en condition réelle

Le résultat obtenu ne permet toujours pas de détecter l'émetteur au milieu du reste de l'image. Cette contre performance de l'algorithme en condition réelle vient en réalité d'une mauvaise hypothèse initiale. En effet, la figure 3.19 montre notamment une forte saturation de la LED en son point central. Il n'est donc pas approprié de l'assimiler à une gaussienne.

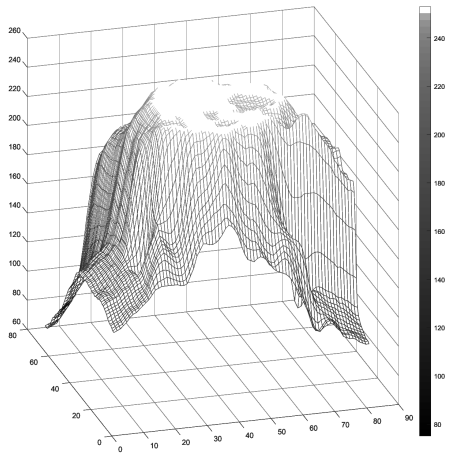


FIGURE 3.19 – Représentation 3D d'une source réelle

Nous avons donc changé d'approche. Si nous ne sommes pas capables de détecter la LED dans des conditions difficiles, essayons plutôt de supprimer des parties de la zone d'intérêt qui, à coup sûr, ne sont pas porteuses d'informations utiles.

Afin de mieux comprendre les informations présentes sur l'image nous avons réalisé des histogrammes locaux sur la totalité de celle-ci. En prenant des blocs de deux dimensions de taille paramétrable nous avons vu la présence de saturation au niveau des contre-jours. Dès lors, en soustrayant à chaque bloc la valeur minimale de son histogramme, nous nous affranchissons totalement de ces zones de saturation. Il faut donc réitérer ce processus afin de parcourir l'image entière. La figure 3.20 illustre ce traitement en prenant comme exemple une LED située juste devant un éclairage extérieur intense.

(a) LED allumée devant un éclairage extérieur

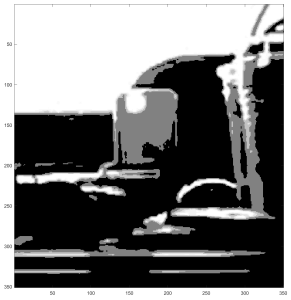
(b) Image source après traitement

FIGURE 3.20 – Détection de zones mortes

L'éclairage en arrière plan étant uniforme, il est en grande partie supprimé. Cependant, bien que leurs textures semblent identiques en tout point, certains blocs ne voient pas tous leurs pixels signer sur une seule et unique valeur. Nous avons alors mis en place un outil basé sur une diminution de profondeur de l'image permettant d'en faire ressortir les hautes fréquences. Ainsi, certaines valeurs de pixels auparavant très proches sont désormais identiques. Cet outil est représenté en figure 3.21.

(a) Image codée sur 7 bits

(b) Image codée sur 4 bits



(c) Image codée sur 2 bits

FIGURE 3.21 – Changement de profondeur de l'image

Enfin, nous nous sommes placés dans quatre configurations différentes pour valider la totalité de la chaine de traitement :

— Source éteinte, volet fermé
— Source éteinte, volet ouvert
— Source allumée, volet fermé
— Source allumée, volet ouvert

Ces quatre conditions représentent les différents cas que nous sommes en mesure d'observer pendant une transmission. Le système doit donc être capable de s'adapter à ces différents cas de figure en temps réel. Voici les résultats obtenus pour des images sources dont la profondeur est passée de 8 à 4 bits.

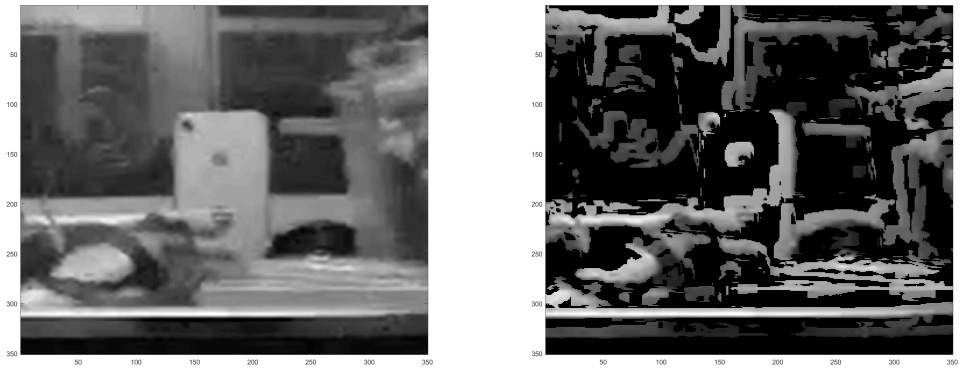


FIGURE 3.22 – Source éteinte, volet fermé

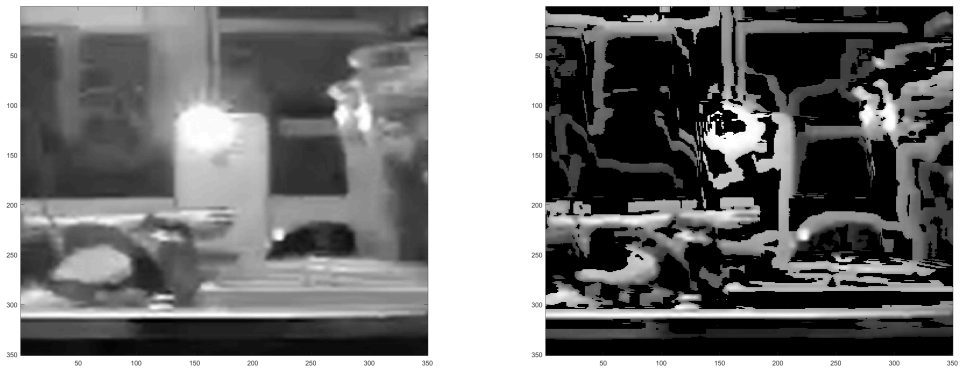


FIGURE 3.23 – Source allumée, volet fermé

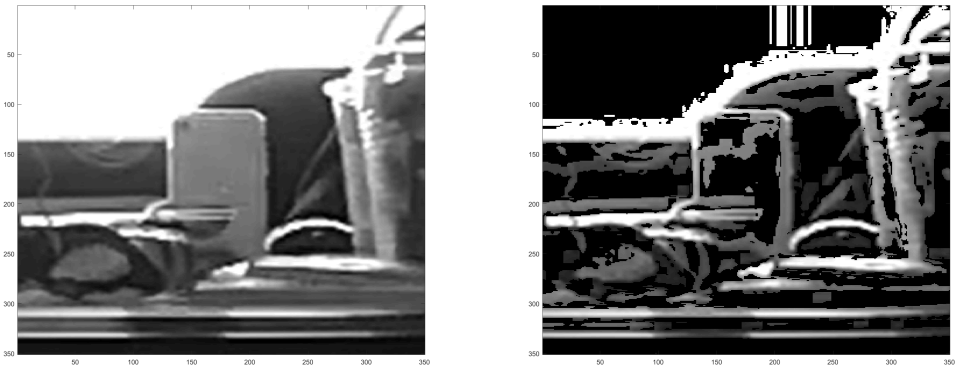


FIGURE 3.24 – Source éteinte, volet ouvert

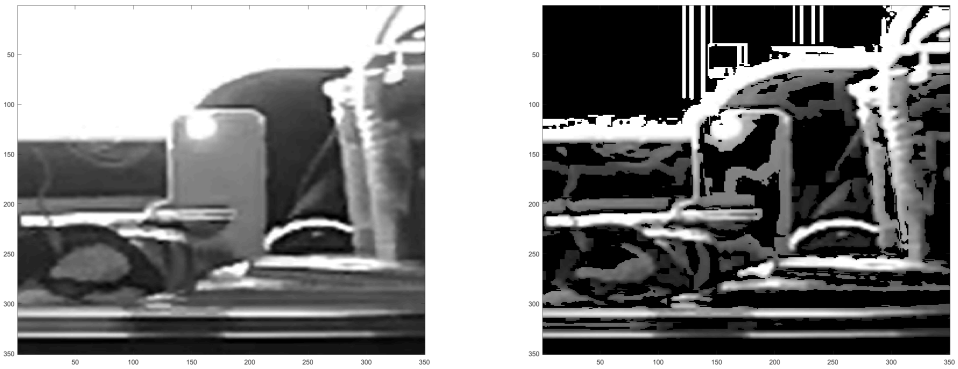


FIGURE 3.25 – Source allumée, volet ouvert

Cet algorithme répond donc parfaitement à notre problématique. En effet, il est désormais possible de discriminer la majeure partie de la lumière extérieure lorsque le volet est ouvert (Bandes blanches verticales diminuées par rapport à la figure 3.20b. La suite de la démarche consiste à réaliser un masque sur la zone d'intérêt rectangulaire. Certains pixels de cette zone se verront alors attribuer un coefficient nul s'ils ne portent pas d'information utile. Par ce biais, nous nous affranchissons de lumières parasites pouvant perturber un message.

De plus, l'algorithme étant assez léger, les temps de calculs sont négligeables compte tenu du FPS considéré. Ce traitement peut donc être fait en permanence et l'ajustement de la zone d'intérêt est ainsi réglé en temps réel. Attention toutefois à calibrer correctement la taille du bloc. En effet, si celui-ci se retrouve trop petit, la zone de saturation de la source risque d'être considérée comme inutile.

3.2.4 Conclusion

Pour des raisons de respect de simplification maximale, nous avons opté pour la solution de base, à savoir la méthode de seuillage simple. Puisque nos premières applications mettront en place des sources lumineuses fixes, nous n'avons pas besoin de surcharger le temps de calcul par une optimisation de la détection de mouvement.

Caractéristique	Seuillage basique	Dérivée temporelle
TEB en milieu classique	Identique	
TEB en milieu changeant	Moyen	Faible
Tracking	Élevé	Très élevée
Temps de calcul	Très faible	Faible

Table 3.2 – Comparatif des deux principales méthodes de détection sur image en intérieur

Il sera cependant important d'approfondir par la suite la deuxième solution afin de proposer de nouveaux services.

3.3 Détails expérimentaux de la communication montante

Le but de cette manipulation est de proposer un système capable de transférer de la donnée par flux lumineux en provenance de plusieurs émetteurs. Une caméra sera donc placée dans une pièce et une ou plusieurs sources enverront de la donnée vers ce photo-récepteur.

Les expérimentations réalisées au cours de cette étude ont été menées avec une caméra proposant une définition de 848x480 pour une vitesse de 240 FPS.

D'un point de vue logiciel tout reste identique aux expériences mises en place dans le chapitre 2. La partie modulation et démodulation ainsi que les entrées-sorties du contrôle/commande sont donc inchangées. Le logiciel de réception s'adapte en revanche au nombre de sources dans le but de pouvoir traiter plusieurs informations en parallèle. L'architecture globale de la gestion des différentes sources est proposée en annexe A.5.

Figure 3.26 – Détection de deux informations simultanées

Les premiers résultats ne furent néanmoins pas ceux attendus d'un point de vue du débit. La communication était bonne et la partie logicielle fonctionnait bien, en revanche, le débit atteint ne dépassait pas 10 bps. En utilisant la même modulation que précédemment, il était prévisible que le débit chute grandement. Nous avions vu que celui-ci était 3,3 fois inférieur par rapport à une communication OOK. Compte tenu de l'inégalité (3.1) définissant la fréquence de clignotement et en prenant en compte cette modulation, le débit maximum pouvant être atteint avec cette caméra était d'environ 36 bps.

Il a donc fallu optimiser le logiciel de démodulation pour tendre vers cette dernière valeur de vitesse de transmission.

3.3.1 Optimisation de la détection et de la démodulation DPPM

Comme vu précédemment, dès lors que la sous-image contenant la zone d'intérêt est transférée à la partie de traitement, deux opérations sont effectuées. La première consiste à discriminer un état allumé ou éteint de la source lumineuse tandis que la seconde gère toute la partie démodulation.

Dans un premier temps, cette discrimination est gérée de la façon la plus simple possible. Si un pixel dépasse le seuil dans la zone d'intérêt nous considérons que l'état de l'émetteur est haut. Nous estimons que la zone est suffisamment bien délimitée pour garantir la cohérence d'une détection sur seulement un pixel.

En pratique ce seuillage est réalisé en deux temps. Nous récupérons la première fois uniquement les pixels supérieurs à 210, ce qui permet d'analyser l'image obtenue puis, par la suite, d'ajuster avec un nouveau paramètre. cette image intermédiaire est illustrée ci-dessous :

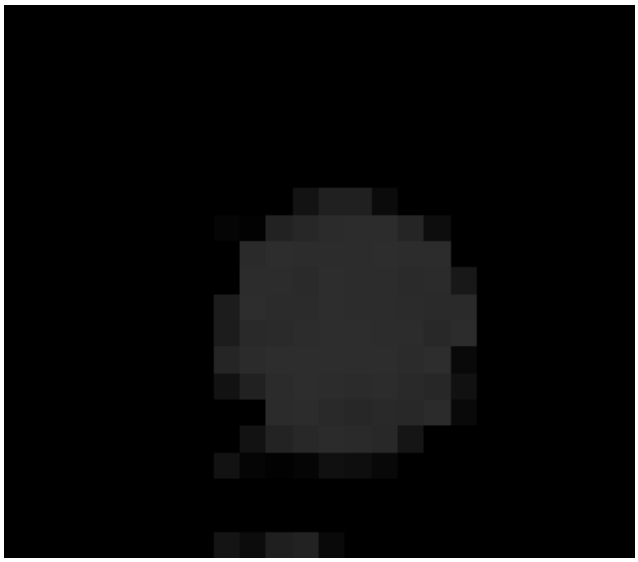


FIGURE 3.27 – Zone d'intérêt (23x20) après première étape de seuillage

Ce nouveau paramètre a pour valeur par défaut 30 afin de retrouver le niveau de seuil général à 240 obtenu dans la partie 3.2.2. Ce procédé permet de vérifier rapidement que l'exposition de la zone d'intérêt était correcte et à ainsi mis en exergue le fait que la correction d'exposition automatique de la caméra rendait la solution de seuillage extrêmement performante.

Quant à l'algorithme utilisé pour la démodulation, il reprend exactement le même principe que dans le chapitre 2. Le code général correspondant est disponible en annexe A.4. L'entrée du programme n'est donc plus une ligne numérique mais l'état déterminé par l'étape de seuillage.

