UCLouvain

LOUVAIN
School of Management

Louvain School of Management

Recherche exploratoire sur la technologie du LiFi

Modèles d'affaire et impacts sociétaux

Auteur : Bryan Sohy
Promoteur : Vincent Truyens
Année académique 2019 - 2020

Je finis ces cinq années d'étude avec un travail dont je suis fier et pour lequel je tiens à remercier toutes les personnes qui y ont contribué, de près ou de loin.

Dans un premier temps, j'aimerais remercier mon promoteur Vincent Truyens qui a été patient, compréhensif et flexible, mais aussi et surtout pour son soutien judicieux à toutes les étapes de la réalisation de ce travail.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance pour le temps que m'ont accordé les personnes interviewées dans le cadre de la recherche qualitative. Merci à Ange-Frederik Balma, Karen Bamford, Marc Vanveckhoven, Deepak Solanki, Alban N'Dri, Cédric Gelpi, Micheline Perrufel et Jean-Pierre Raskin. Leurs expertises et expériences ont été précieuses.

Finalement, j'aimerais exprimer mon extrême gratitude envers ma famille et mes amis pour leur patience et leur support inconditionnel. Plus spécifiquement :

Merci à mes parents Roland Sohy et Iswarree Koormadu pour leur soutien exceptionnel et leur aide inestimable durant ces cinq dernières années. Merci à Keena Knaepen pour sa relecture et à Donovan Sohy pour ses encouragements. Merci à Brieuc La Rose, Tom Schenkel et Alexis Costard.

Enfin, merci à Meriyem Sarikaya pour ses conseils judicieux, ses encouragements constants et sa précieuse présence durant ce beau parcours estudiantin.

TABLE DES MATIERES

1 Introduction 1

2 Revue de la littérature 3

2.1 Méthodologie et approche par l'impact 3

2.2 Le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication 4

2.3 Évolution des technologies d'éclairage à travers le temps 5

2.3.1 Que la lumière soit : la vue et le feu 6

2.3.2 L'ampoule 6

2.3.3 La LED 7

2.4 Les Communications Optiques sans Fil et les Communications par Lumière Visible 9

2.4.1 Histoire des Communications Optiques sans Fil 10

2.4.2 Potentiel et branches des OWC 11

2.4.3 Les Communications par Lumière Visible (VLC) 12

2.5 La technologie du Li-Fi 13

2.5.1 Domaine technologique : des OWC au Li-Fi, en passant par les VLC 13

2.5.2 Genèse et définition 14

2.5.3 Fonctionnement du Li-Fi 15

2.5.4 Avantages, limites et inconvénients 18

2.5.5 Applications du Li-Fi 23

2.6 Analyse économique : marché, facteurs de croissance et acteurs 27

2.7 Résumé et comparaison entre le Li-Fi et le Wi-Fi 28

2.8 Impacts sociétaux du Li-Fi et du Wi-Fi 29

2.8.1 Impact environnemental 29

2.8.2 Impact social et sur la santé 32

2.9 Effet rebond 34

2.10 Circular Canvas et Hypothèses 37

3 Analyse qualitative 39

3.1 Méthodologie 39

3.1.1 Méthode de collecte des données 39

3.1.2 Taille et composition de l'échantillon de travail 39

3.1.3 Méthode d'analyse des données 44

3.2 Circular Canvas 45

3.2.1 Mission 45

3.2.2 Activités clés 46

3.2.3 Partenaires 48

3.2.4 Ressources naturelles 50

3.2.5 Ressources techniques 51

3.2.6 Ressources énergétiques 53

3.2.7 Proposition de valeur 54

3.2.8 Utilisateurs et contextes 58

3.2.9 Usage suivant 61

3.2.10 Distribution 62
3.2.11 Revenus et coûts 63
3.2.12 Impacts positifs 64
3.2.13 Impacts négatifs 65
3.2.14 Résumé : Méta Circular Canvas 66

3.3 Analyse 67
3.3.1 Analyse générale 67
3.3.2 PESTEL 73
3.3.3 Réflexion ouverte sur l'utilité 75

4 Conclusion 77

4.1 Résumé de la recherche et recommandations 77

4.2 Limites du travail 79

4.3 Perspectives futures 79

5 Bibliographie 81

6 Annexes 90

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Plan de la revue de la littérature 2

Figure 2: Évolution des technologies d'éclairage ("A short history of the light bulb", 2018) 5

Figure 3: Spectre électromagnétique 12

Figure 4: Classification des télécommunications 13

Figure 5 : Fonctionnement du Li-Fi (Sarkar et al., 2015) 16

Figure 6: Émetteur et récepteur LiFi Lucibel (Jurczak, 2017) 22

Figure 7: Effet Rebond 35

Figure 8: Effet Rebond - Transition vers la technologie LED 36

Figure 9: Marché du LiFi - Taux croissance par région (2019-2024) 40

Figure 10: Origines géographiques des intervenants 43

Figure 11: Chaîne de valeur et Intervenants (Jurevicius, 2013) 43

Figure 12: Dongles LiFi (Oledcomm, 2018 ; Scace, 2017) 53

Figure 13: Méta Circular Canvas 67

Figure 14: Écosystème LiFi (LCA, s.d.) 70

Figure 15: Carte de segmentation 73

Figure 16: Classification des technologies d'éclairage (Schneider Electric, 2020) 90

Figure 17: Système CPL (Darty, 2020) 93

Figure 18: Allocations des fréquences du spectre radio aux États-Unis (U.S. Department of Commerce, 2016) 100

Figure 19: Borne LiFi de chez LiFi-LED (LiFi-LED, 2020) 130

Figure 20: LiFiMax (Oledcomm, 2018b) 131

Figure 21: LiFiMax (Oledcomm, 2018b) 132

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Comparaison Li-Fi et Wi-Fi *29*

Tableau 2: Activités clés *48*

Tableau 3: Partenaires *50*

Tableau 4: Ressources naturelles *51*

Tableau 5: Ressources techniques *53*

Tableau 6: Ressources énergétiques *54*

Tableau 7: Proposition de valeur *58*

Tableau 8: Utilisateurs et contextes *60*

Tableau 9: Usage suivant *62*

Tableau 10: Distribution *63*

Tableau 11: Revenus et Coûts *64*

Tableau 12: Impacts positifs *65*

Tableau 13: Impacts négatifs *66*

Tableau 14: Analyse PESTEL *74*

TABLE DES ANNEXES

Annexe A. Classification des technologies d'éclairage 90

Annexe B. Les différents types de LED 91

Annexe C. Origines et exemples des premiers systèmes OWC 92

Annexe D. Solution CPL 93

Annexe E. Tableau des avantages du Li-Fi 94

Annexe F. Allocation des fréquences du spectre radio aux États-Unis 100

Annexe G. Limites et inconvénients du Li-Fi 101

Annexe H. Applications industrielles 103

Annexe I. Tableau des applications du Li-Fi 105

Annexe J. Évolution du Li-Fi : ligne du temps synthétique 109

Annexe K. 6 idées fausses courantes sur le Li-Fi 111

Annexe L. Tableau complet de comparaison Li-Fi et Wi-Fi 113

Annexe M. Étapes du cycle de vie des LEDs 115

Annexe N. Circular Canvas 116

Annexe O. Hypothèses 117

Annexe P. Guide d'entretien 119

Annexe Q. Liste des personnes interviewées 121

Annexe R. Circular Canvas Individuels 122

Annexe S. Accès vers les enregistrements audio 129

Annexe T. Borne LiFi de chez LiFi-LED 130

Annexe U. Produit « LiFiMax » de chez Oledcomm 131

Annexe V. Vérification des hypothèses de départ 133

1 Introduction

Conférence TED Global, Édimbourg, 2011. Le professeur Harald Haas monte sur scène avec une lampe de bureau, équipée d'une lampe LED, ainsi qu'un ordinateur connecté à un récepteur de lumière, un appareil capable de capter les différences d'intensité dans la lumière.

Le professeur allume la lumière, la dirige vers le récepteur de lumière qui est connecté à l'ordinateur et, immédiatement, une vidéo en haute définition commence à jouer sur l'écran périphérique. Le public comprend : il a transmis cette vidéo grâce à la lumière de l'ampoule LED « Li-Fi ».

Comme nous le verrons de manière détaillée lors de ce travail, le terme « Li-Fi » recouvre un moyen de connectivité similaire au Wi-Fi, bien que se distinguant par son utilisation de la lumière visible, ou proche infrarouge, pour transmettre le signal. Nous découvrirons que la littérature scientifique aborde généralement la technologie sous le nom de « Li-Fi », bien que les interviews qualitatives corrigeront que le terme correct actuel à utiliser est « LiFi ». Ceci justifie la différence de nomenclature entre les deux grandes parties de ce mémoire.

Selon beaucoup de spécialistes des télécommunications, nous nous dirigeons droit vers une situation qu'ils caractérisent de *Crunch Spectral*. Cela signifie que notre consommation d'Internet ne sera bientôt plus satisfaite par les technologies existantes. En outre, ces dernières pourraient aussi poser des problèmes pour la santé.

Par ailleurs, les nouvelles technologies d'éclairage pourraient apporter la possibilité de transmettre de l'information par le faisceau lumineux. Dans cette optique, le *crunch* serait évité et les effets sur la santé seraient atténués, tout en offrant des applications potentiellement infinies.

D'un point de vue personnel, c'est ma rencontre avec l'entrepreneur et écrivain Gunter Pauli qui a été la pierre angulaire dans la sélection d'un thème pour ce mémoire. En effet, monsieur Pauli a souvent mentionné la technologie dans ses conférences jusqu'à en écrire un livre sur le sujet en 2018, qu'il considère comme « le premier ouvrage sur le Li-Fi ».

Mon attrait pour la technologie combiné à mes intérêts pour le monde des affaires et pour les modèles de développement durable et circulaire m'ont dès lors poussé, grâce à mon promoteur Vincent Truyens, à m'attarder sur ce sujet de mémoire.

Comme son titre l'indique, ce mémoire est une étude exploratoire de la technologie du Li-Fi : de ses modèles d'affaire et de ses impacts sociétaux. Étant donné la nature exploratoire du sujet, il convient de tout d'abord créer une revue de la littérature afin d'avoir une vue globale sur la technologie ainsi que sur ses tenants et aboutissants. Après une explication de la méthodologie utilisée pour la revue de la littérature, nous aborderons les thèmes illustrés dans le plan en *Figure 1*. Enfin, cette partie permettra de construire des hypothèses qui seront testées lors de la partie qualitative (Yom, 2015).

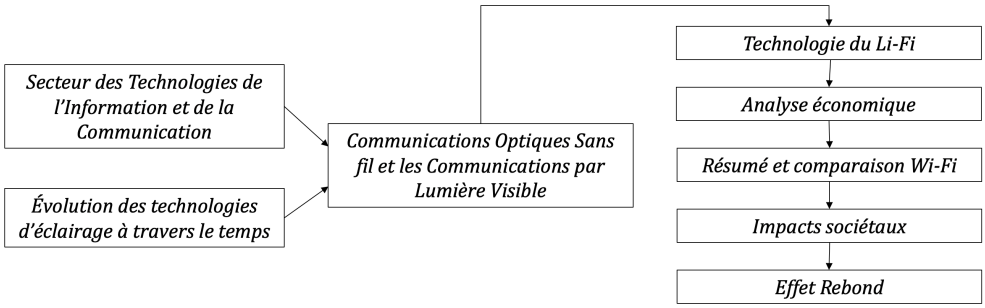


Figure 1: Plan de la revue de la littérature

De son côté, la recherche qualitative offrira une analyse de sept modèles d'affaire d'entreprises pour lesquelles le Li-Fi joue un rôle central au sein de leurs propositions de valeur, grâce à des entretiens semi-directifs.

Ces résultats seront finalement mis en perspective avec la partie théorique dans une analyse, avant de finir par une conclusion qui reprendra les points saillant de ce mémoire.

2 Revue de la littérature

2.1 Méthodologie et approche par l'impact

Afin d'aborder le sujet de ce mémoire de manière systémique, ce dernier utilise une « approche par l'impact sociétal ». Godin et Doré (2005) décrivent les impacts sociétaux comme pouvant être des impacts économiques, sociaux, sur la science, la technologie, les organisations, la santé, l'environnement, et bien d'autres.

Cependant, Bedouret et Dupleix (2019) expriment la difficulté d'aborder l'impact sociétal dans son ensemble vu la vaste gamme de domaines et de critères existant. Dès lors, ce mémoire se concentrera, dans un premier temps, sur les impacts technologiques, économiques, environnementaux et sociaux ainsi que sur la santé dans la partie théorique. Dans un deuxième temps, la partie empirique se concentrera, quant à elle, sur les impacts économiques grâce à une analyse des modèles d'affaires, bien que l'outil utilisé permettra d'aborder également les impacts sociétaux dans leur ensemble.

Une étape primordiale afin de pouvoir aborder une démarche exploratoire est de réaliser une revue de la littérature (Yom, 2015). Cette dernière permettra d'avoir une vue d'ensemble sur le thème de recherche et ainsi d'offrir une synthèse et une analyse de ressources pertinentes afin d'en ressortir les points saillants qui permettront d'aider à répondre à la question de recherche (Université d'Ottawa, 2014).

Étant donné la nature récente du sujet, les ressources scientifiques et académiques sur le sujet seront complémentés par des rapports d'organismes reconnus et des analyses de marché afin de pouvoir bénéficier d'une vue systémique sur le sujet. La naissance officielle du Li-Fi ayant eu lieu en Grande-Bretagne, une attention particulière sera mise sur les origines géographiques diverses des ressources utilisées afin de bénéficier de points de vue différents.

Durant les premières années, les nouvelles technologies connaissent de rapides avancées dans leur développement (Kurzweil, 2004). Par conséquent, la temporalité des ressources sera observée avec soin. Afin de construire cette revue de la littérature, des thèmes connexes primordiaux seront abordés initialement via des ressources scientifiques majoritairement.

Enfin, ce mémoire est réalisé en français dans une volonté d'amener le sujet à un niveau local. En effet, la grande majorité des articles scientifiques sur le sujet sont en anglais. Ainsi, des entreprises locales pourraient bénéficier de ce travail en ayant une vue d'ensemble sur la technologie, son marché, et ses impacts sociétaux, entre autres.

2.2 Le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication

A partir des années 1970, le développement des semi-conducteurs et des circuits intégrés, suivi par l'importance grandissante du secteur des technologies d'information ont amené l'humanité à une phase de révolution technologique.

En effet, le XXI^{ème} siècle a vu naître le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) grâce au mariage de deux secteurs majeurs du siècle dernier : le secteur des télécommunications et Internet. L'adoption massive généralisée d'appareils mobiles connectés a conduit à d'importants changements sociétaux ayant des impacts économiques, culturels et technologiques (Osseiran, Monserrat, & Marsch, 2015).

Cependant, le secteur ne cesse d'évoluer et de s'étendre. En effet, la prochaine étape pour le secteur des TIC sera de créer un cadre solide et indissociable afin de fournir des services de connectivité pour des scénarios comme la consommation de médias sur Internet et l'Internet des Objets (IoT). Alors qu'Osseiran, Monserrat et Marsch (2015) appellent cette révolution la « 4ème étape de la révolution industrielle », Haas (2016a), lui, décrit plutôt un situation dans laquelle nous allons « débloquer la 3ème révolution industrielle ».