Le code fonctionne comme suit :
L'algorithme commence par attendre un front montant. Dès que celui-ci est détecté nous rentrons dans un phase de comptage. C'est-à-dire que logiciel va compter le nombre d'images consécutives où la source lumineuse reste éclairée. Une fois que celle-ci s'éteint, une variable appelée "porte" est mise à jour avec le compteur courant. Cette valeur est extrêmement importante dans l'algorithme puisqu'elle sert de base pour identifier si le bit transitant à l'instant t est égal à 0 ou 1. En effet, la modulation a été effectuée de telle sorte qu'un 0 est codé avec un état bas de la longueur de la porte, tandis qu'un état haut dure deux longueurs de porte. Deux méthodes ont été retenues pour le calcul :

— La première consiste à calculer la longueur de la porte pour chaque bit reçu. Le point positif de cette méthode réside dans le fait que si la source à un débit variable, le récepteur s'adaptera automatiquement.
— La seconde nécessite uniquement un calcul de la longueur de porte sur le premier bit reçu. Cette méthode à l'avantage de garder une taille fixe tout au long de la communication et ainsi éviter une perte d'information sur une erreur d'estimation de la porte.

Le choix s'est finalement porté sur la première solution qui garantit au système une totale flexibilité sur le débit de l'émetteur.

La valeur du bit est donc calculé lors d'un nouveau front. Il s'agit en fait de calculer le nombre d'images entre le dernier front descendant et celui-ci pour enfin comparer cette valeur à celle de la porte. C'est ce qu'on appellera le "motif". Si ce temps d'état bas est 1,5 fois plus long que la porte, la valeur vaut 1 et le logiciel place ce bit dans un buffer de 16 éléments afin de former le mot de 16 bits. En revanche, si cet état bas est plus long que 2 fois la porte, la lecture du bit est réinitialisée tout comme le mot entier.

Enfin, une fois le buffer rempli, l'entier de 16 bits est renvoyé en sortie de l'algorithme et le buffer est remis à zéro.

Tous ces paramètres ont donc été choisis de façon empirique et il est indispensable de les affiner pour augmenter le débit au maximum.

Afin de tester les différents changements de paramètres réalisés au cours des

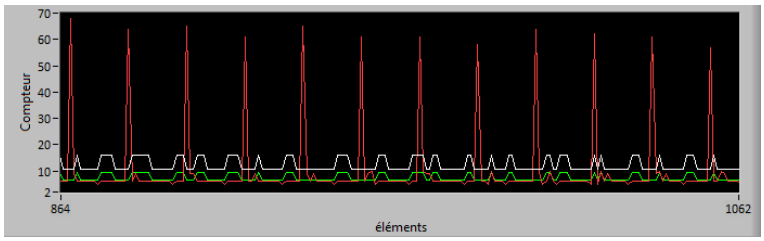
expériences nous avons mis en place un message fixe et répétable permettant de comparer les différents taux d'erreur et ainsi vérifier l'importance ou non de changer le paramètre en question. Ce message est composé d'une salve de 50 nombres entiers consécutifs codés sur 16 bits, ce qui représente un total de 800 bits par transmission.

3.3.1.1 Influence de la précision de la porte

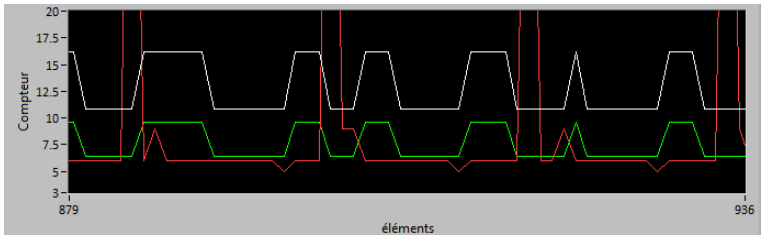
La première étape d'optimisation a été réalisée en jouant sur la valeur de la porte au cours du temps. La figure ci-dessous illustre parfaitement les premières recherches. Plus précisément, Les graphes représentés en 3.28, affichent une partie d'une transmission. Les trois courbes représentent les grandeurs suivantes :

— Rouge : Taille du motif en nombre d'images. Évidemment, la longueur de celui-ci est directement impactée par le débit de l'émetteur.
— Vert : Seuil bas permettant de déterminer la valeur du bit courant. Si le motif est plus haut que ce seuil alors le bit vaut 1, 0 sinon.
— Blanc : Seuil haut délimitant les différents mots. Dès lors que la longueur du motif est plus importante que le seuil haut, un nouveau mot est mis en place.

Comme étudié précédemment, ces deux seuils sont dérivés en chaque instant de la taille de la porte. Le graphe 3.28b, qui représente un zoom du 3.28a, affiche bien une variation des courbes blanches et vertes en temps réel.



(a) Snapshot d'une transmission



(b) Zoom sur 3 bits

FIGURE 3.28 – Représentation du motif lors d'une transmission à 20 Hz

Cette méthode mettant à jour les seuils lors de chaque nouveau bit reçu ne permet pas d'obtenir les résultats escomptés. En effet, lors de chaque changement d'état de la source lumineuse, une erreur peut être produite car la vitesse de variation de la LED n'est pas infinie. Il se peut donc que la caméra capte des images en pleine

transition et assimile un état indéterminé comme un 1 ou un 0. Le fait d'augmenter le débit implique des temps d'allumage de la source lumineuse plus courts, ce qui amplifie l'importance des erreurs des changements d'état. Par exemple, à 10 Hz l'erreur possible sur une longueur de porte est de maximum 10% alors qu'elle est multipliée par 3 à 20 Hz. Il devient donc très difficile de comparer cette grandeur à un seuil fixe et les résultats le prouvent : à 10 Hz, sur 50 mots émis, tous sont récupérés alors qu'à 20 Hz, seulement 13 sont transmis.

En regardant de plus près le graphe 3.28b, nous pouvons d'ores et déjà observer des mots erronés. Lors de la transmission du premier des trois mots visibles sur ce graphe, il apparait un maximum local (en rouge) d'une valeur comprise entre 7,5 et 10 qui semble être le double de la valeur basse et continue, ce qui prouve que le bit rencontré à ce moment-là valait 1. Or, nous pouvons voir que le seuil (en vert) était situé au-dessus et que la valeur définitive renvoyée pour ce bit était 0.

Il faut donc trouver un moyen de diminuer ces variations sans pour autant les annuler et retomber dans la problématique abordée en page 113. Le fait d'introduire une notion de moyenne glissante dans le calcul de la largeur de la porte permet non seulement d'atténuer les variations mais aussi de prendre en compte un historique de données.

La figure 3.29 représente les différentes expérimentations mises en œuvre pour tester la moyenne glissante.

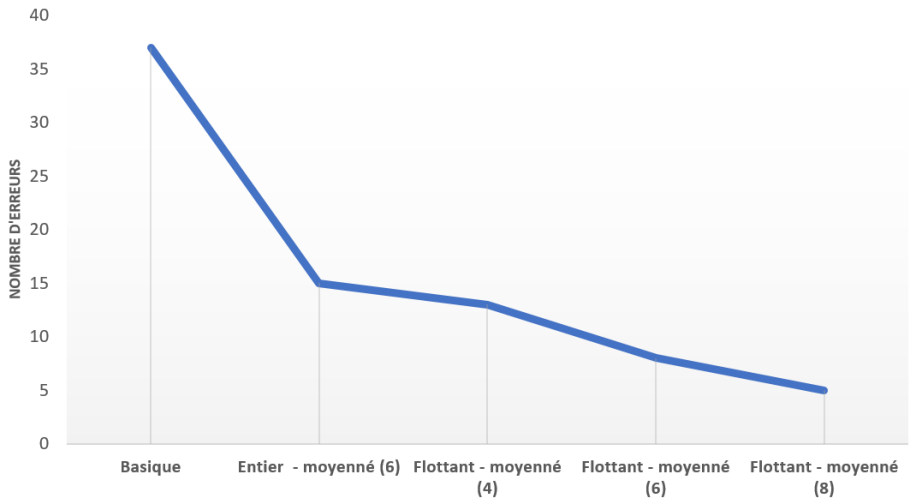


FIGURE 3.29 – Évolution du taux d'erreur en fonction de la valeur de la porte lors d'une communication à 20 Hz

Le simple fait de moyenner sur 6 points la valeur de la porte diminue par plus de deux fois et demi le taux d'erreur lors d'une communication à 20 Hz. Cette valeur, jusqu'à présent entière, est donc devenue un nombre à virgule. En prenant ce dernier point en compte et en moyennant jusque sur une profondeur de 8 points le taux d'erreur se rapproche progressivement de 0.

Forts de cette expérience, nous avons renouvelé le processus sur un échelon de fréquences allant de 16 Hz à 25 Hz tout en effectuant des moyennes glissantes ayant une profondeur de un à vingt points. Le graphe 3D disponible sur la figure 3.30 croise ainsi tous les tests.

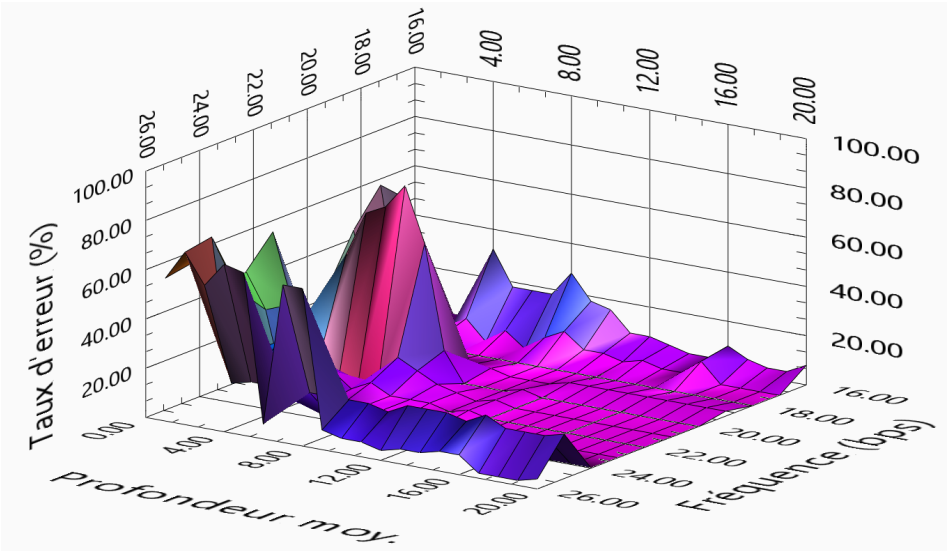


FIGURE 3.30 – Taux d'erreur en fonction de la moyenne appliquée à la porte

Il apparait clairement une zone où le taux d'erreur est minimal. Celle-ci apparait à l'intersection des deux conditions suivantes :

— La profondeur de la moyenne glissante doit être supérieure à 8
— La fréquence doit être inférieure à 24 Hz

Il faut cependant être conscient qu'au plus la profondeur est importante, au plus l'inertie lors d'un changement de débit brutal de l'émetteur est grande. Notre choix final s'est porté sur une profondeur maximale de 16. En effet, en nous plaçant dans le pire des cas, à savoir une source lumineuse qui se mettrait à changer complètement de fréquence d'émission, nous ne perdrions que 2 bits lors de la transmission.

Par exemple, la figure 3.31 reprend exactement la même transmission que la 3.28 à l'exception d'une valeur de porte moyennée sur 16 points.

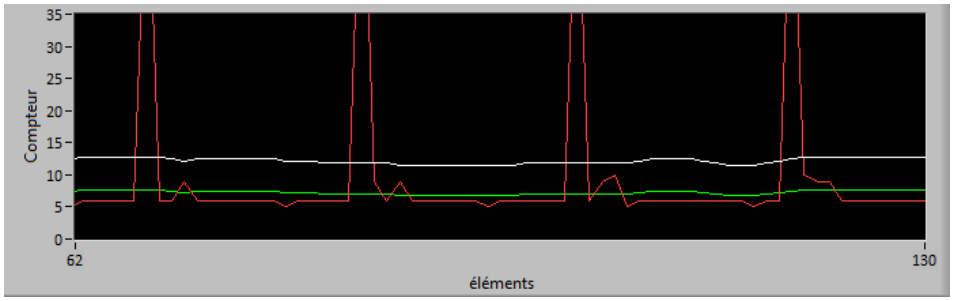


FIGURE 3.31 – Représentation du motif moyenné sur 16 échantillons lors d'une transmission à 20 Hz

Cette méthode est ainsi validée. Le lissage des seuils dû à cette moyenne permet effectivement d'éviter de rater des valeurs de bit égales à 1 tout en garantissant au système une bonne flexibilité concernant un changement de débit soudain.

3.3.1.2 Influence des seuils de détection

Nous avons vu dans la partie précédente l'importance d'estimer correctement la taille de la porte. La précision de cette valeur est primordiale puisque comme le représente la figure 3.32, la différence théorique entre un 0 et un 1 est représentée par un état bas dont la longueur n'est autre qu'un multiple de la durée de la porte.

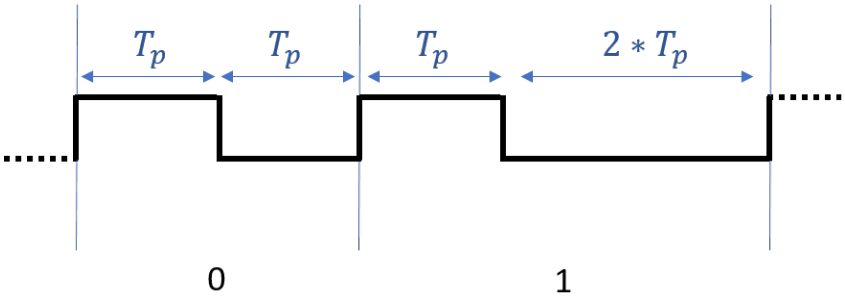


FIGURE 3.32 – Largeur de motif théorique

En partant de cette théorie il vient l'équation $S_d = \alpha * T_p$, avec α un coefficient réel. Dans un premier temps nous avons choisi $\alpha = 1{,}5$ puisque cette valeur est le barycentre des largeurs correspondantes à un 0 et un 1.

Cependant une problématique est apparue lorsque nous voulions tester des communications à des débits différents. En effet, il se trouve que dans la pratique, le seuil optimal n'est pas le même à chaque fréquence. Le phénomène, résumé sur la figure 3.33, montre que plus le débit de la source lumineuse est faible, plus la valeur du seuil va avoisiner la largeur d'un motif représentant un 1. Cela implique directement une augmentation de la probabilité de ne pas détecter un 1. Inversement à débit plus important, le seuil est bas ce qui induit une forte chance de confondre les 0 avec des 1.

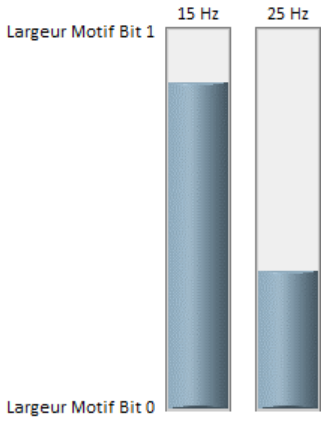


FIGURE 3.33 – Comparaison des seuils en fonction de la fréquence

Suite à ce problème, deux solutions ont été envisagées. La première, basée sur une méthode de dichotomie, consiste à trouver de manière empirique un seul seuil optimisé dans le but de minimiser le taux d'erreur pour un intervalle de fréquences prédéfinies. C'est la méthode qui a été utilisée lors de différentes expériences concernant la moyenne glissante. Sa facilité de mise en place ainsi que les résultats obtenus nous semblent intéressants. En effet, sur une fourchette d'utilisation entre 15 et 25 bps, un seuil retenu de 1,57 ne déclenche aucune erreur sur les 800 bits.

Dans un soucis d'amélioration il a fallu par la suite se pencher sur un seuil adaptatif. Celui-ci est directement calculé à partir de la largeur de la porte. Ainsi le coefficient est en permanence affiné lors de chaque nouveau bit reçu et optimisé pour chaque fréquence.

La figure 3.34 représente les différents coefficients relevés lors de nos expériences.

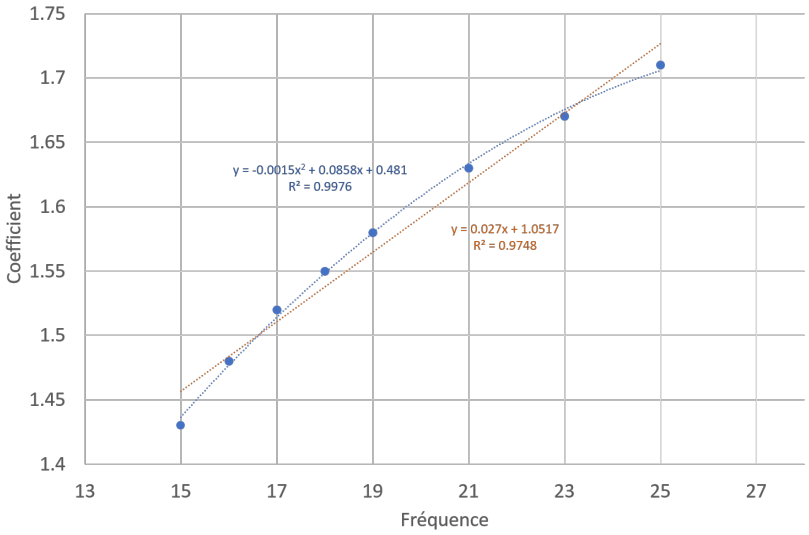


FIGURE 3.34 – Code de gestion du seuil

Afin de mettre en place le calcul, notre algorithme commence par récupérer la fréquence d'émission de la source lumineuse à l'aide du nombre d'images nécessaire à la réalisation d'un mot de 16 bits :

$$F_e = \frac{F_{ps} * T_{mot}}{N_{image}} \tag{3.3}$$

Sachant que F_e représente la fréquence d'émission (en bps), F_{ps} le nombre d'images par secondes de la caméra, T_{mot} la taille d'un mot (en bits) et N_{image} le nombre d'images.

Dès lors, il suffit d'appliquer la formule empirique suivante pour trouver le coefficient multiplicateur :

$$\alpha = -0{,}0015 * F_e^2 + 0{,}0858 * F_e + 0{,}481 \tag{3.4}$$

Cette équation du second degré peut-être approximée par la fonction affine abordée en figure 3.34 et présentée en (3.5). L'intérêt ici est de réduire la complexité pour gagner en temps de calcul sans sacrifier la performance de la méthode.

$$\alpha = 0{,}027 * F_e + 1{,}052 \tag{3.5}$$

L'équation finale pour obtenir le seuil à tout instant est donc établie en (3.6)

$$S_d = (-0{,}0015 * (\frac{F_{ps} * T_{mot}}{N_{image}})^2 + 0{,}0858 * (\frac{F_{ps} * T_{mot}}{N_{image}}) + 0{,}481) * T_p \tag{3.6}$$

Dans notre cas, sachant que $F_{ps} = 240$, $T_{mot} = 16$ bit et que nous utilisons la fonction affine pour le calcul du coefficient α, elle se résume à :

$$S_d = (\frac{103{,}68}{N_{image}} + 1{,}052) * T_p \tag{3.7}$$

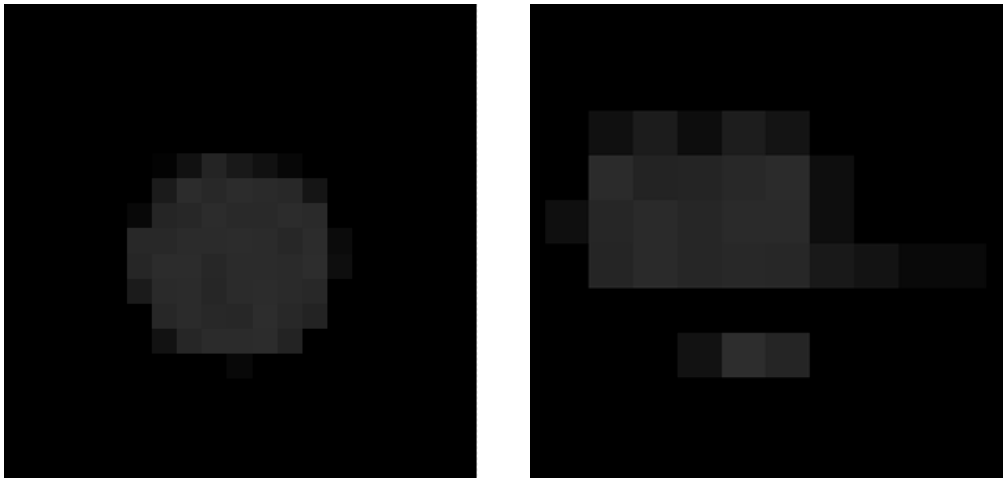
Enfin, quand au seuil haut, sa précision n'est pas une priorité. En effet, il est principalement utilisé pour séparer des mots consécutifs ou pour détecter une anomalie dans la transmission d'un message. Il n'est alors pas nécessaire de le rendre ajustable en temps réel. Il faut faire un compromis entre une marge confortable pour éviter les fausses alarmes et ne pas le placer trop haut pour que le système puisse répondre rapidement lors d'une erreur dans une trame.

3.3.1.3 Amélioration du traitement de la zone d'intérêt

Nous avons vu dans le deuxième paragraphe de la partie 3.3.1 que lorsqu'au moins un pixel signait dans une gamme de valeurs particulières nous considérions que la source lumineuse était allumée. Il s'avère que ce procédé est intéressant pour valider tous les étages de la communication mais il n'est pas robuste lorsque l'on passe le système en conditions opérationnelles.

La problématique vient du fait que se baser sur un seul pixel est un grosse source d'erreur. Ceci peut très bien être un reflet ou un artefact. Il faut donc se fier à plusieurs pixels lors de ce traitement.

Ce nombre de pixels total ne peut pas être fixe puisque, comme l'illustre la figure 3.35, ce nombre peut varier en fonction d'une multitude de paramètres tels que la puissance d'émission ou la distance caméra-source.



(a) Distance caméra-source : 95 cms (b) Distance caméra-source : 475 cms

FIGURE 3.35 – Zone d'intérêt d'une même source observée à différentes distances

Ce nombre ne peut pas non plus être un pourcentage de pixels par rapport à la taille de la zone d'intérêt étant donné que celle-ci peut avoir une taille variable. En effet, soit la recherche de celle-ci est automatique à l'aide d'une mire, ainsi une marge d'erreur est nécessaire, soit elle est paramétrée de façon manuelle. La version du logiciel utilisée pour les expériences utilise cette dernière méthode qui est représenté en 3.36.

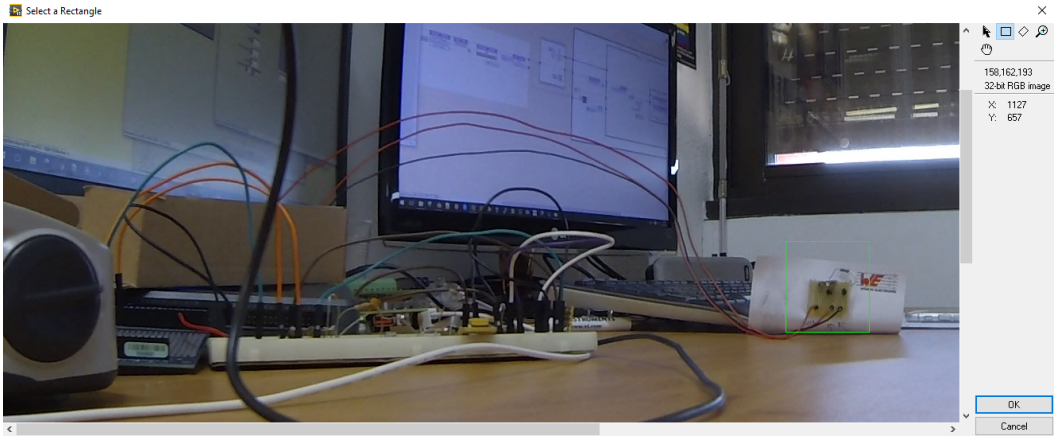


FIGURE 3.36 – Boite de dialogue pour la sélection de la zone d'intérêt

La solution envisagée est donc la suivante. Lors de chaque nouvelle image, le logiciel enregistre le nombre de pixels étant au dessus du seuil. Ainsi, il peut calculer le maximum de cette valeur entre 2 images consécutives, N_{max}. Une fois que la source lumineuse commence à émettre, le logiciel dispose très vite d'une approximation du nombre de pixels au dessus du seuil lorsque la LED cible est allumée. Enfin, à chaque nouvelle acquisition nous comparons le nombre courant de pixels, N, à N_{max}. Cela revient en fait à savoir si $N > \beta * N_{max}$, où β n'est autre qu'un coefficient compris entre 0 et 1. A l'extrême, si β vaut 0, nous revenons sur la méthode initiale. Dans notre cas, nous l'avons fixé à 50%, ce qui donne un résultat constant peu importe la distance.

Cette méthode dispose néanmoins de limites :

— Ce nombre maximum calculé n'a plus de sens si la source est en mouvement et que le tracking n'est pas suffisamment réactif. La zone d'intérêt pourrait alors rater une partie de la LED.
— Plus la distance caméra-source est grande, plus le nombre de pixels au dessus du niveau du seuil est faible. Cette méthode n'est pas adaptée à une grande distance. En revanche, comme le montre la figure 3.35b, $N = 30$ lorsque nous établissons une communication à environ 5 mètres. Nous pouvons donc utiliser cette méthode dans toutes nos applications mais ce paramètre est à prendre en compte.

3.3.2 Mesure de la distance du module communiquant

Ce chapitre montre qu'il est possible de mettre en place un réseau de système communiquant basé sur une architecture en étoile. Cela veut dire que plusieurs sources lumineuses peuvent émettre des données différentes en direction d'un seul et unique concentrateur. La façon d'interpréter ces données peut être double :

— Les émetteurs sont totalement indépendants et transmettent leurs propres messages à la passerelle
— Les émetteurs sont couplés et transmettent une seule et même donnée. Le débit est alors multiplié par un facteur égal au nombre de sources couplées.

De façon générale, lorsque un message est transmis à l'aide de plusieurs LED, celles-ci sont disposées de façon relativement proches. Il peut-être utile pour notre système de savoir déterminer si le message qu'il reçoit provient d'un motif de LED ou de plusieurs LED indépendantes. Notre idée est donc de fixer un espacement minimum à respecter pour que l'algorithme considère que différentes sources sont décorrélées.

Nous avons choisis d'utiliser une méthode qui calcule directement la distance *dist* entre 2 points sur une image. En appliquant quelques règles simples de trigonométrie et en s'appuyant sur la figure 3.37, il vient :

$$dist = \frac{2D\Delta_x \tan\frac{\varphi_0}{2}}{x_0} \tag{3.8}$$

φ_0, exprimé en radians, représente le FOV horizontal de la caméra, Δ_x l'écart sur l'image en pixels des points et D la distance entre la caméra et les 2 sources. Dans tout ce chapitre les distances "physiques" seront exprimées en mètres.

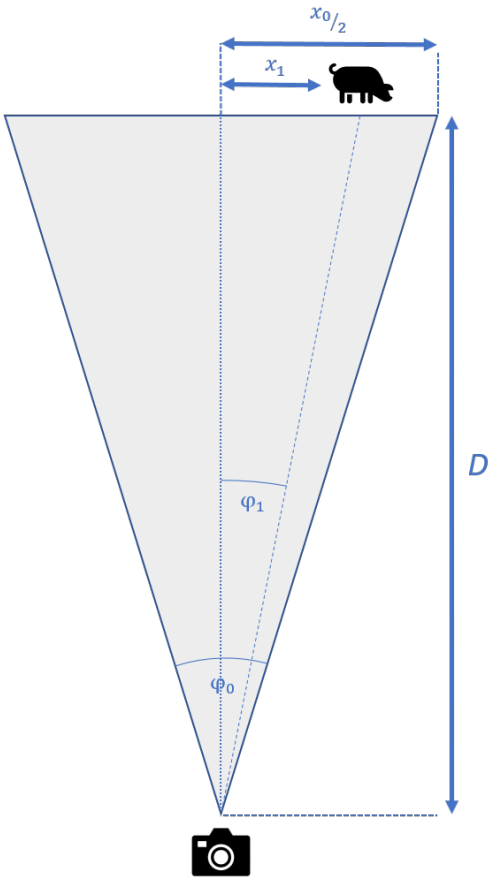


FIGURE 3.37 – Schéma d'un objet pris en photo par une caméra

Cette méthode dispose de deux inconvénients majeurs :

— La distance entre 2 points sur une image n'est mesurable que si ceux-ci sont placés à une distance relativement identique à la caméra. La notion de profondeur n'est donc pas prise en compte.
— Il n'est pas possible de déterminer cette longueur D en utilisant uniquement cette capture.