Les besoins de connectivité sans fil sont en constante augmentation avec les usages grandissants de services multimédia mobiles et ont amené à une augmentation exponentielle de la demande de trafic sans fil (Cisco, 2020). En effet, chaque année, nous

consommons 100% plus de données sans fil que l'année précédente. De plus, le nombre d'appareils connectés se voit également augmenté et est estimé à 20 milliards à l'horizon 2023 et ce, dû à la tendance de l'IoT. Dans ce monde où tout devient digital et où tout est connecté, la demande en connectivité sans fil ne cesse de croître. Cependant, un point important qui sera abordé plus tard est la capacité insuffisante d'assurer la sécurité de nos données, actuellement vulnérables (Serafimovski, 2017).

De plus, ces révolutions nécessitent énormément d'énergie. Pour mieux illustrer cela, en 2015, le monde a consommé 43 Térawattheures afin de se connecter au Cloud. Environ 90% de cette consommation est due aux technologies de réseaux d'accès sans fil (Wi-Fi et réseaux cellulaires 3G et 4G). Afin de mettre ce chiffre en perspective, cela représente la consommation totale d'électricité de la Nouvelle-Zélande en 2019 (Serafimovski, 2017; Ministry of Business, Innovation & Employment, 2020).

En résumé, nous sommes dans une situation où la demande de connectivité est grandissante, les données sont vulnérables et l'énergie nécessaire est considérable. Tous ces éléments seront abordés dans les prochaines sections.

Afin de pouvoir comprendre la naissance des communications optiques sans fil intéressons-nous d'abord, comme le plan le prévoit, à ce qui représente 15% de la consommation mondiale d'électricité : l'éclairage (Jurczak, 2017).

2.3 Évolution des technologies d'éclairage à travers le temps

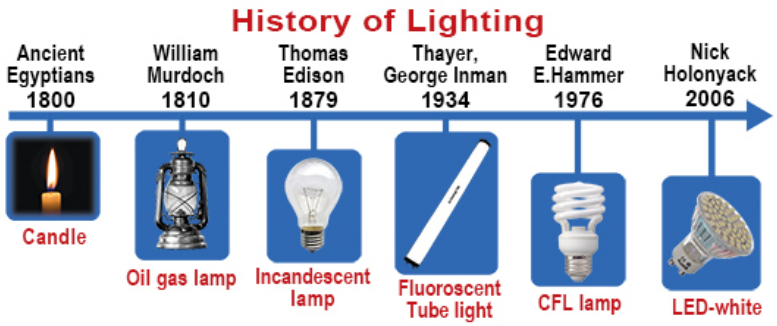


Figure 2: Évolution des technologies d'éclairage ("A short history of the light bulb", 2018)

Comme le montre la *Figure 2* ci-dessus, les technologies d'éclairage ont connu d'importantes évolutions à travers le temps. L'*Annexe A* propose également une classification des technologies d'éclairage. Bien qu'il ne sera pas possible de toutes les

aborder, intéressons-nous au cheminement vers la technologie qui a connu une croissance fulgurante ces dix dernières années : l'éclairage LED (Jurczak, 2017).

2.3.1 Que la lumière soit : la vue et le feu

La lumière est au fondement même de l'existence de la race humaine ainsi que de la planète. Depuis des millions d'années, elle joue un rôle primordial dans le développement de la vie sur Terre (Perwej, 2017). A l'origine, une symbiose a eu lieu entre des bactéries ayant la capacité de capter la lumière. Ces dernières ont ensuite connecté à notre cerveau des bâtonnets rétiniens et des cônes photorécepteurs afin de créer l'un des organes les plus sophistiqués du corps humain aujourd'hui : l'œil. Certains diront même que la vision est le sens sur lequel l'espèce humaine se repose le plus (Gracci, 2017).

Il n'est dès lors pas étonnant que l'une des priorités de la race humaine a rapidement été de s'éclairer lors des périodes nocturnes. C'est la raison pour laquelle, il y a 400 000 ans, nous avons appris à maîtriser le feu (Pauli, 2018).

2.3.2 L'ampoule

Malgré le fait que l'Homme ait longtemps utilisé diverses méthodes d'éclairage, comme la bougie ou encore la lampe à l'huile durant le Moyen Âge, intéressons-nous directement à la révolution de l'éclairage que l'humanité a connue il y a relativement peu de temps : l'ampoule.

Pour cela, il faut retourner à l'époque de Thomas Edison, le mondialement connu inventeur de l'électricité. C'est au XIX^{ème} siècle que ce dernier invente l'ampoule électrique à incandescence, une invention qui changera le monde pour toujours. Cependant, ce n'est que le début d'un long chemin pour le domaine des technologies d'éclairage qui connaîtra d'importants changements par la suite. Il faudra néanmoins attendre presque cent ans, avec la crise pétrolière de 1972, pour ouvrir les yeux sur les gaspillages de notre système d'éclairage (Pauli, 2018). En effet, bien que la technologie ait connu un grand succès commercial dans les années 1880, à peu près 90% de l'apport en énergie finissait en chaleur et non en lumière (PennState - Center for Nanoscale Science, 2018).

Dès lors, en 1980, une nouvelle technologie fait surface et permet de diminuer la consommation énergétique de 80% : la lumière fluorescente compacte (*CFL*). A ses débuts, la technologie était vue comme « agressive » et « drôlement colorée ». Malgré cela, cette dernière a évolué et les préoccupations pour l'efficacité énergétique et la durée de vie ont fait de l'éclairage fluorescent un succès (Tonzani, 2009). Cependant, elle sera rapidement qualifiée de technologie de transition car l'éclairage fluorescent utilisait du mercure, composé chimique dont l'Union Européenne a aujourd'hui interdit l'usage (Pauli, 2018 ; Union Européenne, 2009).

2.3.3 La LED

En 2005, Shuji Nakamura parvient à changer la lumière bleue et froide d'une diode en lumière blanche grâce à un revêtement de phosphore qui permet de ne laisser passer que les rayons blancs. Cette invention vaudra à Nakamura et ses collègues le prix Nobel de physique neuf ans plus tard. La lampe électroluminescente bleue, ou plus connue sous le nom de *LED pour Light-Emitting Diode*, était née (The Nobel Prize, 2014 ;Pauli, 2018).

Cette nouvelle technique permet de convertir 87% de l'apport énergétique en lumière, avec une conviction qu'il sera possible d'atteindre 99% de conversion en éclairage pour seulement 1% de perte de chaleur grâce aux microprocesseurs des LEDs (Pauli, 2018). C'est une perspective exceptionnelle et une évolution technologique considérable lorsque l'on prend en compte le fait que l'humanité investit actuellement 15 à 19% de la totalité de sa consommation d'énergie dans l'éclairage (Jurczak, 2017 ; Pauli, 2018).

Nous connaissons aujourd'hui l'usage initial très répandu de LED comme indicateur des états allumé ou éteint des produits électroniques grâce à la petite diode visible sur ces derniers. Après ces premières utilisations, les LEDs ont rapidement été utilisées dans les affichages digitaux à 7 segments des horloges digitales. Aujourd'hui, les LEDs composent en grande partie nos écrans de téléphone portable, smartphones et téléviseurs par exemple (Perwej, 2017).

Tonzani en 2009 rapporte les propos de Robin Devonshire, scientifique en chef chez CeraVision : « *cela prendra un long moment au LED pour atteindre la capacité lumineuse des lampes à induction* ». Pourtant, avec les avancements de la technologie d'éclairage à

semi-conducteurs, les lampes à LEDs sont en train de remplacer les ampoules à incandescence grâce à leur fiabilité et à leur plus grande efficacité énergétique (Dimitrov & Haas, 2015). Pauli (2018) rassure également en démontrant que nous ne sommes qu'aux balbutiements de la technologie d'éclairage LED et que nous ne pouvons prédire où elle nous mènera. Cette dernière est cependant vouée à être toujours plus sophistiquée, en proposant davantage d'économies d'énergie ainsi qu'un éclairage plus sain.

Aujourd'hui, la technologie d'éclairage LED prend de plus en plus d'ampleur et l'intérêt pour cette technologie s'accroît de manière exponentielle. En effet, en 2017, environ 960 millions de lampes LED ont été vendues mondialement. Ceci représente 40 à 50% de part LED sur le marché de l'éclairage, selon les pays. De plus, cela ne s'arrête pas là car selon des prévisions, les ventes mondiales devraient environ doubler sur 10 ans et ainsi atteindre 2 milliards de LEDs vendues en 2026. La taille de ce marché est actuellement évaluée entre 70 et 75 milliards d'euros (Jurczak, 2017 ; Niedercorn, 2019).

2.3.3.1 Différents types de LED

Plusieurs éléments permettent de différencier et classifier les produits LED : les couleurs, les caractéristiques de la surface extérieure, la structure des diodes, l'intensité lumineuse, les matériaux des puces et bien d'autres caractéristiques encore.

Cependant, dans le cas du Li-Fi, ce sont les LEDs blanches qui nous intéressent. Il existe actuellement quatre principaux types de LED permettant d'émettre de la lumière blanche: les pc-LED, les LEDs RVB, les Micro LEDs et les OLEDs (Gado & Abd El-Moghith, 2015 ; Garcia-Marquez & Topsu, 2017) . Une description détaillée de chacune d'entre elles est disponible en *Annexe B*.

Cependant, selon Garcia-Marquez et Topsu (2017), les pc-LED et les LEDs RVB seraient actuellement les plus susceptibles d'être utilisées comme émetteur Li-Fi. D'une part, les pc-LED ont l'avantage d'être les moins chères, et d'autre part, les LEDs RVB offrent une bande passante plus large, malgré un prix notablement supérieur. Ce dernier point ainsi

que la notion d'émetteur seront explicités et développés en profondeur dans les prochaines sections.

2.3.3.2 Potentiel des LEDs

D'un point de vue énergétique, comme décrit plus haut, l'objectif de l'équipe créatrice des LEDs bleues serait d'atteindre une conversion d'énergie de 99%. En atteignant ce taux, la technologie deviendrait le moyen principal d'éclairage mondial - qui plus est respectueux de l'environnement - et permettrait ainsi d'économiser des sommes d'argent considérables.

En effet, les LEDs ont beaucoup d'avantages comparé aux lampes à incandescence. Notamment une plus faible consommation d'énergie, une durée de vie allant jusqu'à 50 000 heures (face à 2000 heures pour les lampes à incandescence), une capacité à s'allumer et s'éteindre extrêmement rapidement, une plus grande efficacité (plus de lumens[1] par watt) ainsi qu'une capacité à réduire l'intensité lumineuse par le procédé de *dimming* (Gado & Abd El-Moghith, 2015 ; Carr-Wilson, et al., 2016).

D'un point de vue fonctionnalité, l'éclairage est bien entendu le premier rôle de ces lampes LED. Cependant, cette fonction primaire pourrait être agrémentée d'une fonction de transmission de données sans fil à haute capacité. Ce double emploi, combinant la fonction d'éclairage et une fonction de transmission de données, est rendu possible grâce aux avantages cités ci-dessus, et plus spécifiquement grâce à la capacité des LEDs de s'allumer et de s'éteindre de manière extrêmement rapide. C'est donc ce scintillement de la LED qui permet de transmettre de l'information, comme nous le verrons dans la partie *2.5.3* relative au fonctionnement du Li-Fi.

2.4 Les Communications Optiques sans Fil et les Communications par Lumière Visible

Nous avons vu dans les parties précédentes que la demande en connectivité est grandissante et que nos réseaux sont vulnérables. Nous avons également remarqué que l'impact énergétique, et ainsi environnemental, de notre consommation d'Internet est

[1] Mesure du flux lumineux (Ohno, 2006).

considérable. Les dernières avancées des technologies d'éclairage permettent déjà de réduire l'impact environnemental, mais elles permettraient également de transmettre des données.

Cependant, est-il vraiment possible de combiner les fonctions de connectivité et d'éclairage ? Cela permettrait-il de palier à la demande grandissante de connectivité et d'assurer plus de sécurité tout en offrant une solution plus écologique ? La présente section ainsi que la suivante tenteront de répondre à ces questions.

Lors de ma recherche et de mon exploration de la littérature sur le sujet du Li-Fi, deux thèmes principaux sont apparus : les OWC, pour *Optical Wireless Communication* comme nous le verrons ci-dessous, ainsi que les VLC, pour *Visible Light Communication*. Étant donné leur présence prédominante dans la littérature, il s'est avéré évident de s'y attarder, de saisir le sens de ces termes ainsi que de comprendre leurs positions et liens par rapport au thème central de ce mémoire.

2.4.1 Histoire des Communications Optiques sans Fil

Tout d'abord, nous devons comprendre qu'une communication optique se définit comme toute forme de télécommunication utilisant la lumière comme moyen de transmission. Cette forme de communication tire son origine d'un passé lointain où l'Homme transmettait des messages avec des feux de balise et des signaux de fumée. Aujourd'hui, les communications optiques sans fil, appelées *Optical Wireless Communication* ou encore *OWC* en anglais, se sont développées pour devenir une technologie haut-débit complémentaire aux communications par ondes radio (Dimitrov & Haas, 2015).

De plus, les systèmes de communication optique sans fil utilisent le spectre infrarouge pour les communications infrarouges et le spectre de la lumière visible pour les communications par lumière visible, communément appelées en anglais les *Visible Light Communication (VLC)*.

L'*Annexe C* décrit les origines et quelques exemples de premiers systèmes de communications optiques.

2.4.2 Potentiel et branches des OWC

Les systèmes de communication optique tirent leur potentiel du fait de pouvoir fournir une connectivité sans fil caractérisée par des débits de données extrêmement élevés grâce au large spectre libre de droit d'environ 670THz (Dimitrov & Haas, 2015). Ce spectre sera amplement mis en perspective dans les sections qui suivent. Les avancées évoquées aux points précédents font des communications optiques sans fil une technologie émergente de réseau sans fil.

Selon Dimitrov et Haas (2015) et Alimi et al. (2020), les communications optiques sans fil peuvent être divisées en deux branches principales :

- *Outdoor* : Connexions extérieures sur de longues distances grâce à des diodes laser directionnelles comme transmetteurs (*Free-Space Optics* [2]) ;
- *Indoor* : Réseaux intérieurs mobiles sans fil grâce à des lampes LED comme transmetteurs. Pour ces systèmes, ce sont les infrarouges et la lumière visible qui sont utilisés.

Le point commun de ces deux branches est de posséder une photodiode comme récepteur.

D'autre part, Perwej (2017) établit une distinction légèrement différente en classifiant les OWC en trois catégories :

- Les *Free-Space Optics* - FSO
- Les Communications par Lumière Visible - VLC
- L'Infrarouge - IR

Sa classification diffère uniquement sur le fait qu'il n'inclut pas les infrarouges comme faisant partie de l'indoor ou de l'outdoor mais plutôt comme une technologie supplémentaire dans l'utilisation des communications optiques sans fil. C'est également ce qu'il en ressort de la majorité des articles scientifiques : les VLC sont considérées à part entière et souvent séparées des infrarouges destinées à des applications nécessitant de

[2] Ce thème ne sera pas abordé davantage dans le cadre de ce mémoire.

faibles puissances (Behera & Dash, 2015). C'est une classification qui a du sens lorsque l'on considère les termes de manière littérale : l'infrarouge n'est pas visible à l'œil humain et ne fait donc pas partie des VLC. C'est ce que nous allons voir en détail dans la prochaine partie.