Pour résumer, il nous manque une dimension dans notre calcul et il est impossible de calculer *dist* en se basant uniquement sur ces hypothèses.

Nous avons donc mis en place une expérience basée sur le principe de stéréoscopie qui produit une vue composée de deux images gauche et droite, réalisée par deux capteurs optiques prenant une même scène à partir de deux points de vue légèrement distants, mais impérativement à la même hauteur et à la même distance du plan comportant les deux capteurs optiques. Il est donc indispensable de veiller à minimiser les erreurs visibles sur la figure 3.38.

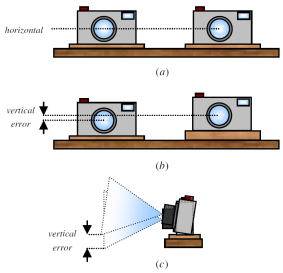


FIGURE 3.38 – Alignement des caméras pour obtenir une image stéréoscopique

Cette invention, datant du XIX° siècle est à mettre au crédit de Charles Wheatstone [86, 87] . La méthode est considérée comme passive [88] puisqu'aucune lumière additionnelle n'est requise, comme par exemple un télémètre laser.

La figure 3.39 représente l'expérience stéréoscopique tout en supposant que les deux caméras sont alignées, à l'instar de nos yeux, sur le même axe horizontal et dans un même plan vertical. Les axes de visée des deux caméras doivent également être dirigés dans la même direction.

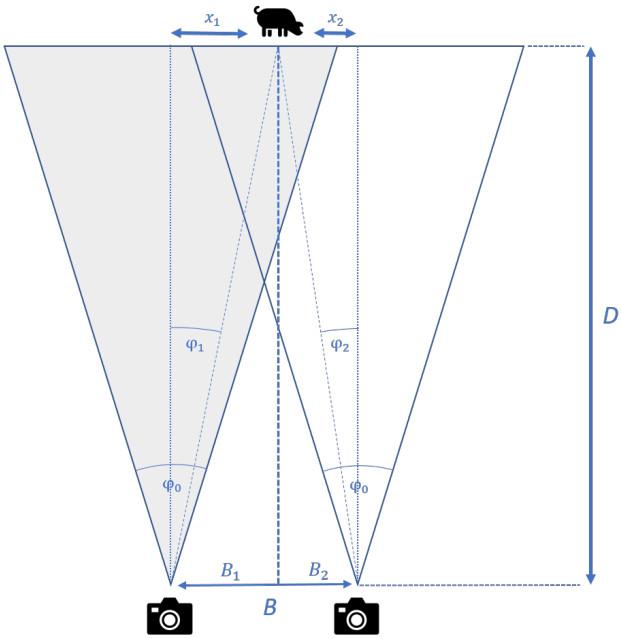


FIGURE 3.39 – Schéma d'un objet pris en photo par deux caméras

Sur cette figure, B représente la distance séparant les deux caméras. Dans le but de calculer la distance D comprise entre l'objet et le plan des capteurs optiques nous pouvons commencer par exprimer B en fonction de B_1 et B_2 et obtenir l'égalité suivante par trigonométrie :

$$B = B_1 + B_2 = D \tan \varphi_1 + D \tan \varphi_2 \tag{3.9}$$

Les axes de prises de vues doivent être parallèles, ainsi, φ_1 et φ_2 représentent respectivement les angles, en radians, entre l'axe optique de chaque caméra et l'objet.

D peut donc être exprimée comme suit :

$$D = \frac{B}{\tan \varphi_1 + \tan \varphi_2} \tag{3.10}$$

Or, à l'aide de la figure 3.39 et en utilisant une formule élémentaire de trigonométrie il vient :

$$\tan \varphi_1 = \frac{x_1}{D} \qquad \tan \frac{\varphi_0}{2} = \frac{\frac{x_0}{2}}{D} = \frac{x_0}{2D} \tag{3.11}$$

En appliquant cette relation à φ_1 et φ_2 nous obtenons :

$$\tan \varphi_1 = \frac{x_1 \tan \frac{\varphi_0}{2}}{\frac{x_0}{2}} \qquad \tan \varphi_2 = \frac{-x_2 \tan \frac{\varphi_0}{2}}{\frac{x_0}{2}} \tag{3.12}$$

Le résultat final est donné en remplaçant les valeurs de $\tan \varphi_1$ et $\tan \varphi_2$ dans l'équation 3.10 :

$$D = \frac{B x_0}{2 \tan \frac{\varphi_0}{2} (x_1 - x_2)} \tag{3.13}$$

En disposant de la sorte deux caméras dans un même plan il est alors possible de mesurer la distance de celles-ci à un objet. Nous avons donc mis en pratique cette notion afin de vérifier la véracité des résultats en prenant en compte les erreurs liées à la résolution et à la distorsion (perte de précision dans la mesure), mais aussi de trouver quel espacement entre les deux caméras semble le plus approprié pour des distances de l'ordre de 5 mètres puisque nos cas d'usages sont majoritairement basés sur un environnement d'intérieur.

Dans le but de réaliser cette manipulation, une LED a été disposée à 3,63 mètres d'un plan contenant deux capteurs optiques. Les caméras utilisées ont été choisies avec angle d'ouverture faible de sorte à minimiser l'effet de parallaxe verticale [89] et ainsi de limiter la distorsion qui peut amener des imprécisions dans les résultats. Les conditions de l'expérience sont représentées en figure 3.40.

FIGURE 3.40 – Mesure de distance à l'objet en fonction de l'espacement des deux caméras

La graphe 3.41 affiche la distance mesurée en fonction de l'espacement entre les caméras sur une courte distance. Cet espacement à été étudié entre 5 et 65 centimètres.

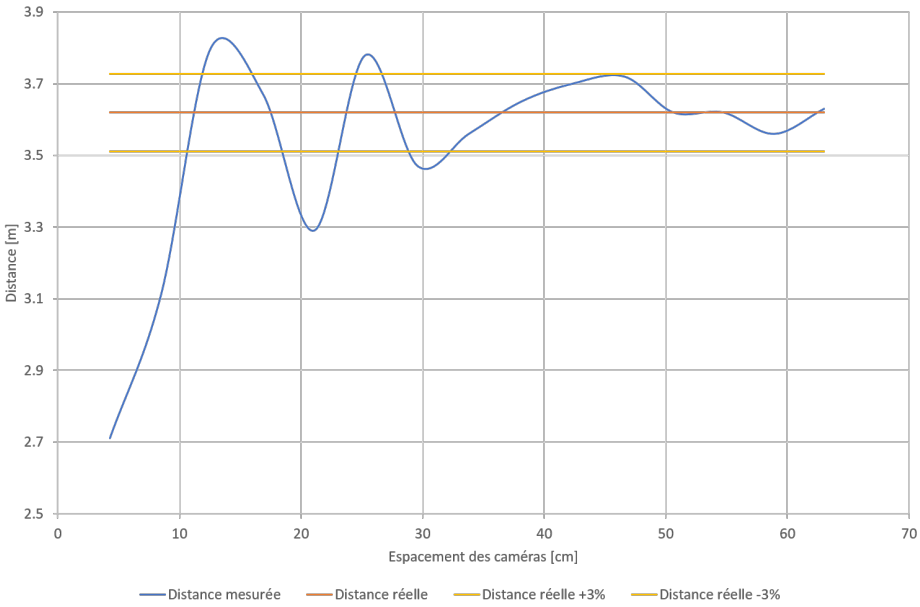
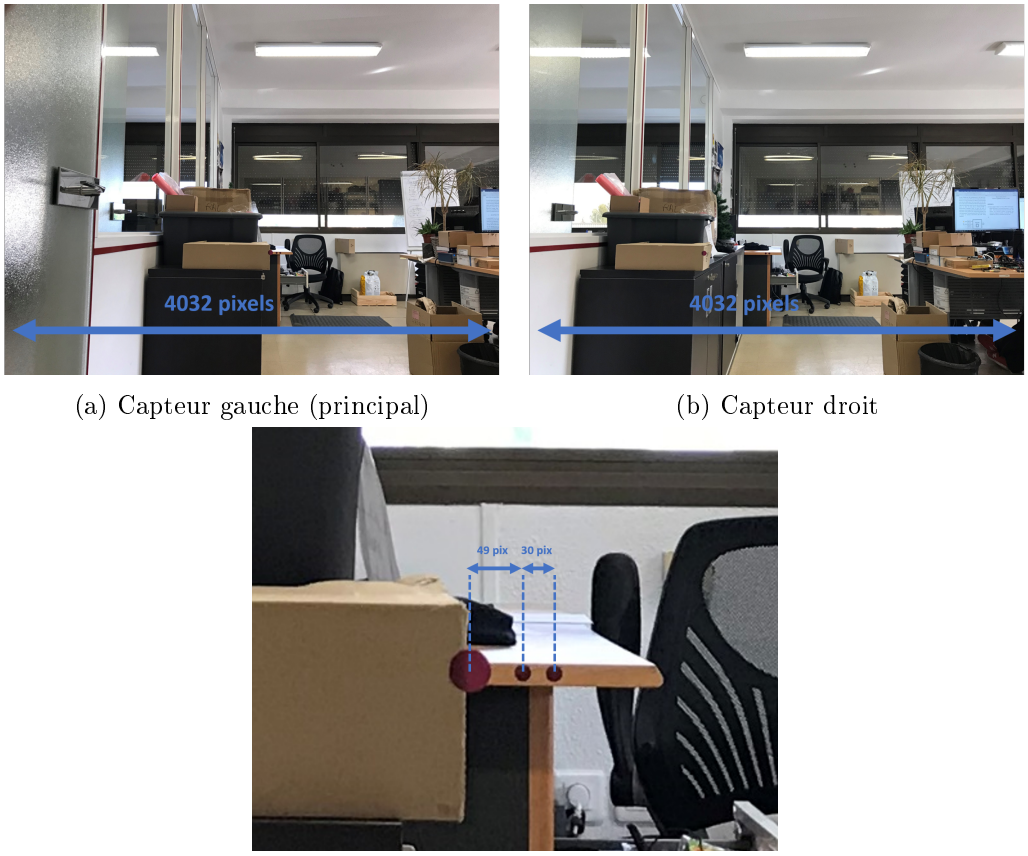


FIGURE 3.41 – Mesure de distance à l'objet en fonction de l'espacement des deux caméras

Ces tendances mesurées à courte distance sont en adéquation avec celles obtenues entre 10 et 60 mètres par Jernej Mrovlje et Damir Vrancic [86]. D'après leurs expérimentations, il semblerait qu'une distance inter-caméras de 40 centimètres soit nécessaire pour estimer l'éloignement d'un objet avec une précision de moins de 3%. Dans notre cas, 32 centimètres suffisent à rentrer dans cette zone.

Nous sommes donc en mesure de non seulement connaitre la distance objet-caméra mais aussi l'espacement entre les sources lumineuses. Lors d'une installation, le fait de rajouter une caméra judicieusement positionnée au niveau du concentrateur permet donc au système de savoir si une source lumineuse appartient à un groupe ou si elle est isolée. La figure 3.42 illustre un cas où les émetteurs ont été remplacés par des pastilles violettes. L'objectif ici est déterminer si ces pastilles sont suffisamment proches pour appartenir à un même motif ou si elles sont indépendantes. Dans cette manipulation, nous considérerons qu'une distance de plus de 5 centimètres entre deux éléments suffit à valider leur indépendance.



(a) Capteur gauche (principal)

(b) Capteur droit

(c) Zoom sur une zone dense du capteur principal

FIGURE 3.42 – Mesure de distance inter-sources

Dans un premier temps, nous mesurons la distance entre les systèmes de capture vidéo et les différentes pastilles. En appliquant la formule (3.13) avec les conditions initiales $B = 0{,}35$, $x_0 = 4032$ et $\varphi_0 = 58{,}99$. En partant de gauche à droite, le calcul

donne respectivement 4,24 et 1,67 mètres pour la pastille 1 et le couple pastille 2-3. Le diagramme à bande disponible en 3.43 permet de vérifier que nous sommes bien sous la marge d'erreur de 3% et ainsi de valider nos conditions initiales.

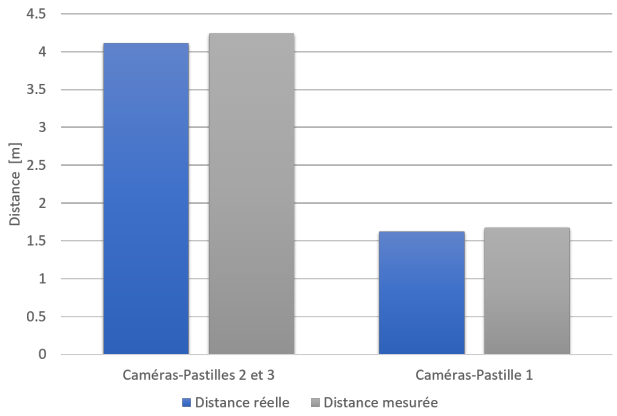


FIGURE 3.43 – Mesure de distances par stéréoscopie

Bien que ces trois pastilles semblent très proches les une des autres, la première ne peut en aucun cas faire partie du groupe puisque la distance la séparant des deux autres est d'au moins 2,57 mètres.

Enfin, à l'aide de ces valeurs il est désormais possible de déterminer l'espacement entre les deux pastilles de droite. Sachant que l'image 3.42a dispose de 4032 pixels de large, l'angle d'ouverture est de 58,99°, le nombre de pixels entre les 2 points et 30 et que $D = 4{,}24$ mètres, la formule (3.8) donne comme résultat 3,6 centimètres. Ces deux dernières forment donc un seul groupe et font transiter un seul et même message à un débit doublé.

Ce calcul est donc nécessaire pour rendre le système adaptatif en temps réel. Cette partie peut cependant être mise de côté si lors de la gestion des zones d'intérêt, l'utilisateur sait déjà où sont les points isolés et où sont les matrices de LED. De plus, en corrélant ce que nous avons vu en page 120 et plus simplement l'aspect visuel lorsque l'on voit deux objets identiques à différentes distances il est envisageable de détecter grossièrement s'ils sont proches ou non.