2.4.3 Les Communications par Lumière Visible (VLC)

Les communications par lumière visible se rapportent aux technologies de communication qui utilisent la lumière visible comme émetteur d'un signal. De son côté, l'air joue le rôle de moyen de transmission. Enfin, une photodiode est utilisée comme composante permettant de recevoir le signal (Garcia-Marquez & Topsu, 2017 ; Gado & Abd El-Moghith, 2015).

La lumière visible est composée d'ondes électromagnétiques perceptibles par l'œil humain. Il est intéressant de s'attarder sur le spectre électromagnétique afin de pouvoir appréhender pleinement le sujet dans la suite de ce travail. Pour rappel, les ondes électromagnétiques sont une des deux familles d'ondes existantes et sont omniprésentes dans notre vie de tous les jours. Comme le montre la *Figure 3* ci-dessous, la lumière visible se situe dans des fréquences allant d'environ 400THz à 790 THz. Ce détail d'ordre physique aura toute son importance pour la suite.

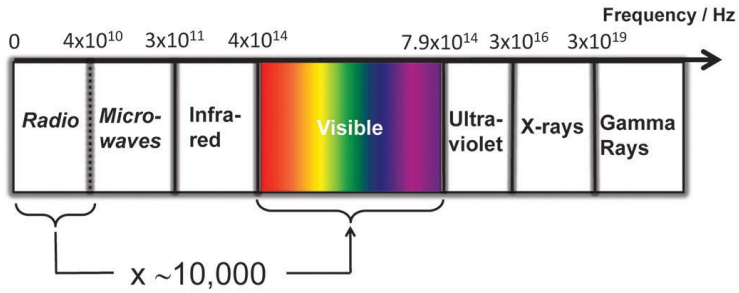


Figure 3: Spectre électromagnétique

Les cas d'usage des VLC sont groupés en deux catégories :

- Débits de données élevés. Par exemple pour des transferts de fichier.
- Débits de données faibles. Par exemple pour l'utilisation de la géolocalisation.

Avec l'avènement et l'utilisation mondiale à grande échelle des LEDs, l'opportunité de transférer des données par la lumière est devenue une idée de plus en plus intéressante

pour diverses industries à travers le monde (Garica-Marquez & Topsu, 2017). En effet, il n'était pas possible de faire clignoter les anciennes technologies d'éclairage comme les lampes à incandescence ou fluorescentes (Gado & Abd El-Moghith, 2015).

Ces éléments, combinés à l'encombrement du spectre de radiofréquence utilisé par le Wi-Fi ainsi que par les systèmes cellulaires de 4G et bientôt de 5G, mènent ainsi progressivement à la création d'un marché pour les communications par lumière visible. C'est exactement là que le Li-Fi entre en jeu.

2.5 La technologie du Li-Fi

2.5.1 Domaine technologique : des OWC au Li-Fi, en passant par les VLC

Afin d'avoir une vue exhaustive mais simplifiée du sujet, nous accepterons dans le cadre de ce mémoire de considérer le Li-Fi comme faisant partie de la classification de Perwej (2017), comme illustrée dans la *Figure 4* ci-dessous.

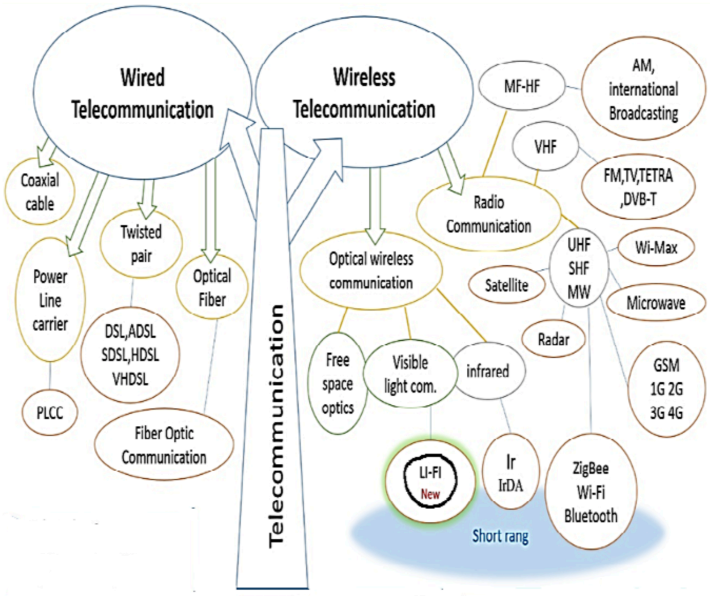


Figure 4: Classification des télécommunications

Comme le résume bien la figure ci-dessus, le Li-Fi fait en réalité partie des communications par lumière visible et, de manière plus générale, des communications optiques sans fil. Au même titre que le Wi-Fi et la 4G, ces technologies font partie de la catégorie des *télécommunications sans fil*.

Dès lors, le Li-Fi est considéré, dans une majeure partie de la littérature scientifique, comme une technologie ayant comme principe de base la technologie VLC. Cependant, certains auteurs n'utilisent pas l'appellation de Li-Fi dans leurs ouvrages ou articles mais en font implicitement référence. C'est notamment le cas pour la très récente section du livre d'Alimi et al. (2020) qui parle de la VLC de manière générale en l'appliquant presqu'uniquement implicitement au Li-Fi.

A l'heure actuelle, la littérature sur le Li-Fi n'est pas extrêmement riche et couvre généralement des thèmes récurrents depuis une dizaine d'années: le fonctionnement de la technologie, ses avantages et ses potentielles applications futures. Ainsi, nous aborderons ces thèmes dans les sections suivantes. Il est évident cependant que certains auteurs sont allés au-delà de ces thèmes, comme nous le verrons également plus loin.

Par conséquent, malgré le nombre restreint d'ouvrages scientifiques sur le Li-Fi spécifiquement, la littérature nous permet d'aborder ce nouveau moyen de connectivité sous son angle technologique principalement. Néanmoins, les sections ultérieures aborderont ses impacts économiques, socio-environnementaux ainsi que sur la santé.

2.5.2 Genèse et définition

Le Li-Fi est une technologie de communication par lumière visible qui a été développée par le professeur et scientifique allemand Harald Haas de l'Université d'Édimbourg en Ecosse. Une définition complète de la technologie est donnée par Jurczak (2017) de chez Lucibel, en se basant sur les diverses définitions déjà énoncées auparavant par Haas dans ses divers articles scientifiques, qui est la suivante :

« Le LiFi […] est un système sans fil complet, offrant une communication mobile bidirectionnelle multi-utilisateur, au sein d'un réseau sans fil constitué de très petites cellules optiques, et donc avec une densité de connexions potentielles très élevées. Chaque luminaire LiFi est un point d'accès. »

En bref, Haas (2018) la définit comme étant une « *technologie de communication sans fil utilisant la lumière visible et infrarouge pour des transferts de données à haute vitesse* ».

Un point très important à noter est que la littérature scientifique s'est assez peu attardée sur l'utilisation de lumière infrarouge dans l'application du Li-Fi. Dès lors, il faut garder en tête que malgré le fait que l'infrarouge ne soit pas au centre de l'exploration scientifique, elle fait tout de même partie de la définition complète, comme défini par son inventeur. C'est également la raison pour laquelle nous avons gardé la classification des télécommunications de Perwej (2017) plus tôt.

Lors d'une conférence TEDGlobal en 2011, le professeur Haas a démontré qu'il était possible de diffuser une vidéo haute-définition à partir d'une lampe LED commerciale (Haas, 2011). Dans la même lignée que les termes Hi-Fi (*High Fidelity*) et Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), il décide alors d'inventer le terme *Li-Fi*, pour *Light Fidelity*. Certains qualifieront cette nouvelle technologie par les termes simples de « Wi-Fi par la lumière » (Khandal & Jain, 2014).

A la genèse de la technologie du Li-Fi, les facteurs majeurs poussant à l'exploration de son potentiel sont l'épuisement des bandes passantes des ondes radio, aussi appelé le *crunch spectral*, ainsi que l'accélération des débits de données (Jurczak, 2017 ; Khandal & Jain, 2014). Autrement dit, la croissance constante de l'utilisation mondiale des réseaux en ligne nous pousse à augmenter les capacités qu'Internet nous offre. Cependant, les technologies actuelles ne sont plus suffisantes pour prévoir l'avenir des télécommunications, comme nous l'avons vu plus tôt (Haas, 2011).

2.5.3 Fonctionnement du Li-Fi

Afin de comprendre cette partie, revenons brièvement sur le fonctionnement bidirectionnel d'Internet. D'une part, une liaison *descendante* est nécessaire pour recevoir des emails ou regarder un contenu multimédia. En bref, Internet envoie des données vers l'appareil connecté. D'autre part, une liaison *montante*, c'est-à-dire lorsque l'appareil envoie des informations à Internet, est d'usage lorsque nous envoyons un email ou cliquons sur le lien d'un site Web (Bell, 2020).

Cette nouvelle technologie du Li-Fi se base sur les VLC et permet un transfert de données grâce à une ampoule LED qui varie en intensité et ainsi scintille. En amont, le signal de

données venant d'Internet permet de moduler cette intensité. Ainsi, lorsque la lumière est allumée un « 1 digital » est transmis. A l'opposé, lorsque la LED est éteinte, un « 0 digital » est transmis. Cette situation peut aussi signifier qu'il n'y a pas de transfert de données en cours (Alao et al., 2016).

L'avantage de cette action de la lampe LED d'être allumée et éteinte en alternance est que la modulation de l'intensité se fait si rapidement que les clignotements sont invisibles pour un œil humain, ce qui permet d'avoir un éclairage constant ainsi qu'une connectivité constante.

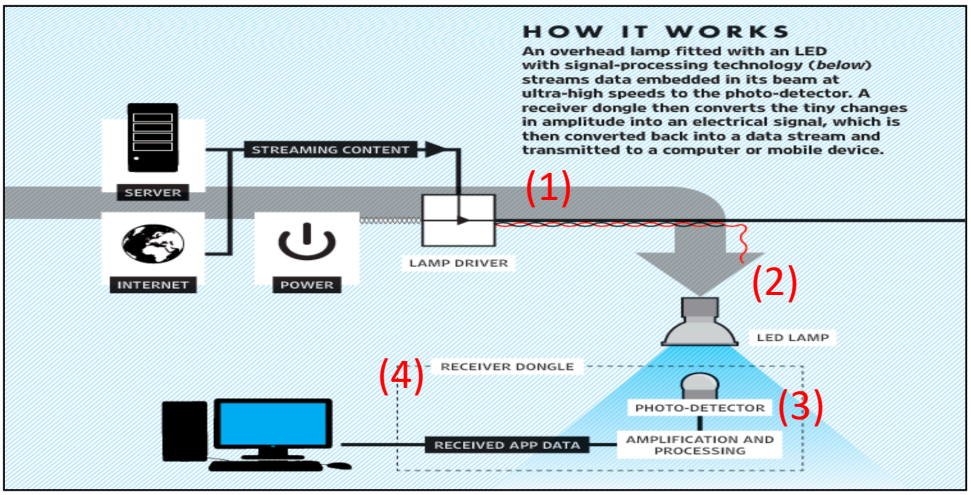


Figure 5 : Fonctionnement du Li-Fi (Sarkar et al., 2015)

Comme le montre la figure ci-dessus, voici une implémentation basique :

- L'intensité de la lampe LED est modulée par les données provenant d'Internet **(1)** ;
- La lampe LED émet le signal grâce aux scintillements indiscernables par l'œil **(2)** ;
- Le signal est réceptionné par un photodétecteur, composé d'une photodiode vu précédemment, qui est sensible aux variations d'intensité lumineuse **(3)** ;
- Les autres composants du dongle[3] récepteur, composé en partie du photodétecteur, reconvertit le signal en données afin d'être utilisé par l'appareil **(4)**.

[3] Dongle : Terme anglais couramment utilisé pour décrire un adaptateur sans fil.

Cependant, cette description comporte les deux imperfections suivantes :

Premièrement, elle n'est qu'une possible implémentation parmi quelques autres décrites dans la littérature. En effet, certains articles sont plus précis en décrivant comment les données arrivent jusqu'à la lampe LED. D'une part, avec de la fibre optique ou des câbles Ethernet classiques branchés à des lampes LED, et d'autre part, grâce à une alimentation électrique de ces lampes LED dite *Power over Ethernet* (POE) qui offre la possibilité de connecter un câble unique permettant la transmission des données ainsi que du courant électrique (Garcia-Marquez & Topsu, 2017 ; Alao et al., 2016 ; Pauli, 2018). Garcia-Marquez et Topsu (2017) mentionnent que, bien que la fibre optique soit la solution idéale, il est néanmoins aussi possible d'amener le signal jusqu'à la lampe grâce à de la 4G-5G ou une solution CPL. Le fonctionnement de cette dernière est décrit en *Annexe D*.

Deuxièmement, ce fonctionnement simpliste n'aborde pas la manière dont les données remontent vers le réseau. En effet, la consommation de contenu multimédia sur Internet est couverte par la solution ci-dessus car c'est une liaison descendante, mais le simple envoi d'un email, par exemple, qui nécessite une liaison montante, n'est pas prévu. Pour cela, la littérature diverge entre les possibilités de faire des requêtes montantes grâce au réseau Wi-Fi, et ainsi créer des réseaux « Hybride Wi-Fi/Li-Fi », ou alors d'installer un module infrarouge dans le dongle que l'on branche en USB à un ordinateur (Ayyash, et al, 2016 ; Jurczak, 2017). Cependant, que ce dongle serve de liaison montante ou pas, il est actuellement nécessaire pour une utilisation du Li-Fi étant donné qu'aucun appareil actuel n'est équipé de photodétecteur.

Nous remarquons donc que la littérature n'est pas unanime concernant un réseau Li-Fi typique. Actuellement, il faut certainement prendre en compte différents cas d'usage et envisager les différentes technologies possibles afin d'installer une solution Li-Fi adaptée.

En résumé, la technologie de Communication par la Lumière Visible (VLC) permet la modulation de l'intensité lumineuse à haute fréquence. Ceci permet d'encoder des informations et d'envoyer ces dernières à très grande vitesse par un luminaire, l'émetteur, jusqu'à un photodétecteur, le récepteur. Ceci se fait de façon imperceptible pour l'œil

humain. Le Li-Fi utilise cette base afin d'offrir une solution complète de communication mobile sans fil, bidirectionnelle et multi-utilisateurs.

2.5.4 Avantages, limites et inconvénients

2.5.4.1 Avantages du Li-Fi

La littérature actuelle sur le Li-Fi se concentre principalement sur des démonstrations de faisabilité et sur des implémentations (Dimitrov & Haas, 2015). La revue de la littérature permet de se rendre compte que les scientifiques ont à cœur de prouver le potentiel de la technologie mais également de montrer ses avantages, ainsi que ses potentielles applications. Dès lors, les sujets couverts par celle-ci sont souvent similaires voire semblables. Par conséquent, cette partie sera construite en prenant en compte ces similitudes.