Néanmoins, cette notion de distance peut ouvrir de nouvelles perspectives dans de nombreuses applications. Par exemple, dans les milieux sous marins ou le docking est une phase critique, la connaissance de la distance AUV - station de docking peut permettre d'économiser énormément d'énergie afin d'éviter que l'engin autonome ne soit trop près et effectue un asservissement de position trop exigeant. Aussi, dans le monde automobile, placer des caméras pour des mesures de distance serait un véritable atout dans la détection de chocs. La plus-value d'un tel système par rapport à ceux déjà existants serait cette double fonction native : Récepteur de transmission sans fil et outil d'alerte passif.

3.4 Produit et champ d'application

3.4.1 Le système global

Le système actuel rempli donc l'objectif principal qui était de réaliser un réseau de type étoile à l'aide d'un support de communication basé sur la lumière visible. Il est donc possible de répondre à une multitude de cas d'usages en l'utilisant en lieu et place des systèmes traditionnels tel que le WiFi. Néanmoins, de nos jours, quelques inconvénients majeurs viennent limiter l'expansion d'un tel système. Il s'agit du débit et du temps de traitement de l'information acquise.

En effet, suite aux expériences réalisées avec une modulation DPPM, le débit final est environ 10 fois inférieur au FPS maximum théorique de la caméra. Dans nos applications principales nous pouvons travailler efficacement à 24 bps pour une valeur fixe de 240 fps au niveau du récepteur vidéo.

Algorithme léger pour le traitement de l'information

Plus le nombre d'images par seconde de la caméra est grand, plus le temps de traitement doit être faible pour rester dans des conditions de temps réel. Par exemple, à 240 fps, une nouvelle image est acquise environ toutes les 4ms.

Notre algorithme actuel ne dépasse pas 2ms de traitement, même en fin de mot, ce qui signifie qu'en prenant une caméra plus performante nous aurions un peu de marge pour récupérer les données en direct. Une fois cette barrière passée, il faudra soit analyser les données en post-traitement, soit optimiser l'algorithme.

Pistes d'évolution et automatisation

A l'heure actuelle la procédure de mise en place du réseau est la suivante :

1. Installation du concentrateur de telle sorte qu'il puisse couvrir la plus grande zone possible.
2. Paramétrage des capteurs. Réglage de la fréquence d'acquisition et du débit d'émission.
3. Installation des capteurs. Ils doivent être positionnés vers le concentrateur afin de capter le flux lumineux ou bien disposer d'une rallonge permettant de déporter légèrement le récepteur et la source émettrice.
4. Mise à jour de la configuration du logiciel d'acquisition du concentrateur. L'utilisateur fait ainsi une capture d'écran et sélectionne à la main les zones d'intérêt, comme illustré page auparavant sur la figure 3.36.
5. La gestion des distances permet de dissocier les sources ponctuelles et groupées.
6. Validation des nouveaux paramètres. L'utilisateur lance à nouveau le logiciel d'acquisition, tandis que celui-ci récupère en temps réel les différentes

informations des sources dont le débit peut être non seulement différent mais aussi variable.

7. Enfin, suivant l'application, un traitement sur les données est mis en place. Il peut s'agir notamment d'un système de contrôle commande ou de supervision classique avec enregistrement en base de données, affichage temps réel, courbes d'historique et calculs. Une intelligence embarquée permettant de traiter les données localement est de plus en plus utilisée. Le but est de transférer les données retravaillées, et plus légères, vers un cloud.

Cette procédure est robuste et donne des résultats très satisfaisants. En revanche, le fait de devoir faire appel à un utilisateur pour la configuration peut induire des taux d'erreurs supérieurs à la normale. De plus, si les capteurs bougent légèrement ou s'il sont tout simplement mobiles l'acquisition sera totalement faussée.

Ainsi, il sera important lors de la prochaine étape d'amélioration du système, de se pencher sur un procédé de reconnaissance visuelle pour la détection des sources puis, par la suite, de rajouter une fonctionnalité au logiciel de sorte qu'il puisse tracker en temps réel les mouvements des mobiles. Attention cependant au temps d'exécution qui pourrait être directement impacté.

Dans un second temps nous nous pencherons sur la problématique du débit. Celui-ci étant très faible, nous avons retenu trois solutions pour l'augmenter.

La première consiste à disposer d'une caméra plus performante. Nous travaillons jusqu'à présent à 240 fps mais il existe des caméras tel que la Phantom v2512 qui peuvent monter jusqu'à plusieurs centaines de kfps.

Nous allons ensuite effectuer des expérimentations avec plusieurs caméras désynchronisées. Le but est d'arriver à multiplier le débit par le nombre exact de caméra. Il faut ainsi décaler les acquisitions de sorte à disposer d'un temps entre deux images consécutives absolument constant.

La fréquence maximale de nos cartes d'acquisitions ne nous a pas permis de réaliser des tests de désynchronisation. En effet, une horloge de 80 MHz n'est pas suffisante lorsqu'il faut acquérir des images de définition et résolution importante.

Enfin, la dernière piste étudiée se base sur la notion d'acquisition d'une caméra. Au plus l'image à produire dispose d'un nombre de pixels important, au plus le temps nécessaire à son acquisition sera grand. Cependant, réduire la taille de l'image pourrait engendrer une mauvaise résolution et ainsi provoquer des erreurs sur les détections de seuils. Une solution pourrait être d'utiliser deux caméras : une lente à haute résolution et une rapide renvoyant des clichés de faibles dimensions. Ainsi, la caméra haute résolution servirait uniquement à cibler les zones d'intérêt et a renvoyer les coordonnées de celles-ci. Un système de moteurs ajusterait alors directement la caméra rapide vers le point d'intérêt. Dès lors, nous serions en mesure d'associer réception par caméra et débit de l'ordre du kbps. Le fait de déporter l'éventuelle détection de mire sur une caméra à faible débit permettrait aussi de proposer des algorithmes plus lourds sans perdre la notion de temps réel.

En résumé, il n'est pas sûr que l'investissement d'une caméra haute fréquence soit démesuré comparé au prix que couterait le développement pour désynchroniser les acquisitions. Bien que cette solution semble offrir un débit vraiment faible à l'heure actuelle, les évolutions récentes des capteurs d'images prouvent qu'il est fort à parier que nous puissions, dans les prochaines années, utiliser ce principe dans des applications bien plus gourmandes en vitesse de transmission.

3.4.2 Preuve de concept : dongle LED USB

Nous nous penchons actuellement sur un moyen d'industrialiser notre solution. La partie concentrateur est maitrisée, tant d'un point de vue électronique que logiciel. Cependant, au niveau des capteurs émetteurs, nous avons choisi de réaliser une matrice de LED. Toutefois, il est tout aussi important de réaliser un produit universel et intuitif que d'assurer une connectivité avec nos produits déjà présents sur le marché.

Ainsi, comme l'illustre la figure 3.44, nous avons opté pour une matrice de 64 LED (8x8).

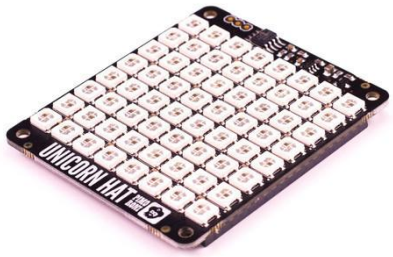


FIGURE 3.44 – Pimoroni unicorn HAT - Matrice LED RGB 8x8

Le choix de ce modèle est dû principalement au fait qu'il est possible de choisir de façon indépendante la couleur de chaque LED ainsi que son intensité. En d'autres termes, cette matrice laisse une liberté importante dans l'optimisation de la communication. En effet, un module peut être dans une zone plus lumineuse qu'un autre, ou à distance plus éloignée. Par exemple, si un capteur est dans une zone d'ombre, il est tout à fait possible de jouer sur la couleur ou même l'intensité dans le but de diminuer la demande en énergie.

La gestion de l'éclairage est gérée par le driver USB réalisé par nos soins, disponible en figure 3.45.

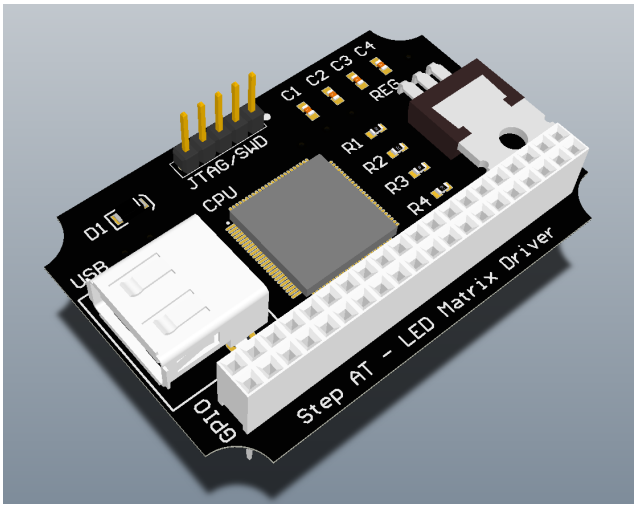


FIGURE 3.45 – Vue 3D du driver USB Step AT

Ce module permet également d'augmenter la taille d'un point lumineux en lui associant plusieurs LED et ainsi augmenter la portée d'émission.

Aucun test réel n'a pu être effectué pour le moment puisque le prototype est en cours de réalisation. Il sera donc intéressant de l'intégrer dans la prochaine phase d'étude afin d'augmenter lé débit et/ou la fiabilité de la communication.

Conclusion

L'essor de l'Internet des Objets et le nombre grandissant de réseaux de communications sans-fil offrent des opportunités de cas d'usages et d'applications encore jamais vues jusqu'à présent. Le monde du tout connecté apporte donc un souffle nouveau, amenant avec lui de multiples interrogations et quelques inquiétudes. Dans ces travaux il s'agissait dans un premier temps d'étudier ces nouvelles technologies afin de proposer une expertise globale et juste aux clients potentiels pour ensuite évoluer vers des solutions innovantes et uniques sur le marché.

Après avoir introduit le contexte de l'étude puis fait un état des lieux sur les solutions apportées par les réseaux bas débit aux problématiques de l'IoT, nous sommes rentrés plus en détail dans certaines technologies qui semblent être en voie de s'imposer parmi tous ces standards. Le chapitre 1 de ce manuscrit établit donc, dans un premier temps, un état de l'art sur les réseaux existants et en voie de développement. Cependant, le contexte actuel et les demandes récurrentes de certains clients nous ont poussé à orienter une partie de la recherche vers des réseaux particuliers tels que le Sigfox et le LoRaWAN.

Nous avons donc appréhendé de façon complète ces technologies afin de garantir une qualité maximale pour nos systèmes mais aussi proposer des conseils justes dans un secteur ou abus de langage et promesses de performances sont monnaie courante. Dès lors, nous avons réalisé un réseau privé LoRaWAN complet comportant un concentrateur ainsi que des nœuds communicants. Cette passerelle était une première mondiale puisqu'elle embarquait directement un serveur intégré, le tout dans un format ne dépassant pas la taille d'un smartphone. Après avoir validé notre design d'antenne en laboratoire et effectué des tests de consommation nous avons pu aborder les notions d'autonomie et de portée avec plus de précisions. En effet, les chiffres annoncées sont atteints dans des conditions particulières et sont difficilement reproductibles dans des applications concrètes. Par exemple, réaliser un réseau en milieu urbain peut réduire la portée de plus de 95% pour atteindre en moyenne, et suivant la densité des immeubles, des distances avoisinant les 500m. Il en est de même pour la consommation, qui varie de quelques microampères en veille jusqu'à 70 mA pendant une phase de communication. Ainsi, suivant les composants et les fréquences d'émission il devient impossible de garantir des autonomies de plus de 5 ans avec des piles classiques. Chez le concurrent direct, Sigfox, la problématique de la portée reste secondaire puisque dans la plus grande majorité des applications la couverture du réseau est suffisante pour garantir une connexion fiable. En revanche, d'après nos manipulations, un objet en mouvement engendre jusqu'à 80% de pertes d'informations.

Durant ces phases de tests nous avons participé à différentes conférences et salons sur l'Internet des Objets et nous avons pu toucher du doigt une des limites de ces nouveaux réseaux : l'encombrement de la bande de fréquence. Il ne s'agissait ,

pour le moment, que d'une mauvaise interprétation du *duty cycle* par certains industriels, ce qui avait pour effet de saturer le 868 MHz. A l'avenir, nul doute que la spécification sera suivie à la lettre, toutefois le nombre grandissant de nœuds communicants provoquera également cet encombrement. Par ailleurs, cette surcharge de la bande passante implique une problématique majeure. En effet, bien que rien n'ait été scientifiquement prouvé pour le moment, un doute persiste concernant l'effet des ondes électromagnétiques sur le corps humain. Il était donc important de se positionner sur une technologie alternative.

Nous avons alors donc abordé la technologie VLC dans la suite du manuscrit. Possible grâce aux performances des LED, ce moyen de communication est idéal pour palier aux défauts des transmissions radio. Cette étude a finalement été réalisée en deux étapes afin de répondre à des problématiques bien différentes.

Dans le chapitre 2, l'objectif était de réaliser un système communicant point à point. Nous pourrions alors répondre à certains cas d'usages et remplacer certains systèmes basés sur des technologies sans fil classiques. Dès lors, nous avons fait une étude sur les différentes modulations afin d'en choisir une qui garantirait la meilleure expérience VLC possible pour les utilisateurs. Notre choix s'est d'ailleurs orienté vers la DPPM qui permet aux récepteurs de récupérer l'information sans connaitre le débit de transmission. Après une phase d'optimisation de notre étage électronique de réception, nous avons pu atteindre, avec la DPPM, des débits de l'ordre de 720 kbps permettant par exemple de transférer de la musique en temps réel. Ce débit atteint est satisfaisant vis à vis des besoins de l'entreprise. Cependant l'angle entre l'émission et la réception reste un facteur limitant. Il sera nécessaire d'optimiser ce paramètre à l'avenir en travaillant non seulement sur les composants mais aussi sur l'étage de réception.

Bien que ces résultats soient prometteurs, les applications possibles restaient limitées. En effet, avec un tel système, nous perdions toute information si deux sources lumineuses envoyaient des données simultanément.

Nous avons alors réalisé, dans le chapitre 3 un réseau VLC. En réalité, nous avons remplacé la photodiode de réception par une caméra. Ainsi, en isolant des zones d'intérêts spécifiques, il est possible d'échanger des données entre un concentrateur et de nombreuses sources en parallèle en dépit du débit. En gardant une modulation identique au chapitre précédent et en optimisant certains critères tel que l'algorithme donnant la valeur de l'information nous avons pu atteindre des débits allant jusqu'à un dixième de la fréquence d'acquisition de la caméra. Ce débit est donc extrêmement faible par rapport à une communication VLC classique, en revanche le nombre de sources parallèles dépend uniquement des caractéristiques de la caméra comme par exemple sa définition. A l'instar du type de modulation, nous avons offert plus de libertés à notre système ou y ajoutant une seconde caméra. Cette technique nous a ainsi permis de pouvoir mesurer la distance entre le concentrateur et les différentes sources lumineuses puis entre les sources elles-mêmes. Il est alors tout a fait possible de différencier automatiquement si un point lumineux est

isolé ou fait parti d'une matrice.

Nous avons d'ailleurs eu l'occasion de valoriser ce système dans sa globalité par différents biais. Nous avons réalisé dans un premier temps une enveloppe Soleau qui décrit parfaitement le système tel qu'il est présenté dans les chapitres 2 et 3. Dans un souci de confidentialité nous avons préféré limiter le nombre de publications d'articles de conférence. Nous avons néanmoins présenté un article de conférence "Star network for IoT based on Visbile Light Communication" au Global Lifi Congress de Paris en 2018.

En conclusion, réaliser un concentrateur VLC basé sur une caméra offre de nouvelles perspectives pour l'internet des objets. Cela permet ainsi de créer une topologie de réseau en étoile particulièrement adaptée à ces nouveaux usages. Cette technologie est donc un concurrent réel pour les réseaux radios classiques. Il faut toutefois rester prudent sur le débit qui reste, à l'heure d'aujourd'hui, très limité.

Les perspectives de ces travaux laissent entrevoir quelques améliorations et optimisations. Comme dit précédemment, améliorer la communication VLC basique reste un point important pour effectuer des communications descendantes performantes. Nous pourrons ensuite axer la réflexion sur deux pistes différentes. La première, qui permettrait d'autoriser les objets mobiles est le tracking de sources lumineuses. La seconde serait d'optimiser le débit en se basant sur un système à double caméra.

Annexe A

Annexes

A.1 Joindre un réseau LoRaWAN

Naturellement, dans l'optique de créer un réseau sécurisé, nous utilisons principalement l'OTA pour nos devices. Pour se faire, cette manipulation nécessite quelques champs supplémentaire :

— *AppKey* : Clef permettant de dériver les Sessions Keys. Elle permet aussi de crypter le message JOIN_ACCEPT et n'est jamais échangée. Elle est cependant connue du serveur et du device.
— *AppEUI* : ID de l'application auquel le device veut souscrire.

A.2 Réalisation d'un serveur LoRaWAN

Scénario d'une activation ABP

Si le device décide d'utiliser une activation ABP pour joindre le réseau LoRaWAN, il faut que le serveur et lui même connaissent l'AppSKey, le NwkSKey et le DevAddr. Ces données sont entrées en brut dans le device et ne permettent pas de retrouver une sécurité en cas d'attaque.

Scénario d'une activation OTA

Si le device décide d'utiliser une activation OTA pour joindre le réseau LoRaWAN, il doit envoyer un message de type JOIN_REQUEST au serveur. Ce message est le seul qui n'est pas crypté dans toute la spécification et il permet d'informer au serveur qu'un device veut se connecter à une certaine application. Le message est composé de différents champs :

— *DevEUI*
— *AppEUI*
— *DevNonce* : nombre aléatoire généré par le device permettra de dériver les Sessions Keys (AppSKey et NwkSKey)

Une fois que le serveur a reçu ce message, il doit faire un choix. Soit il refuse la connexion car ce device n'est pas répertorié dans sa liste, soit il lui renvoie un

message de type JOIN_ACCEPT exactement 5 secondes plus tard (la fenêtre de réception est large de quelques centaines de millisecondes). Ce message comporte les champs suivants :

— *AppNonce* : Nombre aléatoire généré par le serveur
— *NetID* : Identifiant du réseau
— *DevAddr* : Adresse attribué par le serveur
— *DLSettings* Représentant des réglages de débits, 0 par défaut
— *RxDelay* : Permet de modifier les délais des fenêtres de réception

Il est à noter que le message est crypté en appliquant une fonction de décryptage, ce qui permet de n'implémenter que des fonctions d'encryptage dans le device.

En parallèle, le device et le serveur réalisent les fonctions suivantes en concaténant chacun leur part aléatoire (AppNonce et DevNonce).

```
1 //padding16 ajuste la chaine avec des zeros pour
2 //qu'elle fasse un multiple de 16 en longueur
3 nwkStr = 0x01 | AppNonce | NetID | DevNonce | padding16;
4 appStr = 0x02 | AppNonce | NetID | DevNonce | padding16;
5 NwkSKey = aes128_encrypt(AppKey,nwkStr);
6 AppSKey = aes128_encrypt(AppKey,appStr);
```

Le device est maintenant activé sur le réseau et il peut commencer à envoyer des paquets avec les clés de cryptage calculées.