Neuf grandes publications pour lesquelles le Li-Fi est le sujet central ont été rassemblées et triées par date. Ensuite, les avantages du Li-Fi ont été extraits afin de les résumer dans un tableau Auteur(s)/Avantage(s) disponible en *Annexe E*. Étant donné le nombre important d'éléments qui composent le tableau, un résumé de celui-ci est réalisé dans les prochaines lignes afin de comprendre les réels atouts de la technologie du Li-Fi.

La grande majorité des auteurs font référence aux *avantages* ou aux *forces* du Li-Fi en tant que tel. Néanmoins, certains mentionnent aussi que ce sont les avantages du Li-Fi *en comparaison* au Wi-Fi comme c'est le cas pour Alao et al. (2016). D'autres auteurs décrivent des caractéristiques du Li-Fi similaires à celles mentionnées par les auteurs ci-dessus, sans préciser que ces éléments sont des avantages, comme Pauli (2018) par exemple.

Les avantages principaux du Li-Fi peuvent être classés en quatre catégories : capacité, efficacité, disponibilité et sécurité. Cette catégorisation proposée par Haas (2011) et Sarkar, Agarwal & Nath (2015) a permis de dresser une liste organisée des avantages à partir d'une littérature souvent désordonnée. L'étude approfondie de cette dernière a également permis de mettre le doigt sur trois autres catégories d'avantages : la vitesse, l'infrastructure et la santé.

2.5.4.1.1 Capacité

Comparé aux ondes radio, une majorité d'auteurs affirment que l'utilisation du spectre de la lumière visible offre une bien meilleure capacité. En effet, la lumière visible dispose de 10.000 fois plus de fréquences disponibles que les ondes radio utilisées par le Wi-Fi, comme nous pouvons le voir sur la *Figure 3* du spectre électromagnétique. Cette valeur revient régulièrement dans la littérature, par exemple par Perwej (2017), mais a été récemment revue à 2.600 fois par Haas (2018).

Comme expliqué plus tôt, les fréquences de la lumière visible s'étendent jusqu'à plus de 700THz[4]. En prenant en compte le fait que la bande passante des ondes radio utilisées pour le Wi-Fi est limitée à 300GHz, les besoins en connectivité vont rapidement dépasser cette capacité. En effet, Haas (2018) prévoit une demande de bande passante pour les systèmes sans fil de 6THz à l'horizon 2038. Cela représente une demande vingt fois supérieure aux 300GHz que nous offrent les ondes radio actuellement.

Cependant, l'utilisation du spectre de la lumière visible permettrait de renverser cette situation. En effet, en considérant cette demande de 6THz, moins d'un pourcent de la bande passante de la lumière visible de plus de 700THz serait occupée. Par conséquent, l'utilisation du Li-Fi permettrait d'éviter le crunch spectral. Pour rappel, ce dernier représente une situation de saturation croissante du spectre des ondes radio (Haas, 2018 ; Jurczak, 2017).

De plus, la bande passante de la lumière visible est libre de droit, dite *licence free*, contrairement à la situation des ondes radio pour lesquelles la bande passante est chère, réglementée et sous l'emprise d'une poignée d'acteurs (U.S. Department of Commerce, 2016). Ce constat est illustré en *Annexe F*.

En résumé, l'utilisation libre de droit de la lumière visible augmente considérablement la capacité comparé aux ondes radio, permet ainsi de soulager la bande passante de ces dernières et ainsi d'éviter une crise de congestion encore plus importante.

[4] 700THz = 700 000GHz

2.5.4.1.2 Efficacité

Bien que liées, il convient de séparer ici l'efficacité énergétique, d'une part, et économique, d'autre part.

Le point principal pour l'efficacité énergétique concerne le fait que les fonctions d'éclairage et de connectivité sont délivrées en même temps. Ainsi, la consommation d'électricité est moindre par essence du concept. De plus comparé au Wi-Fi, le Li-Fi ne nécessite pas d'équipements supplémentaires comme un routeur. D'un point de vue énergétique, tout cela rend la technologie très efficace.

Par conséquent, ces économies d'énergie impliquent une efficacité économique dû au fait que les coûts d'électricité sont moindres en utilisant le Li-Fi plutôt que le Wi-Fi. D'un point de vue économique encore, les coûts de maintenance seraient inexistants et l'équipement résistant sur le long terme, comme nous l'avons vu plus tôt avec la longévité des lampes LED. Enfin, le coût d'implémentation du Li-Fi serait faible.

2.5.4.1.3 Disponibilité

La disponibilité concerne le fait que le Li-Fi peut être implémenté partout grâce à son utilisation de la lumière visible : d'une part les ampoules et la lumière sont omniprésentes et, d'autre part, les fréquences de la lumière visible ne vont pas engendrer d'interférence avec les autres ondes déjà utilisées.

En effet, plus de quatorze milliards d'ampoules sont actuellement utilisées mondialement. Celles-ci ne nécessiteraient que d'être remplacées par des lampes LED. Le succès grandissant de ces dernières, comme nous l'avons vu dans la section *2.3.3*, permet d'envisager ces remplacements dans un futur proche. Une fois ces lampes installées, chaque ampoule pourra devenir un point d'accès à Internet.

Du point de vue des fréquences, la physique nous montre que les ondes de la lumière visible ne sont pas sensibles aux interférences d'autres types d'onde. Ces interférences sont la raison pour laquelle le Wi-Fi ne peut pas être présent dans certains endroits spécifiques comme à bord des avions ou dans les centrales nucléaires par exemple. Au contraire, le Li-Fi permet de ne pas interférer avec le matériel de navigation d'un avion ou d'éviter des problèmes de connectivité dans des lieux dangereux comme des centrales

nucléaires. Le Li-Fi peut également être utilisé dans des environnements réglementés du point de vue des ondes radio, comme c'est le cas pour « *les établissements accueillant les enfants de moins de 3 ans* » où le Wi-Fi est interdit par la loi Abeille en France (Légifrance, 2015).

Pour résumer, le Li-Fi ne perturbe pas les réseaux à fréquences radio existants, et n'est pas non plus perturbé par ces derniers. Cela permet ainsi une utilisation dans des environnements sécurisés et réglementés du point de vue des ondes radio. Cet avantage ouvre la porte à de nombreuses applications, comme nous le verrons dans la section *2.5.5*.

2.5.4.1.4 Sécurité

La sécurité est un des arguments phares du Li-Fi. Effectivement, c'est certainement un des avantages ressortant le plus de la littérature.

En effet, comme nous l'avons vu plus tôt, la technologie du Li-Fi utilise la lumière pour transporter les données. Ainsi, de manière inhérente, le signal et les données ne sont pas accessibles au-delà du faisceau lumineux. Cela signifie que la sécurité est garantie car les murs et les matériaux opaques représentent la limite du signal. Les données sont ainsi protégées grâce à leur présence limitée dans l'espace et grâce au faisceau lumineux directionnel de la lumière LED.

Par conséquent, un pirate informatique voulant réceptionner vos données devra se trouver sous la même lumière que vous s'il veut arriver à ses fins, ce qui rendra son travail plus laborieux.

2.5.4.1.5 Vitesse

En termes de vitesse, les plus récentes publications sont unanimes : le Li-Fi va pouvoir offrir des vitesses commerciales de 100Gbps[5]. Les perspectives sont encore meilleures étant donné que des vitesses allant jusqu'à 224Gbps sont déjà possibles dans des conditions de laboratoire.

[5] Équivalent à 100 000Mbps

Afin de mettre ces vitesses en perspective, notons que les vitesses actuelles maximales des réseaux Wi-Fi en Belgique sont de l'ordre de 400Mbps, avec une vitesse moyenne de 36Mbps en 2018 (L'Avenir, 2018 ; Voo, 2020). Cependant, la dernière version des réseaux Wi-Fi, appelée *Wi-Fi 6*, permettrait une vitesse théorique jusqu'à 9,6 Gbps (Kastrenakes, 2019). Une rapide comparaison démontre que le Li-Fi a un potentiel à être 10 fois plus rapide que les meilleurs réseaux Wi-Fi, ou 2 500 fois plus rapide que les réseaux Wi-Fi standards moyens.

Pour illustrer cela davantage, imaginons un film haute définition de 6,25Go. D'une part, il faudra environ 23 minutes à votre réseau Wi-Fi pour le télécharger en Belgique, ou 12 minutes si vous disposez du Wi-Fi 6ème génération. D'autre part, il ne faudra à votre réseau Li-Fi qu'une demi-seconde pour télécharger ce même film.

2.5.4.1.6 Infrastructure

Certains auteurs soulignent le fait que l'infrastructure lumineuse est pré-existante et que seules les ampoules ont besoin d'être remplacées par des lampes LED compatibles Li-Fi. De plus, l'infrastructure nécessaire pour Internet existe a priori déjà. Il est donc possible de profiter de cette dernière afin de connecter la lampe à Internet. Par exemple, nous voyons que le luminaire Li-Fi de chez Lucibel sur la figure suivante peut être connecté à un câble Ethernet (Jurczak, 2017).



Figure 6: Émetteur et récepteur LiFi Lucibel (Jurczak, 2017)

2.5.4.1.7 Santé

Enfin, l'utilisation du Li-Fi permettrait d'éviter, ou du moins de réduire, l'utilisation des ondes radio. Ces dernières ont fait l'objet de récentes études, notamment menées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), prouvant que leurs effets sur le corps humain peuvent être néfastes, et ce, particulièrement pour les femmes enceintes ainsi que les enfants en bas âge. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle le Conseil de l'Europe recommande de ne pas dépasser une exposition aux fréquences radio de 620millivolts/mètre (Assemblée parlementaire, 2011 ; Pauli, 2018). A l'inverse, aucune

étude n'a pu démontrer la moindre nocivité du Li-Fi à ce jour. Ces point seront développés dans la partie *2.8* relative aux impacts sociétaux.

Pour conclure, malgré les avantages évidents que la technologie propose, il est certain que cette dernière connaît certaines limites et inconvénients. Ceux-ci sont exposés en détail dans l'*Annexe G*.

2.5.5 Applications du Li-Fi

Tout comme pour les avantages, une synthèse de la littérature existante sous forme de tableau est réalisée afin de rendre compte exhaustivement des points de vue des scientifiques et spécialistes sur les potentielles applications du Li-Fi.

Afin de réaliser ce tableau, huit sources ont été sélectionnées et ensuite classées selon leur date de publication afin de pouvoir offrir une vue d'ensemble sur les tendances des applications, ainsi que sur l'évolution dans le temps de ces dernières.

Afin de pouvoir classifier la liste brute des applications proposées par ces huit sources, les trois catégories proposées par Leba, Riurean, & Ionica (2017) sont utilisées : les appareils intelligents, les villes intelligentes et l'industrie. Dans un souci de concision, les trois applications les plus populaires des deux premières catégories seront développées ci-dessous. Cependant, le lecteur peut trouver une description des applications industrielles ainsi qu'une liste exhaustive des applications décrites dans la littérature dans les *Annexes H* et *I* respectivement. Bien que les références soient présentes dans le tableau susmentionné, des ressources supplémentaires seront néanmoins ajoutées çà et là afin de bénéficier d'une information plus complète.

2.5.5.1 Appareils intelligents

2.5.5.1.1 Santé

Afin d'offrir des services en temps réel, des LEDs peuvent être installées sur des appareils médicaux que l'on porte sur soi, afin qu'ils puissent être connectés à un réseau Li-Fi. Ainsi, des bracelets, boucles d'oreille ou autres objets équipés d'une lampe LED pourraient offrir un suivi en continu et en temps réel de l'état de santé d'une personne, avec la possibilité d'envoyer une alerte au médecin de famille en cas de problème.

De plus, il sera possible d'équiper les appareils médicaux modernes de Li-Fi dans les hôpitaux afin de permettre une connectivité stable, hautement nécessaire lors de possibles opérations à distance par exemple. Le réseau Li-Fi offrirait également une insensibilité aux interférences potentiellement causées par des appareils forcés d'utiliser des ondes radio comme des *Imageries par Résonance Magnétique* (IRM).

Le Li-Fi profite de la disponibilité des sources lumineuses déjà présentes en abondance dans ce genre de lieu et devient ainsi une solution très envisageable.

2.5.5.1.2 Localisation

Bien que les systèmes de navigation les plus connus utilisent le système américain GPS, acronyme pour *Global Positioning System*, celui-ci est loin d'être parfait. En effet, peu importe les améliorations constantes de ces systèmes, ils ne fonctionnent toujours pas là où nous passons la majorité de notre temps : en intérieur (European Commission, 2003).

Avec l'éclairage et les lampes LED dans les lieux publics comme les cinémas, théâtres ou bureaux d'entreprise, le Li-Fi pourrait offrir un guidage doté d'une précision de l'ordre de 10 à 15 centimètres.

2.5.5.1.3 Éducation

Les lieux d'éducation pourraient largement bénéficier d'une connectivité plus rapide et sans interruption grâce au Li-Fi. En effet, l'implémentation du Li-Fi pourrait créer une dynamique d'apprentissage différente avec une interconnectivité en temps réel entre 500 appareils dans un auditoire par exemple. En outre, cela permettrait d'améliorer les utilisations classiques mais aussi de développer le concept de *smart class*[6].

2.5.5.2 Villes intelligentes

2.5.5.2.1 Santé

Les hôpitaux sont des endroits très fréquentés, nous l'avons d'autant plus constaté avec la crise du COVID-19, où chaque patient ou visiteur est équipé de son téléphone cellulaire émettant et recevant des signaux radio. Ainsi, en ajoutant également les ordinateurs des

[6] Sarkar, Agarwal et Nath (2015) offrent une exploration du sujet des smart class Li-Fi.

médecins et membres du personnel hospitalier, ces endroits sont des nids à interférences. Cela rend ainsi l'expérience de connectivité médiocre, notamment à cause du spectre limité des fréquences radio, comme vu plus tôt dans la partie des avantages. Dès lors, cela peut entraver l'exercice des fonctions de ces personnes.

De plus, l'aspect sanitaire avec la potentielle dangerosité des ondes radio est également une préoccupation importante, particulièrement pour ce genre de lieux. Ainsi, le Li-Fi via l'éclairage LED se veut être une technologie saine et pouvant pallier au manque de fréquences radio, en déchargeant la pression sur ce dernier, tout en pouvant être bénéfique pour les opérations robotiques à distance et les procédures automatiques, grâce à une stabilité au niveau de la connectivité, explicitée plus tôt.

2.5.5.2.2 Trafic routier : système de transport intelligent

D'une part, les LEDs déjà présentes dans les phares avant et arrière des véhicules permettraient de développer les communications *Véhicule à Véhicule* (VàV) avec l'implémentation du Li-Fi. D'autre part, ces LEDs présentes dans les véhicules pourraient aussi communiquer avec des LEDs implémentées dans les panneaux de signalisation routière. Ceci ouvrirait la voie aux communications dites *Véhicule à Signalisation* (VàS).

Ainsi, nous pourrions envisager une réduction des accidents routiers et une meilleure fluidité au niveau du trafic grâce à une meilleure gestion et sécurité de ce dernier. En bref, une avancée pour plus de sécurité routière et de contrôle du trafic.