A.3 Code générant la modulation DPPM

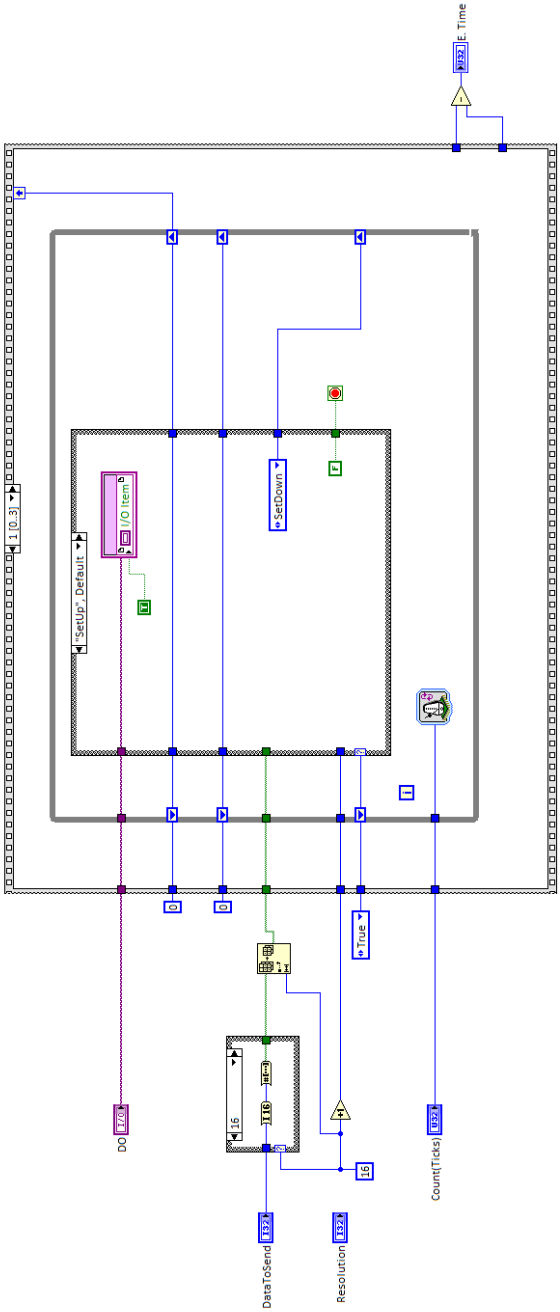


FIGURE A.1 – Gestion de la modulation PPM

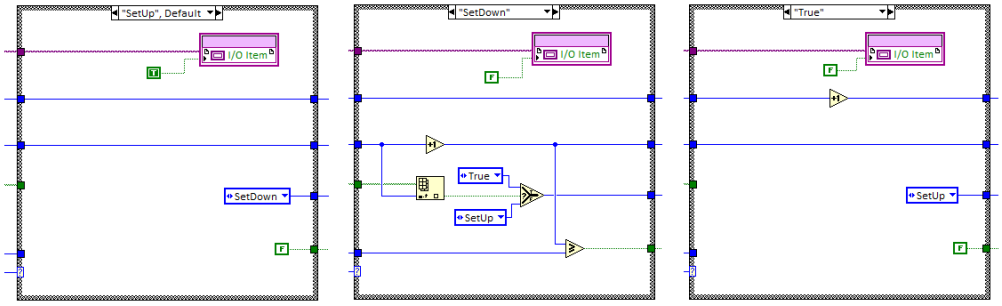


FIGURE A.2 – Différentes conditions

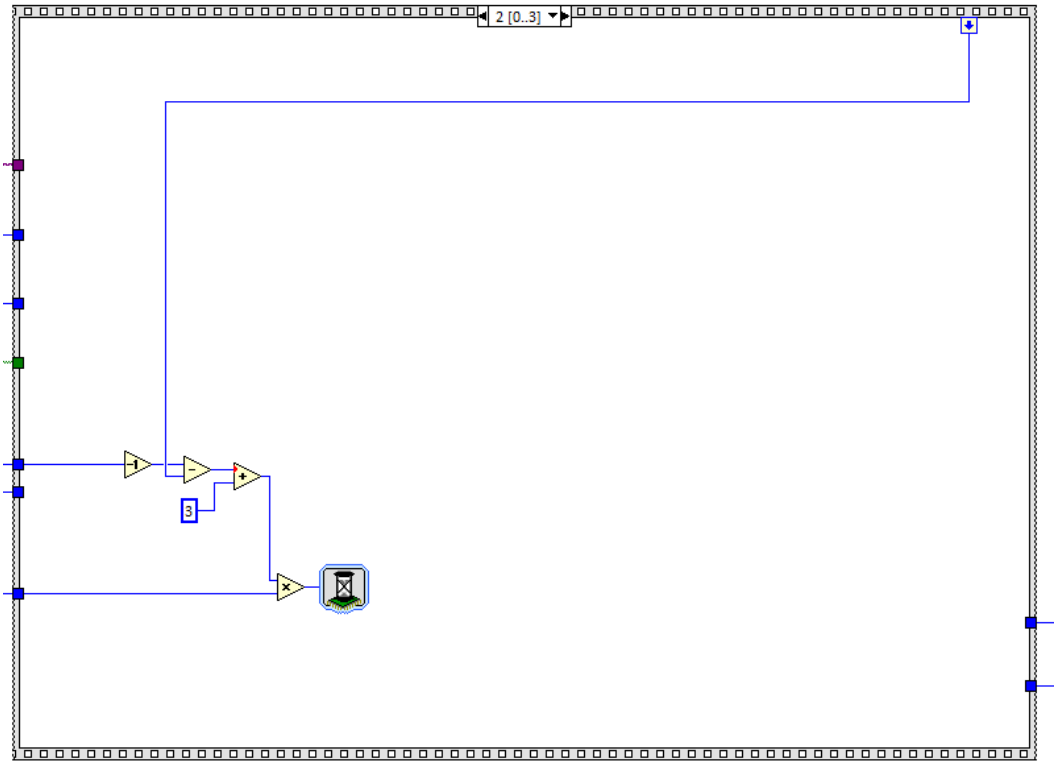


FIGURE A.3 – Timing de fin de trame

A.4 Algorithme démodulant le DPPM

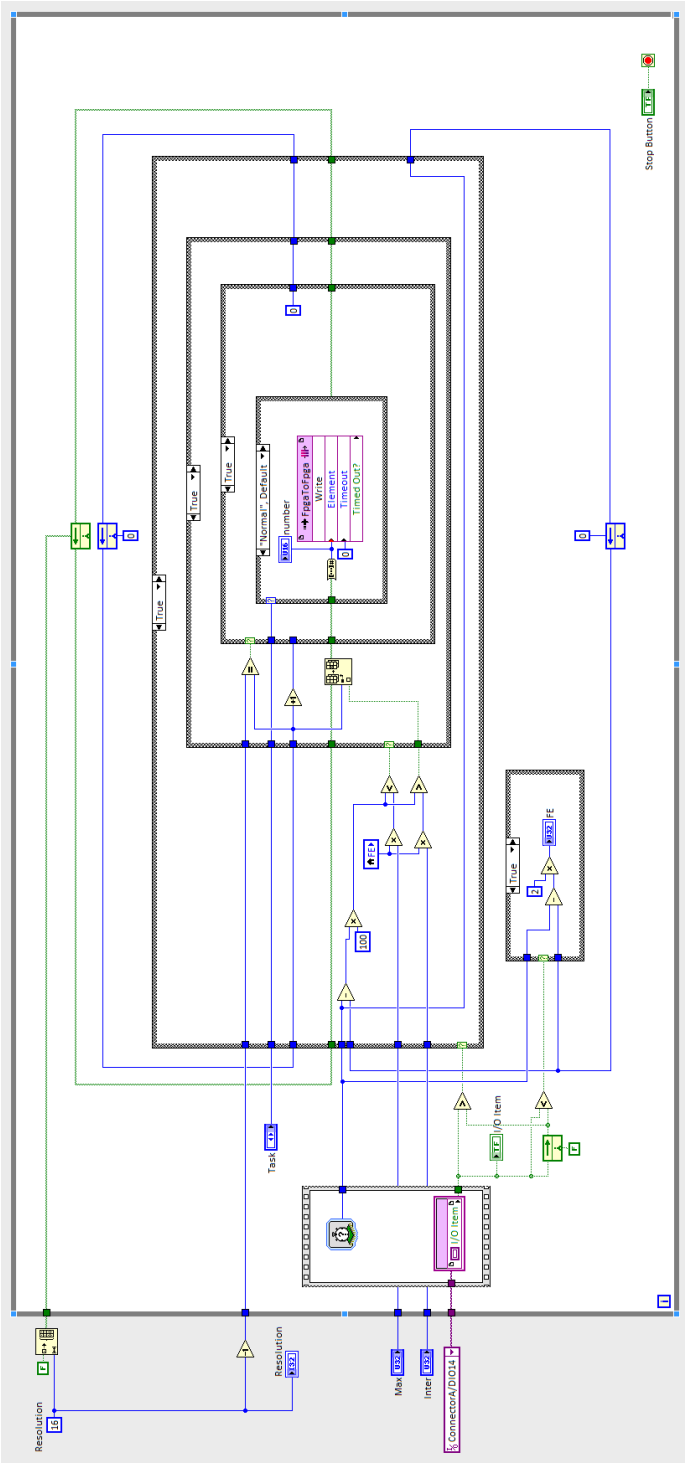


FIGURE A.4 – Code pour décodage de l'information

A.5 Architecture de détection multi-sources en Actor Framework

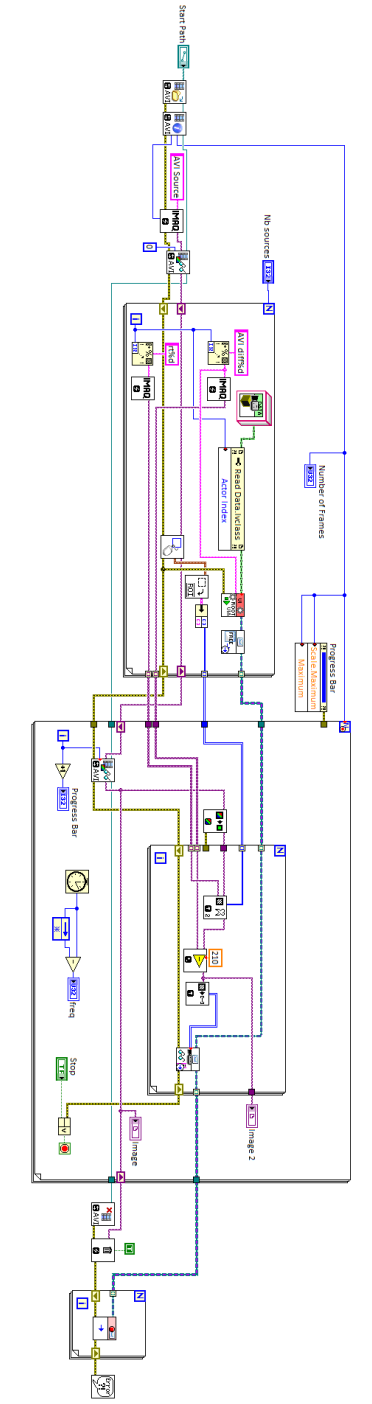


FIGURE A.5 – Code principal orienté post-traitement

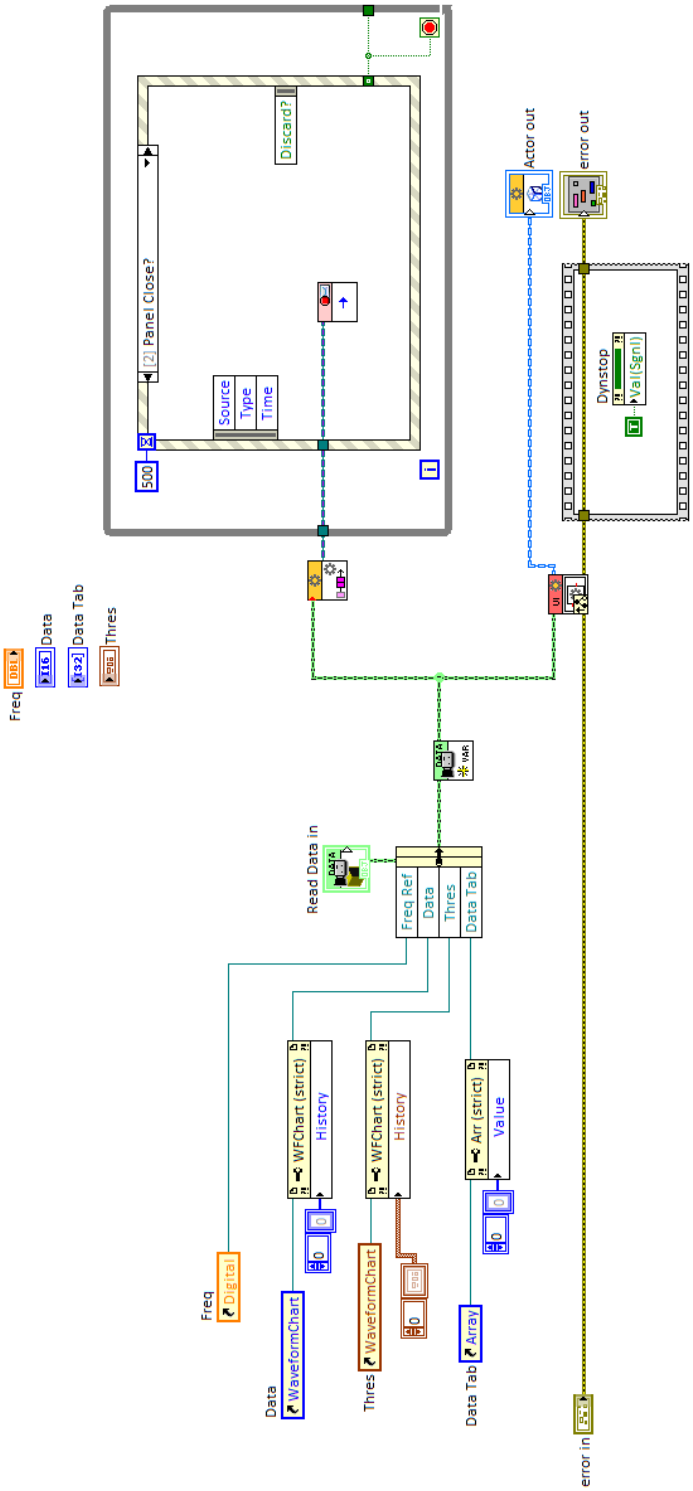


FIGURE A.6 – Gestionnaire de données

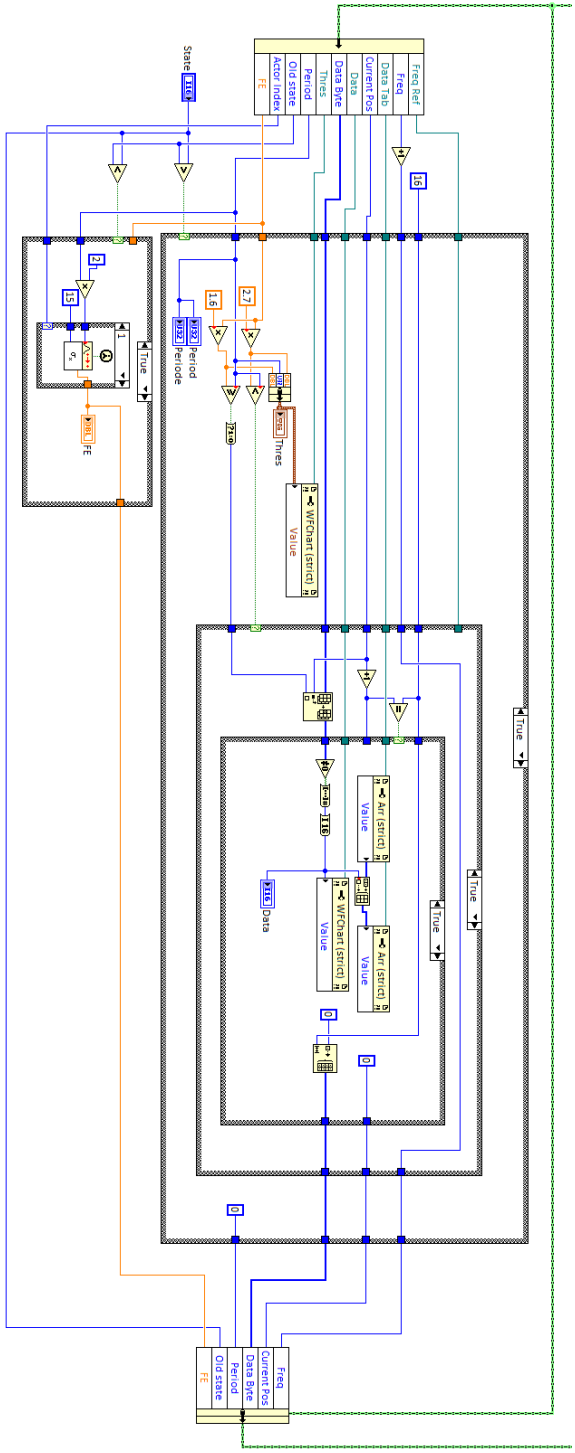


FIGURE A.7 – Algorithme implémenté pour l'Actor Framework

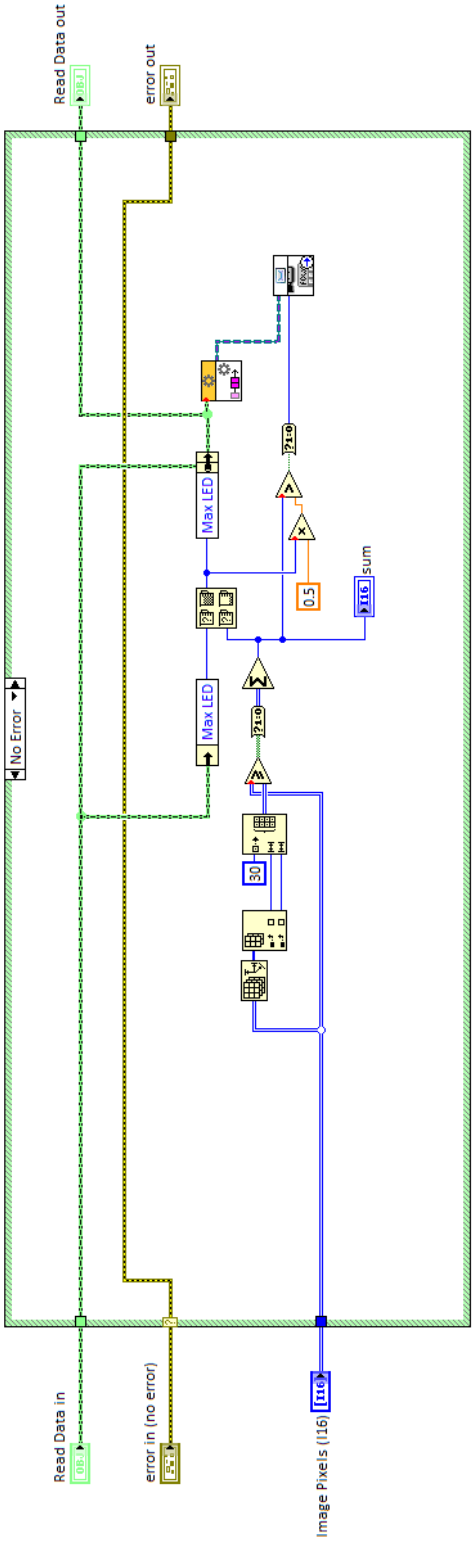


FIGURE A.8 – Gestion du seuil implémentée pour l'Actor Framework

A.6 Algorithme de traitement de la zone d'intérêt

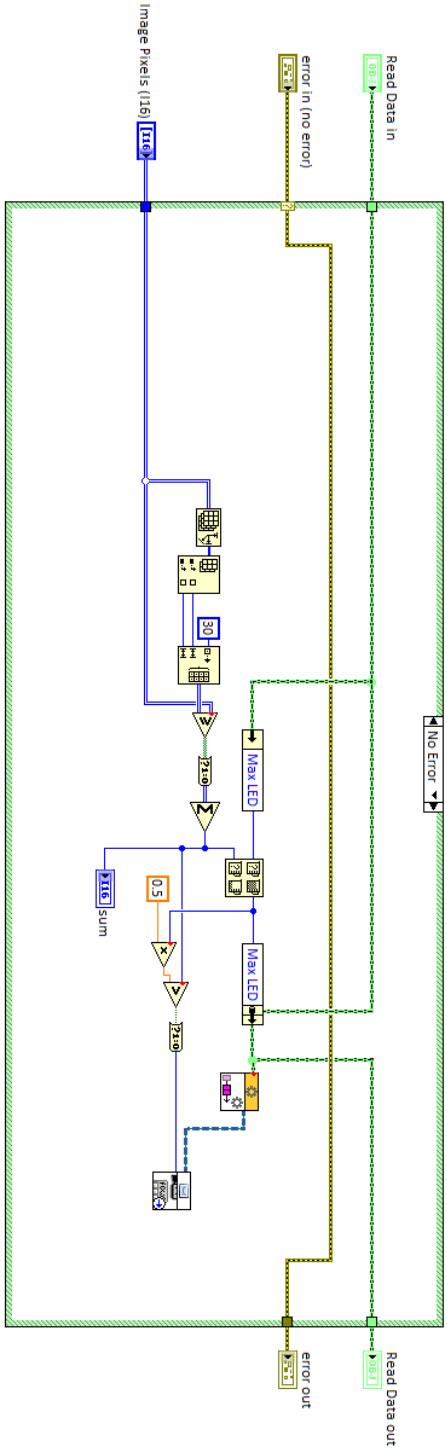


FIGURE A.9 – Code de gestion du seuil

Bibliographie

[1] Iot : Vers une révolution urbaine ?, 2015. https://www.objetconnecte.com/iot-nouvelle-revolution-urbaine/. 11, 23

[2] Lpwan : le réseau émergent de l'iot, Février 2016. http://www.digitaldimension.solutions/blog/avis-d-experts/2016/02/lpwan-le-reseau-emergent-de-liot/. 11, 30

[3] Les lpwan - ces nouveaux réseaux de l'internet des objets, Décembre 2015. https://www.frugalprototype.com/les-lpwan-ces-nouveaux-reseaux-de-linternet-des-objets/. 11, 32, 34

[4] De la technologie lora au réseau lorawan, Août 2016. https://www.frugalprototype.com/technologie-lora-reseau-lorawan/. 11, 39

[5] All about lora and lorawan, 2017. http://www.sghoslya.com/p/lora_9.html/. 11, 40

[6] Développez avec lora pour les applications iot bas débit, longue portée, Juin 2017. https://www.digikey.fr/fr/articles/techzone/2017/jun/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications. 11, 41

[7] Understanding phase modulation for 100g transmission, Décembre 2012. https://testing100g.net/understanding-100g-phase-based-modulation/. 11, 50

[8] Learn about sigfox and lora radio technologies, Janvier 2017. https://www.disk91.com/2017/technology/internet-of-things-technology/learn-about-sigfox-and-lora-radio-technologies/. 11, 51

[9] Quand internet passera par la lumière, Octobre 2015. http://theconversation.com/quand-internet-passera-par-la-lumiere-48700. 11, 60

[10] Histoire de la communication, 2002. http://www.ufr-mig.ups-tlse.fr/NTIC/tice/e-l2reseaux/Introduction/histo.htm. 11, 62

[11] Photophones revisited, 2005. http://www.bluehaze.com.au/modlight/GrothArticle1.htm. 11, 62

[12] La loi de haitz : le led s'améliore de jour en jour, Février 2014. https://www.ledsky.be/blog/fr/la-loi-de-haitz-le-led-sameliore-de-jour-en-jour/. 11, 64

[13] 3 ways to determine the roi for led and cfl now that standard incandescent is gone, Octobre 2014. https://solutions.borderstates.com/3-ways-to-determine-the-roi-for-led-and-cfl-now-that-standard-incandescent-is-gone/. 11, 65

[14] Tamara A. Papalias and Mike Wong. Makking sens of light sensors. 2006. 11, 66

[15] Les leds pour des communications de voiture à voiture afin de coopérer et éviter les accidents, 2014. https://www.infohightech.com/les-leds-pour-des-communications-de-voiture-a-voiture-afin-de_cooperer-et-eviter-les-accidents/m. 11, 67

[16] Che Xianhui. Re-evaluation of rf electromagnetic communication in underwater sensor networksg. 2010. 12, 68

[17] Le lifi : explication, avantages et contraintes, 2017. https://www.kyos.ch/le-lifi/. 12, 70

[18] What's the difference between nrz, nrzi, and manchester encoding ?, 2017. http://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-nrz-nrzi-and-manchester-encoding. 12, 74

[19] Mohammed Hawa. *Introduction to Digital Baseband Communication Systems I*. 2009. 12, 75

[20] Mohamed Sufyan Islim and Harald Haas. Modulation techniques for li-fi. 2016. 12, 76, 77

[21] Capteur numérique : principe de fonctionnement, 2011. https://www.focus-numerique.com/comprendre/dossiers/capteur-numerique-principe-de-fonctionnement-109.html. 12, 93, 94

[22] Quelle résolution choisir pour obtenir une bonne qualité dimpression ?, Janvier 2014. http://www.amylee.fr/2014/01/quelle-resolution-choisir-pour-obtenir-une-bonne-qualite-dimpression/. 12, 95

[23] Stop motion animation techniques, Avril 2014. https://oluchinwabuwa.wordpress.com/author/oluchinwabuwa. 12, 96

[24] Johanna Fite et Olivia Roth-Delgado Olivier Merckel. Radiofréquences et santé : améliorer l'évaluation des risques, vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [en ligne], hors-série 27 | décembre 2016, mis en ligne le 12 décembre 2016, consulté le 24 octobre 2017. url : http ://vertigo.revues.org/17898 ; doi : 10.4000/vertigo.17898. 17

[25] Zamanian A. and Hardiman C. Electromagnetic radiation and human health : A review of sources and effects, high frequency electronics, in "summit technical media," pp. 16- 26. 2005. 17

[26] La loi abeille, Février 2015. https://www.anfr.fr/controle-des-frequences/exposition-du-public-aux-ondes/le-role-des-maires/la-loi-abeille/. 17

[27] Santé : faut-il se méfier des ampoules basse consommation et des led ?, Avril 2011. http://www.bioaddict.fr/article/sante-faut-il-se-mefier-des-ampoules-basse-consommation-et-des-led-a1588p1.html. 18

[28] T. A. Khan, M. Tahir, and A. Usman. Visible light communication using wavelength division multiplexing for smart spaces. In *2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 230–234, Jan 2012. 18

[29] Roxin i., bouchereau a., "Écosystème de l'internet des objets", dans bouhaï n. et saleh i., (dir.) "internet des objets : Évolutions et innovations", iste Éditions londres, mai 2017. 22

[30] Today, the internet, tomorrow the internet of things, Novembre 2011. http://www.computerworld.com/s/article/9221614/Today_the_Internet_tomorrow_the_Internet_ofThings. 22

[31] Thebault P. La conception à l'ère de l'internet des objets : modèles et principes pour le design de produits aux fonctions augmentées par des applications, Mai 2013. 22

[32] Cisco, value of the internet of everything for cities, states ans countries, 2013. 23

[33] Institut Montaigne. Big data et objets connectés faire de la france un champion de la révolution numérique, Avril 2015. 23

[34] Huichen Lin and Neil W. Bergmann. Iot privacy and security challenges for smart home environments. *Information*, 7(3), 2016. 24

[35] Cristanel Razafimandimby, Valeria Loscrí, Anna Maria Vegni, and Alessandro Neri. Une communication bayésienne et intelligente pour l'Internet des Objets. In *Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication*, Quiberon, France, May 2017. 24

[36] Juha Petäjäjärvi, Konstantin Mikhaylov, Antti Roivainen, Tuomo Hänninen, and Marko Pettissalo. On the coverage of lpwans : range evaluation and channel attenuation model for lora technology. In *ITST*, 2015. 29

[37] Joseph Kabara and Maria Calle. Mac protocols used by wireless sensor networks and a general method of performance evaluation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(1) :834784, 2012. 29

[38] Raza Usman. Low power wide area networks : An overview. 2017. 29, 31

[39] All what you need to know about regulation on rf 868mhz for lpwan, 2017. https://www.disk91.com/2017/technology/internet-of-things-technology/all-what-you-need-to-know-about-regulation-on-rf-868mhz-for-lpwan/. 29

[40] X. Xiong, K. Zheng, R. Xu, W. Xiang, and P. Chatzimisios. Low power wide area machine-to-machine networks : key techniques and prototype. *IEEE Communications Magazine*, 53(9) :64–71, September 2015. 30

[41] Rpma technology for the internet of things, 2016. http://theinternetofthings.report/Resources/Whitepapers/4cbc5e5e-6ef8-4455-b8cd-f6e3888624cb_RPMA%20Technology.pdf. 35

[42] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, 55(9) :34–40, 2017. 35

[43] Weightless-p standard is designed for high performance, low power, 2-way communication for iot, Août 2015. https://www.cnx-software.com/2015/08/10/weightless-p-standard-is-designed-for-high-performance-low-power-2-way-communications-for-iot/. 36

[44] Xiaowei Wang, Minrui Fei, and Xin Li. Performance of chirp spread spectrum in wireless communication systems. pages 466 – 469, 12 2008. 37

[45] Clausen T Townsley WM Augustin A, Yi J. A study of lora : Long range and low power networks for the internet of things. 2016. 38

[46] Lora alliance standard specification, Janvier 2015. https://www.lora-alliance.org. 41

[47] The things network. https://www.thethingsnetwork.org/wiki/LoRaWAN. 43

[48] Lora : Actility nous parle géolocalisation, passive roaming et ouverture vers les réseaux lte, Mars 2017. https://www.nextinpact.com/news/103597-lora-actility-nous-parle-geolocalisation-passive-roaming-et-ouverture-vers-reseaux-lte.htm. 48

[49] B. Reynders and S. Pollin. Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. In *2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*, pages 1–5, Nov 2016. 48, 58

[50] Sigfox, 2015. www.sigfox.com. 48

[51] Transfert de données par le son, Octobre 2013. 50

[52] Tout savoir sur le réseau de sigfox, Janvier 2017. https://www.objetconnecte.com/tout-savoir-sur-sigfox/. 51

[53] Lora et sigfox : les premières cartes de couverture, Février 2016. https://www.lesnumeriques.com/objet-connecte/lora-sigfox-premieres-cartes-couverture-n49509.html. 51

[54] Les usages des radiofréquences, Juin 2010. http://www.radiofrequences.gouv.fr/spip.php?article39. 52

[55] Low throughput networks (ltn) ; protocols and interfaces, 2009. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/LTN/001_099/003/01.01.01_60/gs_ltn003v010101p.pdf. 52

[56] Nb-iot : a sustainable technology for connecting billions of devices, Avril 2016. https://www.ericsson.com/en/publications/ericsson-technology-review/archive/2016/nb-iot-a-sustainable-technology-for-connecting-billions-of-devices. 56

[57] Wireless internet of things connectivity : Lpwan iot forecasts 2017, 2016. https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/iot-spending-2020/wireless-iot-lpwan-forecasts-predictions-2017/. 57

[58] Grandjean Pascal. Prévisions de l'indice de réfraction dans les couches basses de la troposphère. 2015. 61

[59] histoire de la communication, 2002. http://www.ufr-mig.ups-tlse.fr/NTIC/tice/e-l2reseaux/Introduction/histo.htm. 61

[60] Signaux sonores, pigeons voyageurs et tours à feu, 2017. http://www.appat.org/70ans. 61

[61] Bernault Jean-Serge. *Alexander Graham Bell*. 2013. 62

[62] Haitz's law, 2007. Nature Photonices, vol 1. 64

[63] LIU Zongyuan. Status and prospects for phosphor-based white led packaging. 2009. 64

[64] Romain Garcin et Quentin Grando. Photodiodes et photodiodes avalanche. 2000. 66

[65] La nhtsa rend les caméras de recul obligatoires dès 2018, 2014. http://www.caradisiac.com/La-NHTSA-rend-les-cameras-de-recul-obligatoires-des-2018-93487.htm. 67

[66] Xiao-Wei Ng and Wan-Young Chung. Vlc-based medical healthcare information system. 2012. 69

[67] The lifi story, 2015. http://purelifi.com/what_is_li-fi/the-lifi-story/. 70

[68] Asoke Nathg Anurag Sarkar, Shalabh Agarwal. Li-fi technology : data transmission through visible light. 2015. 70

[69] What is lifi ?, 2015. http://purelifi.com/what_is_li-fi/. 70

[70] Y. Wang C. Chens H. Haas, L. Yin. What is lifi ? 2015. 70

[71] The lifi technologys, 2016. http://www.oledcomm.com/lifi-technology. 70

[72] Crisanto Quintana Masaki Sato Grahame Faulkner Benn C. Thomsen Dominic O'Brien Ariel Gomez, Kai Shi. Beyond 100-gb/s indoor wide field-of-view optical wireless communications. 2015. 70

[73] La guerre des ondes pour les objets connectÉs s'intensifie, 2016. https://atelier.bnpparibas/smart-city/article/guerre-ondes-objets-connectes-intensifiey. 71

[74] Laure Petrucci. Cours de réseaux, partie 1, 2012. 74

[75] Digital transmission of digital data. http://what-when-how.com/data-communications-and-networking/digital-transmission-of-digital-data/. 75

[76] Omid Zia-Chahabi. Techniques de traitement numérique du signal pour les systèmes de transmission optique ultra haut débit à détection cohérente, 2013. 76

[77] J. M. Kahn and J. R. Barry. Wireless infrared communications, 1997. 76

[78] HO Anh Tai. Application des techniques multiporteuses de type ofdm pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite, 2009. 76

[79] Ieee standard for local and metropolitan area networks, part 15.7 : Short range wireless optical communication using visible light, ieee std. 802.15.7 2011, 2011. doi : 10.1109/ieeestd.2011.6016195. 76

[80] Sarah K. Wilson Daniel J. F. Barros and Joseph M. Kahn. Comparison of orthogonal frequency-division multiplexing and pulse-amplitude modulation in indoor optical wireless links, 2012. 77

[81] Pulse position modulation and differential ppm, 2011. http://www.pcbheaven.com/wikipages/Pulse_Position_Modulation. 78

[82] A. khan, muhammad tahir, ahmad usman. visible light communication using wavelength division multiplexing for smart spaces. . 10.1109/ccnc.2012.6181092. 2012. 92

[83] Les sauveteurs du léman voient la vie en jaune, 2007. https://www.sisl.ch/technique/yellow_color.htm. 94

[84] Pour capter l'image...les capteurs ccd et cmos, 2015. https://photoinformatique.wordpress.com/tag/matrice/l. 94

[85] Nicolas Verbeke. Suivi d'objets en mouvement dans une séquence vidéo, 2007. 102

[86] Damir Vrancic Jernej Mrovlje. Distance measuring based on stereoscopic pictures, 2008. 123, 126

[87] A. Klein. Questions and answers about stereoscopy, 2007. http://www.stereoscopy.com/faq/index.html. 123

[88] Faris A. Kochery Manaf A. Mahammed, Amera I. Melhum. Object distance measurement by stereo vision, 2013. 123

[89] Rolf Koch Andrew Woods, Tom Docherty. Image distortions in stereoscopic video systems, 1993. 124

Johann Gilbert
IM2NP, Université de Toulon

Étude et développement d'un réseau de capteurs synchronisés à l'aide d'un protocole de communication sans fil dédié à l'Internet des Objets

Depuis les 20 dernières années, l'essor de l'IoT [1] et du "cloud computing" a conditionné le besoin de déployer massivement, et globalement, des capteurs afin d'alimenter des bases de données et améliorer la précision des algorithmes d'analyse. Pour répondre à ces demandes, de nouveaux réseaux basés sur les bandes de fréquences ISM ont été déployés. Nous avons donc appréhendé de façon complète ces technologies afin de garantir une qualité maximale pour nos produits mais aussi proposer des conseils justes dans un secteur ou abus de langage et promesses de performances sont monnaie courante.

Cependant, le nombre grandissant d'objets émettant sous la fréquence du gigahertz lève un doute quant à l'impact sur la santé des êtres vivants. Dès lors, coupler l'aspect non invasif des VLC [2] avec l'Internet des Objets permettrait non seulement de réduire les risques pour les êtres humains mais aussi de limiter la saturation des bandes radio.

Néanmoins, les techniques d'aujourd'hui consistent principalement en la réalisation de systèmes diffusant l'information depuis une source unique vers plusieurs récepteurs, ce qui est l'inverse du paradigme de l'IoT. Dans cette étude, nous avons donc réalisé un nouveau design basé sur les VLC qui met en place une topologie de réseau en étoile [3]. Ce système, basé sur un concentrateur disposant d'une ou plusieurs caméra en guise de photo-récepteurs, est optimisé pour plus d'autonomie. Ainsi, la vitesse de transmission peut être gérée dynamiquement sans être connue par les autres éléments du système.

Mots clés : Internet des objets, IoT, LPWAN, VLC, caméra

Study and development of synchronized sensors network using a wireless communication protocol dedicated to the Internet of Things

In the last 20 years, the coming up of Internet of Things and Cloud Computing has conditioned the need to deploy sensors everywhere to feed databases and analytics. To meet this requirements, new kind of networks have been massively deployed based on the sub-gigahertz frequency which have unknown effect on human health.

Couple the non-invasive aspect of the Visible Light Communication (VLC) with IoT could not only reduce potential risks for human health but also avoid radio band saturation. However, today's techniques consist mainly in broadcast data from light sources to receivers which is the opposite of the IoT paradigm. In this study, we will present a new design where the gateway is not a classic photodiode but a camera.

With this camera based method, we are able to design a star network using VLC. Even if the data rate is not the same as standard method, we are now able to collect data emanating from many sensors at once with only one photoreceptor. This system also includes the ability of discriminate LED matrix, which transfer the same data faster, and single LED. Finally, data rate can be handle autonomously by the system to provide an optimal data transfer.

Key words : Internet of Things, IoT, LPWAN, VLC, camera, LED based communication

1. Internet Of Things ou *Internet des Objets*
2. Visible Light Communication ou *Communications par la lumière*
3. Les éléments du réseau communiquent tous uniquement avec un élément central