2.5.5.2.3 Éclairage public

A l'échelle mondiale, quatorze milliards d'ampoules déjà en circulation n'ont besoin que d'être remplacées par des LEDs compatibles Li-Fi pour pouvoir offrir une connectivité. Une fois ce changement opéré, toutes les lampes publiques pourraient être utilisées comme « hotspot Li-Fi ». En d'autres mots, chaque lampe ou lampadaire deviendrait un point d'accès Internet libre pour toutes les personnes passant sous le faisceau lumineux. Ces lampes peuvent également être utilisées pour offrir un suivi de l'éclairage public et de diverses données locales.

2.5.5.3 Conclusion et autres applications potentielles

Malgré le fait que la littérature nous offre une vue d'ensemble sur les potentiels cas d'usage du Li-Fi, ni les applications ci-dessus ni le tableau en annexe ne représentent une liste du potentiel réel de la technologie.

En effet, un nombre considérable d'appareils lumineux existent au niveau mondial, tant en intérieur qu'en extérieur, dans les objets, les infrastructures routières, les véhicules, les bâtiments ou encore les écrans. De ce fait, Alimi et al. (2020) estiment que les communications par lumière visible, et le Li-Fi par extension, vont permettre d'offrir une connectivité omniprésente pour les villes, maisons, appareils ou usines intelligentes.

Pauli (2018) précise judicieusement que, pour s'implémenter, n'importe quelle nouvelle technologie profite d'abord des faiblesses de l'ancienne technologie de référence. Le fait qu'il est possible de lier aussi facilement le tableau des avantages (cf. *2.5.4*) et celui des applications confirme en effet ce point. Par exemple, l'immunité aux interférences radio inhérente aux ondes de lumière visible permettrait l'installation du Li-Fi dans des lieux comme les avions, les hôpitaux ou encore les centrales nucléaires.

La littérature confirme bien l'état actuel du développement de la technologie du Li-Fi : une technologie qui se veut combler les lacunes et déficiences du Wi-Fi et qui va progressivement la compléter, voire la remplacer. Cela se ferait au début dans des cas d'usage très précis où le Wi-Fi est une solution médiocre, voire inutilisable. Cependant, dans quelques années, la technologie pourrait s'implémenter possiblement comme la solution de connectivité préférée dans les lieux d'habitation. Ce n'est d'ailleurs pas anodin que les applications standard de connectivité personnelle résidentielle n'est abordé que par un nombre limité d'auteurs et ce, seulement depuis ces trois dernières années.

Par ailleurs, afin d'avoir une idée plus précise du développement de la technologie du Li-Fi depuis ces dernières années, une ligne du temps synthétique composée des évènements marquants a été réalisée et est disponible en *Annexe J*. De plus, étant donné le caractère innovant de cette technologie et les zones d'ombre qu'elle admet, certains auteurs d'articles grand public ou scientifiques ont extrapolé sur les caractéristiques de son fonctionnement. Certaines de ces idées fausses étant récurrentes, certains

spécialistes, comme Haas (2016b), se sont attelés à rétablir la vérité sur ces dernières. La liste de ces six idées fausses courantes est disponible en *Annexe K*.

2.6 Analyse économique : marché, facteurs de croissance et acteurs

Nous connaissons désormais les tenants et aboutissants d'un point de vue technologique de ce nouveau moyen de connectivité. A présent, afin d'avoir une vision systémique de la technologie, il est adéquat de s'intéresser à ses aspects économiques et financiers.

Plusieurs instituts de recherche se sont emparés du sujet afin d'évaluer la taille actuelle du marché du Li-Fi et d'anticiper sa taille future. Actuellement, le marché du Li-Fi est estimé à plus de 70 millions de dollars américain (USD) par *Global Market Insights* (2020) pour l'année 2019. De leur côté, les instituts *Mordor Intelligence* (2020) et *Research and Markets* (2020) évaluent la taille du marché à 143 millions de USD pour la même année.

En ce qui concerne les prévisions d'avenir, les instituts précédemment cités s'y sont tous attelés également. A nouveau, *Mordor Intelligence* (2020) et *Research and Markets* (2020) s'entendent sur une estimation de la valeur du marché de 3,52 milliards de USD à l'horizon 2025. De son côté, *Global Market Insights* (2020) anticipe une taille de 8 milliards de USD pour le marché du Li-Fi en 2030. En résumé, ces instituts nous proposent des taux de croissance de plus de 2 300% et 11 000%, sur des horizons de cinq ans et dix ans respectivement.

Afin d'atteindre une telle croissance, différents facteurs sont explicités par ces instituts de recherche. Ils identifient entre autres le *crunch spectral* des ondes radio dû à l'IoT, l'adoption grandissante des communications VàV, les initiatives d'efficacité énergétique gouvernementales ou encore la demande croissante pour des réseaux haut débit (Mordor Intelligence, 2020 ; Research Markets, 2020 ; Global Market Insights, 2020).

Enfin, les acteurs principaux du domaine du Li-Fi peuvent être identifiés grâce à ces instituts mais également grâce à la plateforme du *Global LiFi Congress* (2019). Ces ressources identifient des entreprises telles que PureLiFi, Signify, Velmenni, VLNComm, Renesas Electronics Corporation, Oledcomm, Zero1, Lucibel, Nav Tech, et bien d'autres.

2.7 Résumé et comparaison entre le Li-Fi et le Wi-Fi

Jusqu'ici, nous avons découvert que le secteur des technologies des TIC vont bientôt faire devoir face au crunch spectral dû à l'utilisation massive des ondes radio. De leur côté, l'arrivée des diodes électroluminescentes, aussi appelées LEDs, plus puissantes et plus rapides permettent de penser leur utilisation comme des transmetteurs d'information. Ensuite, avant de s'attarder au cœur du fonctionnement du Li-Fi, de ses avantages et applications, nous avons identifié à quelle catégorie et sous-catégorie la technologie correspondait : des OWC aux VLC. Enfin, nous avons vu que le marché du Li-Fi est voué à connaître une croissance fulgurante sur ces prochaines années. A présent, intéressons-nous au Wi-Fi, la concurrente directe de la technologie du Li-Fi.

La grande majorité des auteurs de la littérature scientifique indiquent que la technologie du Li-Fi doit jouer un rôle de complément par rapport à la technologie du Wi-Fi, et non devenir sa remplaçante (Ayyash et al., 2016 ; Jurczak, 2017). Cette complémentarité est l'un des points clés sur lequel Harald Haas (2011, 2015, 2018) insiste systématiquement lors de ses conférences ainsi que dans ses articles scientifiques.

Cependant, afin d'avoir une idée de comment ces deux technologies peuvent se compléter, il est aussi intéressant de comprendre leurs similitudes et différences.

Pour ce faire, le tableau suivant est une synthèse de la littérature scientifique qui permet une comparaison entre le Wi-Fi et le Li-Fi. Grâce aux auteurs mentionnés dans la première colonne du tableau, voici le résultat synthétique de cette comparaison. La version complète de ce tableau se trouve en *Annexe L*.

La construction de ce tableau sous forme synthétique permettra de manière inhérente d'avoir une vue d'ensemble sur la technologie du Li-Fi et ainsi de résumer les informations clés présentes dans la première partie de ce travail.

	Li-Fi	Wi-Fi
Opérations	Transmission de données par des lampes LED	Transmission de données par des routeurs Wi-Fi
Spectre *(Haas, 2018)*	Lumière visible	Ondes radio
Gamme du spectre	~ 750 THz	~ 0,3THz
Débit de données le plus rapide	~ 250Gbps	~ 9,6Gbps (en Wi-Fi 6)
Coût *(Behera & Dash, 2015)*	Moindre que le Wi-Fi car spectre libre de droit	Cher en comparaison car utilisation du spectre radio
Confidentialité / Sécurité *(Sarkar, Agarwal, & Nath, 2015)*	La lumière - et donc le signal - est bloqué par les murs : transfert sécurisé de données.	Le signal n'est pas bloqué par les murs, des techniques spéciales doivent être utilisées pour garantir la sécurité.
Équipements *(Perwej, 2017)*	▪ Lampe LED ▪ Photodétecteur	▪ Routeur
Maturité du marché *(Sharma et al., 2015)*	Faible	Élevée
Consommation énergétique *(Perwej, 2017)*	Moyenne	Moyenne
Impact environnemental *(Alao et al. 2016)*	Faible	Moyen

Tableau 1: Comparaison Li-Fi et Wi-Fi

2.8 Impacts sociétaux du Li-Fi et du Wi-Fi

Après avoir analysé l'impact technologique du Li-Fi dans les sections précédentes, il est désormais pertinent d'aborder la question des impacts socio-environnementaux et sur la santé des technologies du Li-Fi et du Wi-Fi.

2.8.1 Impact environnemental

L'impact environnemental se définit comme l'effet, sur une période de temps définie et un espace donné, d'une activité humaine sur une composante de l'environnement pris dans son sens large, c'est-à-dire physique ou biologique par exemple (Wathern, 1984; Bedouret & Dupleix, 2019).

Dans son *Smart Guide to Climate Change* Griffiths (2020) démontre les impacts environnementaux de notre utilisation quotidienne d'Internet. En effet, sans que nous nous en rendions compte, envoyer un email peut émettre jusqu'à cinquante grammes de CO_2 si ce dernier contient une pièce jointe ou une photo. Richards (2018) montre qu'une utilisation à des fins professionnelles peut atteindre jusqu'à 135 kilogrammes de CO_2 par an. Cet exemple simple met en perspective que l'Internet n'est pas seulement un concept

abstrait mais nécessite une quantité considérable d'énergie pour fonctionner, comme nous l'avons vu également dans la partie sur les télécommunications.

Une des méthodes pour accéder à Internet est via le réseau sans fil Wi-Fi. Il est également possible d'estimer l'impact de cette technologie sur l'environnement. Selon Cisco (2020), il existe plus de 169 millions de points d'accès Wi-Fi en 2018. Ces derniers prédisent même une augmentation jusqu'à presque 628 millions de points d'accès en 2023, soit une croissance de 400%. Par ailleurs, plus de la moitié du trafic Internet passera par une connexion sans fil Wi-Fi en 2022 (Cisco, 2019).

Sikdar (2013) analyse l'impact du Wi-Fi en prenant une approche globale de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'utilisation finale en passant par la production des équipements et matériaux nécessaires. Ses résultats montrent que la majorité des émissions de CO_2, et donc l'impact environnemental, est causé par l'utilisation de l'équipement Wi-Fi afin d'accéder à Internet. En ce qui concerne l'étape de production, celle-ci ne représente qu'une partie mineure de la consommation.

Selon la littérature scientifique, le Li-Fi est systématiquement considéré comme une solution « plus verte », comme cela a été souligné lors de la création du tableau des avantages (cf. *2.5.4*). C'est aussi le cas de Lumoindong, Muslim, Nasreddin et Galina (2018) qui, en plus de qualifier la technologie de la sorte, vont plus loin en offrant une analyse des impacts environnementaux des deux technologies. Selon leur analyse, l'utilisation de la lumière visible est une solution plus respectueuse de l'environnement que les ondes radio. En effet, ces dernières sont connues pour causer des inhibitions de croissance à leur environnement, et spécifiquement aux plantes et aux insectes (Cucurachi et al., 2013). Kim et al. (2014) prouvent que les fréquences radio utilisées par le Wi-Fi peuvent aussi perturber les écosystèmes sous-marins. De plus, la consommation d'énergie du Wi-Fi est forcément plus importante car des routeurs sont nécessaires pour transmettre le signal. Cela demande de l'équipement supplémentaire, alors que le Li-Fi peut s'implémenter dans l'éclairage (Lumoindong et al., 2018).

Lumoindong et al. (2018) décrivent dans leur article que le Li-Fi, de son côté, peut avoir trois impacts principaux sur l'environnement. Premièrement, les rayons UV de la lumière visible peuvent causer de la pigmentation. Deuxièmement, les lampes LED produisent souvent de la lumière bleue qui peut endommager l'œil humain (Ticleanu & Littlefair, 2015). Troisièmement, un autre danger pourrait se situer au niveau des vapeurs d'arsenic qui se dégageraient d'une LED cassée, bien qu'à des doses minimes et ainsi non-mortelles.

Cependant, mis à part l'utilisation d'arsenic qui pourrait affecter l'environnement, ces impacts dits environnementaux s'assimilent plus à des impacts sur la santé, qui seront donc repris dans le point suivant.

Comme expliqué plus tôt, la littérature sur le Li-Fi n'en est qu'à ses débuts et les auteurs actuels ont à cœur de vouloir prouver ses avantages et de faire des démonstrations de faisabilité plutôt que de s'attaquer directement à ses potentiels défauts. Ceci explique probablement pourquoi la littérature ne s'attarde pas abondamment aux impacts environnementaux du Li-Fi.

Néanmoins, afin d'avoir une idée plus précise de l'impact environnemental du Li-Fi, il est intéressant d'extrapoler légèrement en s'attardant sur le cycle de vie des lampes LED qui semblent être le composant le plus important du système Li-Fi, au côté des *chipset*s et photodétecteurs (Global Market Insights, 2020).

L'analyse du cycle de vie se définit comme une "*technique pour l'évaluation systématique des aspects environnementaux d'un système de produits ou de services à tous les stades de son cycle de vie (ISO 14040:2006) depuis le stade de l'acquisition des matières premières jusqu'à la fabrication, l'emballage et la distribution, l'utilisation et enfin la fin de vie*» (Lekan & Tzeng, 2016 ; ISO, 2006).

Dans ce cadre, Lekan et Tzeng (2016) se basent sur plusieurs études afin de développer une analyse du cycle de vie des lampes LED sous forme de tableau, présent en *Annexe M*, allant des matières premières jusqu'à la fin de vie.

Il en ressort principalement que les impacts environnementaux les plus significatifs se situent aux niveaux des matières premières et de l'utilisation. De plus, il apparaît que la distribution et la fin de vie du produit sont les stades auxquels l'impact serait le plus faible. Toutefois, Lekan et Tzeng (2016) soulignent que le manque d'informations ainsi que l'incertitude concernant ces dernières empêchent la réalisation d'études précises sur le sujet à l'heure actuelle. Dans un article se focalisant sur l'extraction de matières premières pour la production de LED, Drachenberg, Mihailova et Nandamuri (2016) mentionnent également, avec insistance, le problème de manque de données disponibles afin de réaliser une analyse de qualité. Il semblerait ainsi que les cycles de vie des LEDs soit sous-documentés dans la littérature actuelle.

Par ailleurs, il est assez compliqué d'extrapoler sur les autres composants principaux du système car la littérature est également très peu fournie à ce sujet.

Pour finir, Ghosal et Panda (2014) envisagent également le Li-Fi comme une alternative plus écologique. En effet, tout comme un certain nombre d'auteurs de la section relative aux avantages, ils insistent sur les économies d'énergie réalisées grâce aux lampes LED qui amèneront à un « *monde plus propre et plus écologique* ».

2.8.2 Impact social et sur la santé

La littérature ne s'intéresse pas aux impacts sociaux du Wi-Fi en tant que tels mais plutôt d'Internet dans son ensemble, ce qui sort du cadre de ce mémoire. Cependant, divers auteurs se sont intéressés aux impacts sur la santé de cette technologie étant donné qu'elle utilise des ondes radio pouvant être absorbées par le corps humain.

En ce qui concerne les impacts sur la santé du Wi-Fi, une étude d'Avendano et al. (2012) montre un impact négatif sur la motilité du sperme après une exposition à des ondes radio. En 2011, le Centre international de Recherche sur le Cancer, une filiale de l'Organisation Mondiale de la Santé, classifie les ondes radio comme « potentiellement » cancérigènes (Centre international de Recherche sur le Cancer, 2011). Foster et Moulder (2013) réalisent une méta-recherche dans laquelle ils rejettent la majorité des effets sur la santé relevés par les articles scientifiques de l'époque, en raison du manque de rigueur scientifique. Cinq ans plus tard, Pall (2018) réalise également une méta-recherche dans

laquelle il répondra à Foster et Moulder (2013). Ce dernier marque son accord sur certaines justifications concernant le manque de rigueur de ces études, mais soutient que certaines d'entre elles ont réellement pu prouver les impacts que les ondes radio, et ainsi le Wi-Fi, ont sur la santé. Même si certains défenseurs insistent sur les zones d'ombre de ces études, le principe général de précaution nous amènerait néanmoins à une réduction de l'intensité des ondes radio (Pauli, 2018).

Du côté du Li-Fi, les impacts sur la santé ont déjà été évoqués plus tôt : l'impact des LEDs - et plus particulièrement de la lumière bleue qu'elles produisent - sur l'œil humain ou encore des possibles vapeurs d'arsenic. De plus, la lumière, et l'éclairage en général, peut affecter le rythme circadien humain. Par exemple, l'éclairage LED le soir peut affecter l'horloge interne et créer divers problèmes de santé. Des LEDs très puissantes pourraient causer des dégâts rétiniens en les regardant directement (Ticleanu & Littlefair, 2015). Il est donc important de produire rapidement des LEDs qui respectent la vision humaine (Pauli, 2018). Cependant, les avantages pour la santé sont qu'ils ne contiennent pas de mercure, n'émettent pratiquement pas d'UV ni de champs électrique ou électromagnétique nocifs pour la santé (Ticleanu & Littlefair, 2015).

En ce qui concerne les impacts du Li-Fi sur la société, Pauli (2018) décrit deux impacts principaux que l'implémentation de cette technologie pourrait avoir.

Premièrement, le Li-Fi pourrait combler le fossé socio-économique mondial. En effet, bien que le monde occidental profite aujourd'hui d'un accès à Internet, ce n'est pas le cas pour les 50 autres pourcents du monde. Ces derniers sont restreints car l'accès à Internet nécessite des infrastructures[7] bien trop coûteuses pour les gouvernements ou les individus privés. Pour combler ce fossé de cohésion mondiale, le Li-Fi peut proposer une installation sans investissements lourds en utilisant des panneaux solaires et des infrastructures d'éclairage existantes. La combinaison de l'éclairage public avec la technologie du Li-Fi et des ressources d'énergie renouvelables sera un des moyens de combler le fossé socio-économique mondial en amenant notamment une meilleure

[7] Satellites, antennes, câbles, routeurs, etc.

éducation, une réponse aux besoins de santé ou encore des partages avec les communautés locales.

Deuxièmement, le Li-Fi pourrait redonner vie à l'objectif initial d'Internet d'être une expérience démocratique stimulante. Bien que cela ait été le cas sur le 25 premières années, le *World Wide Web* (WWW) est ensuite devenu une structure verticale dominée par quelques grandes forces prépondérantes. Ces forces manipulent généralement les contenus Internet en voulant confirmer ce que l'utilisateur veut y voir, et l'argent déboursé permet d'apparaître comme premiers résultats dans les recherches : la démocratie elle-même étant dès lors mise en danger. Dans ce cadre, le Li-Fi serait une chance de pouvoir décider ce qui est partagé grâce à un réseau local greffé aux infrastructures lumineuses. Ce faisant, il sera possible de se détacher du *WWW*. Ce genre de réflexion pourrait totalement faire sens lorsque l'on sait que 90% de la consommation Internet sont des recherches utilisées à des fins locales. Cette initiative au niveau des villes pourrait inciter à une montée de l'entreprenariat local, et aussi à un meilleur respect de la vie privée grâce à la modification de la notion de Big Data. Le Li-Fi ouvrirait la voie à une renaissance en ligne et redonnerait vie au rêve originel d'Internet.

2.9 Effet rebond

Selon Berkhout, Muskens et Velthuijsen (2000), la technologie est la meilleure source afin de réaliser des économies d'énergie. Comme nous l'avons vu plus tôt, les perspectives énergétiques de la technologie du Li-Fi sont généralement bonnes, grâce notamment à la technologie d'éclairage LED.

Cependant, un regard vers le passé nous montre que des évolutions technologique plus efficaces énergétiquement ont conduit à une augmentation de la consommation d'énergie dû à des changements de comportement et d'habitude de consommation. C'est ce qu'on appelle l'effet rebond (Economic and Social Research Council, 2020). Par exemple, si une voiture devient plus efficace énergétiquement grâce à des améliorations technologiques, 100 kilomètres peuvent être réalisés avec moins de carburant, et ainsi à un coût moindre. Par conséquent, la propension à vouloir se déplacer en voiture peut augmenter grâce à cette réduction de coût (Binswanger, 2001).

La littérature n'est pas unanime quant à une définition unique ou quant aux méthodologies de quantification de l'effet rebond (Greening, Greene, & Difiglio, 2000). Dans sa méta-recherche sur le sujet, Binswanger (2001) définit ce dernier comme suit : *« L'effet rebond décrit une augmentation de l'efficacité des ressources ou de l'énergie qui ne se traduit pas par une diminution correspondante de l'utilisation de l'énergie ou des ressources. ».* Cet effet rebond est également appelé « *paradoxe de Jevons* » et est défini comme une association positive entre efficacité et utilisation de ressources (York & Mcgee, 2016).

Il est également important de noter que l'effet rebond possède une composante directe ainsi qu'une composante indirecte, comme illustrées dans la *Figure 7*. D'une part, l'effet rebond direct désignerait par exemple une utilisation plus importante d'éclairage LED dû aux coûts moindres qu'elle engendre. D'autre part, l'effet indirect se focalise sur les utilisations alternatives des économies financières réalisées dues à l'utilisation d'une technologie plus efficace énergétiquement (Carr-Wilson, et al., 2016). Étant donné la difficulté de quantifier les effets indirects, la suite de cette section se concentrera sur la composante directe de l'effet rebond.

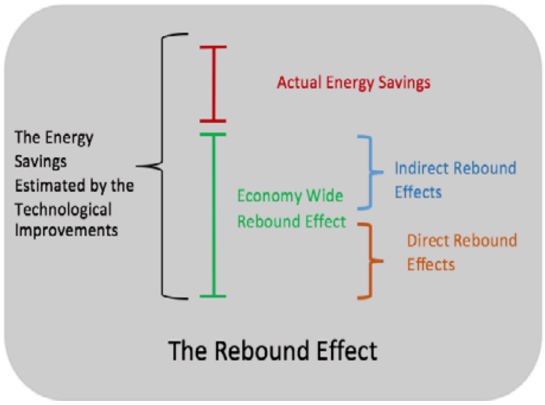


Figure 7: Effet Rebond

Étant donné le stade précoce de développement de la technologie du Li-Fi, aucune recherche ne s'est intéressée à l'effet rebond de cette dernière. Néanmoins, nous pouvons essayer de l'appréhender en s'intéressant à l'effet rebond de l'éclairage LED, une composante essentielle du système.

Dans un récent article, Blum, Hübner, Milde et Neumärker (2018) s'intéressent aux preuves empiriques, à travers neuf études datant des années 2000 à 2014, de l'effet

rebond dans le secteur de l'éclairage. Ils analysent l'étude de Tsao et al. (2010) dans laquelle ces derniers défendent que les LEDs vont être la technologie d'éclairage la plus populaire dans le futur et que cette dernière va connaître une baisse des prix, tout en gagnant en efficacité. Néanmoins, Saunder et Tsao (2012) démontrent que l'amélioration de l'efficacité énergétique des technologies d'éclairage ont amené à un effet rebond de l'ordre de 100% sur ces 300 dernières années. En d'autres mots, les gains d'énergie sont compensés intégralement par l'augmentation de l'utilisation de la nouvelle technologie, et plus spécifiquement ici par l'amélioration de l'intensité lumineuse. Ils indiquent précisément que «*si les tendances historiques établies (…) prévalent à l'avenir, l'introduction de nouvelles technologies d'éclairage plus efficaces n'est pas susceptible de limiter la consommation d'énergie (…)* » (Saunder & Tsao, 2012).

Cependant, Schleich, Mills et Dütschke (2014) réalisent une étude dans laquelle ils quantifient l'effet rebond de la transition vers des technologies d'éclairage LED ou CFL, à partir de technologies d'éclairage à incandescence ou halogène. Ces derniers ressortent de leur étude un effet rebond direct moyen de 6,3% lors de cette transition. Sur la *Figure 8*, donnant une description plus détaillée de ce résultat, il apparaît que l'effet rebond de la transition vers la technologie LED est quantifié à environ 10% et moins de 0% de rebond direct, en utilisant initialement respectivement la technologie à incandescence et la technologie halogène. Cet effet rebond serait majoritairement dû à une luminosité intrinsèque plus importante ainsi qu'un temps d'utilisation supérieur (Blum et al., 2018).

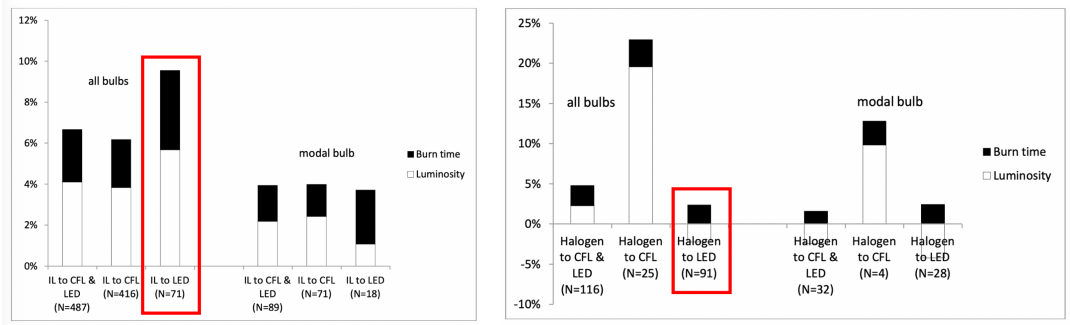


Figure 8: Effet Rebond - Transition vers la technologie LED

Malgré ces résultats très précis, il apparaît qu'ils ne sont pas très populaires et que la littérature est généralement assez pauvre sur le sujet. Dès lors, il convient d'analyser le sujet plus en profondeur lorsque de nouvelles études seront disponibles. Pour aller plus

loin, il est important de reconnaître également que l'utilisation d'Internet lié à la fonction lumineuse pourrait potentiellement avoir un impact important sur l'effet rebond direct, bien que ce sujet ne soit pas documenté à l'heure actuelle.

Mis à part les avantages environnementaux, Saunders et Tsao (2012) et Carr-Wilson et al. (2016) insistent toutefois sur le fait qu'il est tout de même nécessaire de continuer de développer de meilleures technologies d'éclairage et d'innover.

2.10 Circular Canvas et Hypothèses

Dans la deuxième partie de ce mémoire, une analyse empirique des modèles d'affaire des entreprises ayant la technologie du Li-Fi au cœur de leur offre sera réalisée. Cependant, le but de cette partie sera d'analyser les modèles d'affaire tout en analysant les impacts sociétaux de cette technologie.

L'analyse du modèle d'affaires d'une entreprise permet de comprendre l'organisation générale d'une entreprise : sa proposition de valeur, sa viabilité, faisabilité et désirabilité et est définit comme « *la manière dont une organisation crée, fournit et saisit la valeur* » (Hermans, 2019 ; Joyce & Paquin, 2016). Le Business Model Canvas (BMC) développé par Osterwalder et Pigneur (2010) est l'un des outils les plus communément utilisés pour analyser les modèles d'affaire. Cependant, celui-ci ne prend pas en compte les aspects sociétaux qui nous intéressent également.

Dès lors, afin de pouvoir réaliser cette analyse empirique avec rigueur, profondeur et précision, tout en couvrant les impacts sociétaux désirés, il est nécessaire de choisir une grille de lecture, ou aussi appelé un *framework*, complète, précise et efficace. L'outil choisi pour ce faire est le Circular Canvas.

Le Circular Canvas est un outil développé par le Circulab, une agence internationale ayant pour mission d'accélérer la régénération des écosystèmes grâce à des services de formation, conseil et conception (Circulab, s.d.-a). Cet outil permet d'appréhender l'impact économique grâce à ses aspects classiques repris du BMC mais également d'appréhender les impacts sociétaux positifs et négatifs sur toutes les parties prenantes

de manière générale (Circulab, s.d.-b). Cette portée systémique inhérente est la raison du choix du Circular Canvas. Une version complète de ce dernier est proposée en *Annexe N*.

Comme nous le verrons de manière très détaillée dans la partie suivante de ce mémoire, le Circular Canvas aborde les thèmes suivants : Mission ; Activités clés et Partenaires; Ressources : naturelles, techniques, énergétiques ; Proposition de valeur et Utilisateurs & Contextes ; Usage Suivant et Distribution ; Revenus et coûts ; Impacts positifs et négatifs.

Maintenant que nous avons un cadre de travail précis pour le déroulement de l'analyse qualitative, il est primordial de poser certaines hypothèses développées grâce à la revue de la littérature afin de pouvoir les confronter par la suite avec les résultats des différents entretiens empiriques. Dans ce cas, chaque case du Circular Canvas joue le rôle d'une hypothèse, bien que cette dernière soit formée de plusieurs éléments.

Étant donné la complexité et la quantité d'éléments hypothétiques, le Circular Canvas en *Annexe O* résume les hypothèses de travail. Ceci permettra également une comparaison aisée pour le lecteur lors de l'analyse.

3 Analyse qualitative

3.1 Méthodologie

3.1.1 Méthode de collecte des données

Dans le but de mener à bien cette recherche qualitative, des entretiens semi-directifs individuels ont été menés afin de collecter des données empiriques. Ce type d'entretien permet de bénéficier d'un cadre relativement strict, plus particulièrement les questions du Circular Canvas, tout en ayant une certaine liberté de parole permettant d'aborder des sujets qui n'étaient pas anticipés au préalable, mais qui pourraient apporter une plus-value pour l'analyse (Godfroid, 2012). L'entretien semi-directif permet également d'enrichir le guide d'entretien au fur et à mesure des interviews (Gavard-Perret et al., 2008). Savoie-Zajc (1997) définit l'entretien semi-directif comme « *Une technique de collecte de données qui contribue au développement de connaissances favorisant des approches qualitatives* ». Burnard et al. (2008) décrivent la méthode comme une des plus communément utilisées pour la collecte de données dans une recherche qualitative et Gavard-Perret et al. (2008) précisent que c'est la méthode la plus utilisée dans la recherche en sciences de gestion.

Dès lors, le guide d'entretien utilisé pour réaliser ces entretiens a été développé à partir des questions présentes dans le Circular Canvas qui permettent d'analyser le modèle d'affaires de l'entreprise interrogée ainsi que d'appréhender les impacts sociétaux positifs et négatifs. En résumé, ce guide permet une synthèse du modèle d'affaires sous forme de canvas, ainsi que l'adoption d'une pensée systémique tant en termes financiers qu'en termes sociétaux. Ce guide d'entretien est présent en version complète dans l'*Annexe P*.

3.1.2 Taille et composition de l'échantillon de travail

Afin de pouvoir mener à bien la recherche qualitative, la première étape a consisté à établir une liste de potentielle composition d'échantillon de travail. Le but est de pouvoir proposer une analyse systémique de la technologie du Li-Fi grâce à des acteurs clés du domaine. Pour ce faire, des ressources en ligne regroupant les noms des plus grandes entreprises du domaine ont été utilisées, comme par exemple les analyses de marché

menées par *Mordor Intelligence* (2020) et *Global Market Insights* (2020) qui proposent les entreprises évoquées en section *2.6*. Afin de proposer une analyse pertinente, il a semblé judicieux de sélectionner des acteurs se trouvant dans une zone géographique présentant une croissance importante du marché du Li-Fi. Pour ce faire, la *Figure 9* illustrant les prévisions de croissance du marché a été utilisée. De plus, grâce au réseau social *LinkedIn*, des personnes actives dans le domaine du Li-Fi ont été sélectionnées et identifiées comme potentiellement intéressantes.

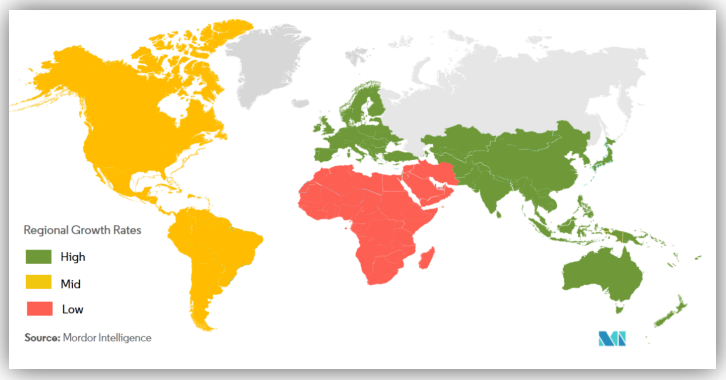


Figure 9: Marché du LiFi - Taux croissance par région (2019-2024)

Ensuite, il a semblé intéressant d'intégrer des acteurs qui proposent la technologie du Li-Fi mais pour lesquels cette dernière ne fait pas partie de leur activité principale. Ceci permettrait d'avoir le point de vue systémique désiré grâce leurs positions différentes sur la chaîne de valeur.

Enfin, afin d'intégrer un point de vue à la base de la chaîne de valeur mais également de prendre du recul sur les innovations technologiques, il était intéressant d'amener le point de vue d'un expert en télécommunications.

Certaines entreprises clés n'ont malheureusement pas répondu ou ont répondu défavorablement à une demande d'interview. C'est le cas par exemple de PureLiFi et Lucibel, mais aussi de l'entreprise Chinoise InfinityTechnology ou l'américaine LumEfficient. De son côté, Proximus a fait mention du fait que le LiFi ne faisait pas partie des technologies d'intérêt pour la firme actuellement. Cependant, un échantillon de 8 personnes hautement pertinentes composé de leaders et d'acteurs importants du secteur a été sélectionné en vue de la réalisation de cette analyse qualitative (*Annexe Q*) :

- **Ange-Frederik Balma** : CEO de l'entreprise internationale LiFi-LED. Cette dernière est basée en Côte d'Ivoire et propose la technologie du LiFi pour des zones rurales. Diplômé en Ingénierie d'Informatique et Réseaux, son expertise et son expérience en tant qu'entrepreneur depuis 2006 font de lui un intervenant pertinent.

- **Karen Bamford** : *Product Manager* LiFi chez Signify (anciennement Philips Lighting) qui est une entreprise néerlandaise spécialisée dans la conception de solutions d'éclairage. Ayant travaillé toute sa carrière dans le géant de télécommunication Liberty Global, elle dispose d'une expertise indéniable dans le domaine et fait maintenant partie d'une équipe LiFi composée d'une cinquantaine de personnes. Signify est aujourd'hui l'entreprise leader sur le marché mondial de l'éclairage connecté (Philips, 2020).

- **Marc Vanveckhoven** : Responsable stratégie et positionnement de marché chez Oledcomm. Cette entreprise française, née officiellement en 2012, est une spin-off de l'Université de Versailles. La position de leader sur le marché du LiFi dont bénéficie Oledcomm couplée à l'expertise des affaires de Marc Vanveckhoven, diplômé en Gestion, inscrivent adéquatement cette intervention dans le cadre de ce mémoire (Oledcomm, 2018a).

- **Deepak Solanki** : CEO de l'entreprise indienne Velmenni, fondée en 2012 et dont les opérations sont partiellement nées en Estonie grâce à un programme d'accélération de startups. Velmenni est l'une des leaders du marché du LiFi et l'une des entreprises les plus valorisées dans le domaine des communications optiques. Cette position de marché, cette réputation et l'expertise technique et managériale de Deepak font de son intervention une plus-value judicieuse.

- **Alban N'Dri** : Responsable Marketing de l'entreprise Sinilux, filiale française de l'entreprise LiFi-LED, qui veut s'attaquer au marché des *smart cities* en Europe, depuis 2019. Cette intervention est rendue pertinente entre autres par la vue d'ensemble d'Alban N'Dri sur le marché du LiFi et son expérience internationale.

- **Cédric Gelpi** : *Innovation Officer* dans le *LiFi Competence Center* chez Engie Belgique. La position centrale sur le marché de l'énergie d'Engie en Belgique enrichira adéquatement le contenu de notre recherche grâce notamment à la vue étendue sur la chaîne de valeur. Cette position de marché associée aux compétences larges, du plus technique au plus « business », de Cédric Gelpi font de lui un intervenant pertinent.

- **Micheline Perrufel** : Ingénieure de Recherche et Cheffe de Projet Innovation chez Orange France. Grâce à la position centrale du géant du secteur de la télécommunication et aux compétences techniques affinées de Micheline dans le domaine des communications optiques, son intervention permettra d'enrichir excellemment la recherche.

- **Prof. Jean-Pierre Raskin** : professeur de télécommunications à l'École Polytechnique de Louvain (EPL), faculté de l'Université Catholique de Louvain (UCL). Il est également membre du collectif ENCOS qui défend le développement d'une électronique durable. Ses connaissances sectorielle et historique ainsi que son intérêt pour le thème du développement durable apporteront ensemble un point de vue unique et global sur la chaîne de valeur.

Maintenant que nous avons pris connaissance de la pertinence respective de chaque intervenant, observons dans quelle perspective générale ces derniers s'inscrivent.

Premièrement, d'un point de vue géographique, l'objectif était de diversifier l'origine des entreprises intervenantes. Dans ce cadre, nous avons eu des intervenants provenant d'Inde en Asie (Velmenni) ; de Belgique, France et Pays-Bas en Europe (Engie, Oledcomm, Orange, Sinilux, Signify) ; ainsi qu'en Côte d'Ivoire en Afrique (LiFi-LED). La carte ci-dessous est une illustration de leurs origines :

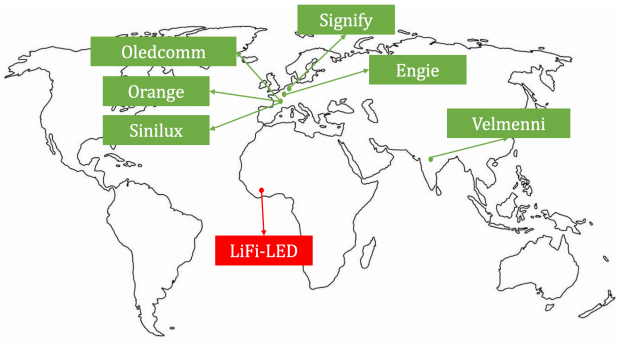


Figure 10: Origines géographiques des intervenants

Cette dernière peut être mise en perspective avec les prévisions de croissance du marché du Li-Fi présentées ci-dessus sur la *Figure 9*. En effet, l'Europe et l'Asie sont deux marchés pour lesquels Mordor Intelligence (n.d.) prévoit une croissance élevée.

Deuxièmement, aborder la chaîne de valeur de manière large est extrêmement pertinent afin d'offrir une vision systémique au lecteur. A la base de la chaîne de valeur, le professeur Raskin pourra offrir un point de vue sur les matières premières, en tant que spécialiste de microprocesseur, mais pourra aussi offrir un point de vue général sur les télécommunications et leurs évolutions. Ensuite, des points de vue centraux sur la chaîne de valeur sont offerts par les entreprises dont le LiFi fait partie de l'offre principale, représentées par LiFi-LED, Oledcomm, Velmenni et Sinilux. Le positionnement unique de leader dans le secteur de l'éclairage de Signify enrichira également l'origine des points de vue de la chaîne de valeur. Finalement, les entreprises Engie et Orange, respectivement présents dans le secteur de l'énergie et dans le secteur des télécommunications, permettront d'avoir une vue sur le bout de la chaîne de valeur, au plus proche du client.

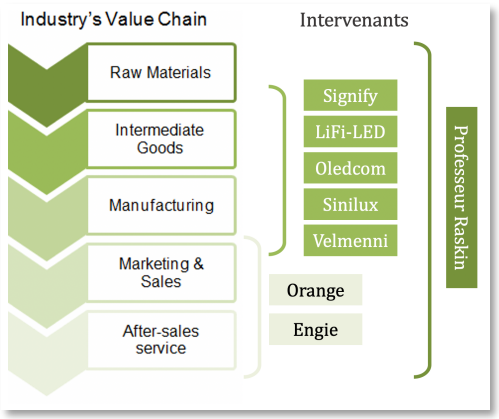


Figure 11: Chaîne de valeur et Intervenants (Jurevicius, 2013)

Il est évident que malgré le haut degré de pertinence de cet échantillon et ainsi de sa qualité inhérente, ce dernier connaît néanmoins certaines limitations. En effet, le temps limité alloué à la réalisation de ce mémoire a pour conséquence un échantillon qui aurait pu être d'une taille plus importante, malgré la haute qualité de celui rassemblé dans cette recherche. Il est évident que la saturation théorique telle que proposée par van Rijnsoever (2017) n'a pas pu être atteinte.

Enfin, afin d'avoir une analyse systémique encore plus complète, des acteurs de la chaîne de valeur tels que des fabricants de composants ou également des clients finaux, pour ne prendre que les deux extrêmes, auraient pu enrichir le contenu de la recherche. Le point de vue d'un philosophe aurait pu également apporter un enrichissement incontestable étant donné l'approche par impacts sociétaux.

3.1.3 Méthode d'analyse des données

Les entretiens avec les personnes citées dans la section précédente ont été réalisés presque exclusivement virtuellement via la plateforme Microsoft Teams ou Microsoft Skype, bien que Cédric Gelpi ait accepté de se rencontrer en face à face lors de notre deuxième discussion.

Les entretiens ont été enregistrés et réécoutés, puis résumés en format Word afin d'être utilisés lors de l'analyse du Circular Canvas. Une fois ce dernier complété pour les données d'une entreprise, il était renvoyé au répondant correspondant afin de confirmer l'exhaustivité, la véracité et la précision de ses informations. Après confirmation des personnes interviewées, les résultats ont été utilisés. Toutes les versions de ces Canvas individuels correspondant chacun à une entreprise sont disponibles en *Annexe R.*

Cette méthodologie rigoureuse décrite ci-dessus n'a dès lors pas nécessité la retranscription des interviews, notamment car les répondants ont confirmé la véracité, exhaustivité et précision des informations. Néanmoins, afin d'apporter la preuve de la véracité des informations, l'intégralité de tous les enregistrements audio des entretiens sont accessibles via une plateforme en ligne mentionnée en *Annexe S* (Gavard-Perret et al., 2008).

Enfin, grâce au cadre relativement strict du Circular Canvas, l'analyse des résultats n'a pas nécessité de processus de déstructuration et de restructuration comme proposé par Krief et Zardet (2013). A la place, le processus de *codage ouvert* comme proposé par Burnard et al. (2008) a permis de rassembler les résultats des interviews sous forme de tableaux synthétiques résumant les propos des entreprises correspondant à chaque thème du Circular Canvas. Étant donné la richesse des informations, une catégorie dans le tableau a été créée lorsqu'une caractéristique est partagée par deux entreprises ou plus. Les informations uniques spécifiques seront néanmoins explicitées en détail.

Il est nécessaire de prendre en considération que les questions financières (revenus et coûts) n'était pas de l'ordre de l'expertise de Micheline Perrufel de chez Orange. Le même raisonnement s'applique à la question des ressources pour Marc Vanveckhoven.

3.2 Circular Canvas

Dans ce chapitre, découvrons le détail des résultats des entretiens en reprenant chaque case du Circular Canvas l'une après l'autre. A la fin de chaque section, un résumé sera fait sous forme de tableau synthétique, comme cela a été mentionné plus haut. Les thèmes revenant de manière récurrente seront finalement rassemblés dans un *Méta Circular Canvas* disponible à la fin de ce chapitre. Il est important de noter qu'à partir de cette partie la nomenclature de *Li-Fi* va changer en *LiFi*. En effet, Micheline Perrufel de chez Orange précise que cette dernière est désormais l'appellation officielle de la technologie.

3.2.1 Mission

Bien que les entreprises aient des missions en apparence assez différentes, il est possible de les classifier. En effet, six des sept entreprises proposent des missions axées sur la connectivité.

- LiFi-LED : Transformer les points lumineux en point d'accès Internet.
- Signify : Développer le LiFi comme produit commercialement viable en répondant aux besoins de certains segments et en amenant la solution là où le Wi-Fi ou les câbles ne sont pas de bonnes solutions. En résumé, apporter une connectivité là où les technologies actuelles sont moins performantes voire inutilisables.

- Oledcomm : Apporter une alternative au Wi-Fi qui est écologique, meilleure pour la santé, à l'épreuve du temps, et qui offre des possibilités larges dans ses applications grâce à l'utilisation de LED.
- Sinilux : Apporter du haut débit et des énergies renouvelables pour les *smart cities* européennes mais aussi pour résoudre les problèmes énergétiques ainsi qu'une volonté de réduction de la facture d'électricité.
- Engie : Offrir du LiFi pour des raisons de connectivité, de santé, et de sécurité tout en bénéficiant d'une technologie qui s'inscrit dans la volonté interne d'aller vers le Zéro Carbone.
- Orange : Offrir aux entreprises une solution plus sécurisée, plus stable et plus performante. Offrir aux résidents de la sécurité et une réduction d'exposition aux ondes radio fréquences.

Malgré un intérêt similaire pour la connectivité, Velmenni axe sa mission sur l'amélioration de l'infrastructure mondiale d'Internet.

- Velmenni : Construire une infrastructure internet plus solide en aidant les plus grandes entreprises avec des technologies sans fil durables.

3.2.2 Activités clés

Mis à part LiFi-LED, toutes les entreprises de l'échantillon ont mis en avant l'aspect de recherche et développement. Sinilux, Engie et Orange ont tous les trois mis en avant des activités de support ainsi que de relations partenaires. En outre, l'analyse de données est une activité sur laquelle se focalisent Sinilux et Engie.

- **Recherche et développement**

Signify, Oledcomm et Orange expliquent qu'ils intègrent fortement dans leurs activités l'analyse des besoins des consommateurs. En effet, Signify parle d'un cycle de proposition de valeur qui commence par une analyse anthropologique des situations et des contextes dans lesquels la solution peut être mise en place. Oledcomm mentionne les retours d'expérience des clients en direct ou via des intégrateurs (cf. *3.2.3 Partenaires*). Des ergonomes testent le marché et reviennent avec des recommandations chez Orange.

Un des points extrêmement récurrents est le développement de « POC », soit des *Proof of Concept*, ou en français des démonstrations de faisabilité. Ces dernières sont réalisées sous forme de développement de produits chez Signify, Oledcomm, Velmenni et Sinilux. Des développeurs et ingénieurs s'occupent également de la recherche et du développement chez Orange.

De leur côté, Engie et Orange situent leurs activités davantage sur une phase de « test » dû à leur position d'intégrateur. C'est néanmoins également une activité que Signify intègre pleinement.

Velmenni est la seule des sept entreprises qui se focalise sur de la recherche fondamentale scientifique en tant que telle.

- **Fonction de support**

Les activités de ventes, de marketing et de communication sont apparues comme clés pour Sinilux et Engie. Orange souligne particulièrement la nécessité de la fonction de marketing.

- **Relations partenaires**

La prise en charge des relations avec les différents partenaires s'est révélé faire partie des compétences clés chez Sinilux et Engie. Orange défend une position centrale sur le marché leur permettant de réguler les échanges entre acteurs. Micheline Perrufel de chez Orange prône un rôle de régulateur entre les partenaires.

- **Analyse de données**

Engie et Sinilux proposent tous deux de traiter les données qui sont générées par l'utilisation de la technologie LiFi. Par exemple, Cédric Gelpi de chez Engie explique que l'on peut créer une carte de fréquentation des différentes salles d'exposition d'un musée afin d'adapter son offre et Alban N'Dri de chez Sinilux évoque différents capteurs connectés en LiFi qui rassembleraient des données environnementales qui peuvent être utilisées et revendues.

- **Autres activités clés…**
  - LiFi-LED fait part de ses trois activités principales que sont ses expertises technique, managériale et commerciale. Cependant, son besoin de ressources humaines est une des expertises manquantes. Sinilux partage également l'aspect de l'expertise technique[8].
  - Signify met l'accent sur la « co-création » avec ses partenaires comme activité clé.
  - Oledcomm considère les ventes directes et indirectes comme deux activités clés.
  - Engie évoque également ses activités d'installation de matériel et de développement d'applications mobiles.

	ACTIVITÉS CLÉS			
	R&D	Support	Relations partenaires	Analyse de données
LiFi-LED				
Signify	X			
Oledcomm	X			
Velmenni	X			
Sinilux	X	X	X	X
Engie	X	X	X	X
Orange	X	X	X	

Tableau 2: Activités clés

3.2.3 Partenaires

- **Fabricants de matériel informatique**

Signify, Velmenni et Sinilux travaillent tous les trois avec des entreprises qui leurs fournissent du matériel informatique de tout type. Plus précisément, ils se fournissent en *chipset*[9] que ça soit Signify avec MaxLinear, Velmenni chez Texas Instrument, par exemples, et divers autres fournisseurs pour Oledcomm et Orange. Les entreprises Signify et Velmenni travaillent avec le géant de la production d'appareils de réseaux Cisco.

- **Fabricants de matériel d'éclairage**

Velmenni, Engie et Orange ont construit des partenariats avec des entreprises du secteur de l'éclairage comme Baja Lighting, Deltrian ou Technilum afin de se fournir en lampes LED.

[8] Expertise technique non reprise dans le tableau pour manque de précision.
[9] Chipset = Circuit intégré = Driver LED (*3.2.5 Ressources Techniques*)

- **Fournisseurs d'accès à Internet**

LiFi-LED, Signify et Sinilux intègrent tous les trois des fournisseurs d'accès à internet comme TMobile ou Vodafone pour Signify ou encore Eutelsat pour LiFi-LED et Sinilux.

- **Les entreprises du LiFi**

Les deux intégrateurs de l'échantillon des sept entreprises, à savoir Engie et Orange, travaillent avec des entreprises ayant le LiFi au cœur de leur modèle d'affaires afin d'intégrer les solutions de ces dernières auprès de leurs clients. Engie mentionne par exemple Oledcomm, PureLiFi, Zero1 et Lucibel.

- **Partenaires de développement de startups**

Afin de favoriser, de stabiliser et d'accélérer leur développement, les entreprises Sinilux et Velmenni ont recours à des organismes offrant un support à des startups, respectivement la CleanTech et FrenchTech d'une part et d'autre part le programme d'accélération d'Airbus.

- **Partenaires publics**

Tout d'abord, Signify et Velmenni ont créé des partenariats avec des entreprises dans le secteur de la défense afin de promouvoir la co-création entre les différentes entités et de pouvoir toucher à des besoins clés de ce secteur en terme de sécurité notamment.

Ensuite, Sinilux de son côté travaille avec des organismes publics comme des Mairies, pour l'installation de la solution, ou encore l'Union Européenne, pour bénéficier de fonds publics.

Enfin, Velmenni travaille avec des instituts de recherche d'universités. Engie est également présent auprès des universités et désire créer davantage de relation à ce niveau-là.

- **Intégrateurs**

Signify et Oledcomm ont mentionné qu'ils travaillent en relation directe avec des intégrateurs. Signify les nomme les « intégrateurs systèmes » et de son côté Oledcomm les appelle les « intégrateurs IT ». Ces derniers sont par exemple ComputerLand et Systemat. Ces intégrateurs sont des partenaires de vente mais aussi des partenaires sur lesquels ces deux entreprises comptent afin de leur trouver des clients. De manière générale, un

intégrateur offre un produit ou un service grâce à une offre complète, aussi appelée « de bout en bout » par Cédric Gelpi.

- **Autres partenaires…**
  - LiFi-LED travaille avec Schneider afin de se fournir en panneaux solaires. Ils ont créé des partenariats avec la plateforme Dailymotion, pour l'hébergement de vidéos de formation, et Amada pour les batteries.
  - Oledcomm utilise également des prescripteurs afin d'avoir une intégration verticale de leur offre, comme par exemple l'O.N.E. pour l'intégration du LiFi dans les crèches. Ils perçoivent également Engie comme un partenaire marketing et non comme un intégrateur.
  - Velmenni travaille avec la plateforme Naukri qui lui permet une meilleure gestion de ses ressources humaines.
  - Sinilux profite de VivaTech afin de se construire un réseau plus important dans son domaine.
  - Le *LiFi Competence Center* d'Engie bénéficie de partenariats en interne avec le soutien d'Engie Solutions, anciennement trois entités du nom de Fabricom, Cofeli et Axima.

PARTENAIRES

	Fabricants Matériel Informatique	Fabricants Matériel d'éclairage	Fournisseurs accès Internet	"Entreprises du LiFi"	Partenaires de développement de "startup"	Partenaires publics	Intégrateurs
LiFi-LED			X				
Signify	X		X			X	X
Oledcomm	X						X
Velmenni	X	X			X	X	
Sinilux	X		X		X	X	
Engie		X		X		X	
Orange	X	X		X			

Tableau 3: Partenaires

3.2.4 Ressources naturelles

Dans leurs offres, LiFi-LED et Sinilux utilisent des solutions photovoltaïques afin d'alimenter leurs lampes. Cependant, Sinilux précise que ce n'est pas le cas dans toutes les situations.

Pour Signify, Velmenni, Engie et Orange, l'utilisation de ressources naturelles est selon eux non applicable à leur cas : la fabrication est externalisée chez Signify et Velmenni. De plus, ce dernier se concentre principalement sur de la recherche. Engie et Orange occupent des rôles d'intégrateur et non de fabricant. Néanmoins, Orange pose l'hypothèse de ressources métalliques pour la fabrication des LEDs, en amont de leurs activités.

	RESSOURCES NATURELLES	
	Non Applicable	Soleil
LiFi-LED		X
Signify	X	
Oledcomm		
Velmenni	X	
Sinilux		X
Engie	X	
Orange	X	

Tableau 4: Ressources naturelles

3.2.5 Ressources techniques

- **Composants électroniques**

Cinq intervenants sur sept disent utiliser des composants électroniques. Ces derniers sont exprimés de manière générique par Signify. Ces cinq entreprises mentionnent aussi des cartes électroniques (LiFi-LED), des chipsets (Signify, Velmenni, Orange) ou des cartes LiFi (Engie). Différents noms sont utilisés pour décrire le même composant responsable de la modulation de la lumière pour transmettre le signal, que l'on nomme *chipset* tout au long de ce mémoire.

- **Composants optiques et panneaux solaires**

Signify et Velmenni utilisent des composants optiques comme, par exemple, des lentilles de convergence qu'ils intègrent dans les *dongle* notamment. Afin de faire fonctionner leur offre, LiFi-LED et Sinilux ont besoin de panneaux solaires mais également de téléviseurs LED qu'ils installent dans leur borne LiFi, qui sera expliquée et illustrée dans la section *3.2.7* sur la proposition de valeur.

- **Éclairage LED**

Toutes les entreprises sauf Oledcomm, avec lequel le sujet n'a pas été abordé, utilisent des solutions d'éclairage LED comme ressource technique. Micheline Perrufel de chez Orange explique plus particulièrement que pour transmettre le signal, il faut utiliser des lampes

LED dites « normalisées », c'est-à-dire prévues pour recevoir un câble Ethernet transmettant le signal Internet.

Il convient de s'attarder sur cette information. Madame Perrufel explique que lors des premières années de développement du LiFi, certaines solutions pour transformer des lampes LED classiques du marché en lampes LED compatible LiFi étaient mise en place. Cependant, ce projet est gelé depuis maintenant quelques années.

Cédric Gelpi et Micheline Perrufel, de chez Engie et Orange respectivement, mentionnent qu'il existe deux écoles dans la mise en place et l'utilisation du LiFi actuellement. D'une part, la transmission du signal Internet par éclairage LED où l'intensité d'une lampe LED normalisée est modulé grâce au signal internet reçu par câble Ethernet, Power over Ethernet ou CPL. D'autre part, l'utilisation du spectre infrarouge est de plus en plus populaire, et est même devenue la solution la plus utilisée actuellement. Le LiFi pourrait dans ce cas se développer sans être lié à l'éclairage.

Cette deuxième option semble être la plus populaire actuellement selon Engie et Orange principalement, mais également Oledcomm, un leader du marché du LiFi, qui ne développe que de l'infrarouge. Même Signify, entreprise du secteur de l'éclairage, s'est résolue à proposer du LiFi par infrarouge afin de « ne pas avoir les mains liées » selon Karen Bamford.

- **Dongle / Stick USB**

Ces instruments, une fois branchés aux appareils avec lesquels on veut utiliser le LiFi, permettent de recevoir le signal lumineux de la LED et de le convertir en données et ainsi d'utiliser Internet. Cette technologie utilise un photodétecteur intégré pour fonctionner, comme expliqué par Karen Bamford et Cédric Gelpi. Étant donné le stade peu avancé de développement de la technologie, cet outil doit être ajouté à nos appareils. C'est ce qu'il s'est également passé avec la technologie du Wi-Fi il y a quelques années, bien que cette dernière soit désormais intégrée dans nos téléphones, ordinateurs et tablettes, expliquent Marc Vanveckhoven (Oledcomm) et Cédric Gelpi (Engie).

Signify, Oledcomm et Engie font mention de la nécessité d'usage de ce dongle. Oledcomm précise qu'ils prendront la décision de se tourner plutôt vers des « sticks USB » (comme le concurrent PureLiFi l'a fait en *Figure 12*) afin d'améliorer le confort d'utilisation ainsi que la portabilité.



Figure 12: Dongles LiFi (Oledcomm, 2018 ; Scace, 2017)

- **Câblage**

En tant qu'intégrateurs, Engie et Orange évoquent tous deux le fait de devoir installer du câblage supplémentaire afin de faire fonctionner les solutions LiFi. Engie mentionne la transmission du signal Internet par des câbles Ethernet ou par le PoE. De son côté, Orange fait mention des mêmes technologies susmentionnées et ajoute également une solution propriétaire améliorée de CPL appelée le GHN.

RESSOURCES TECHNIQUES

	Composants électroniques	Composants optiques	Panneaux solaires	Eclairage LED	Dongle / Stick USB	Cables	Téléviseur LED
LiFi-LED	X		X	X			X
Signify	X	X		X	X		
Oledcomm					X		
Velmenni	X	X		X			
Sinilux			X	X			X
Engie	X			X	X	X	
Orange	X			X		X	

Tableau 5: Ressources techniques

3.2.6 Ressources énergétiques

- **Électricité urbaine**

Alban de chez Sinilux mentionne que, malgré l'utilisation possible de photovoltaïque mentionnée plus tôt, la solution utilisera l'électricité urbaine principalement. Cette utilisation est relayée et partagée par Engie et Orange également.

- **Solaire**

De son côté, l'offre de LiFi-LED repose intégralement sur les panneaux solaires afin de fonctionner. Sa solution est dès lors 100% autonome. Velmenni et Orange évoquent la possibilité d'utiliser de l'énergie solaire à l'avenir, sans approfondir davantage.

- **Consommation faible en énergie**

Sur le thème énergétique, Signify et Velmenni défendent une utilisation faible d'énergie des solutions LiFi grâce à l'efficacité énergétique de la technologie LED.

	RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES		
	Electricité urbaine	Solaire	Consommation faible en énergie
LiFi-LED		X	
Signify			X
Oledcomm			
Velmenni		X	X
Sinilux	X		
Engie	X		
Orange	X	X	

Tableau 6: Ressources énergétiques

3.2.7 Proposition de valeur

La proposition de valeur est certainement le point ayant généré le plus d'informations différentes. De ce fait, les sept propositions de valeur différentes seront présentées de manière exhaustive afin de ne pas omettre de détails.

- **LiFi-LED**

Au cœur de la proposition de valeur de LiFi-LED se trouve le partage. En effet, Ange-Frederick Balma veut amener une transmission de l'information et de la connaissance, grâce à des formations, pour entre autres promouvoir l'autonomisation et l'éducation. Pour ce faire, son offre se concentre sur 2 pôles principaux.

D'une part, sa solution en extérieur se présente sous la forme de bornes placées à des endroits stratégiques dans des villages ruraux : à proximité de puits, du chef du village ou du dispensaire. Cette borne permet d'offrir de l'éclairage mais également une connectivité

Internet grâce à l'utilisation du LiFi. Celle-ci est également équipée d'un téléviseur afin de bénéficier de contenu sur un écran plus large (*Annexe T*).

D'autre part, sa solution intérieure consiste en un ensemble de quatre ampoules LED que LiFi-LED installe dans une maison et qui fournit également connectivité et lumière. Ces lampes offrent même une connectivité au-delà des murs grâce à une transmission du signal Internet via les technologies Bluetooth et infrason.[10]

Afin de bénéficier de ces offres, un système d'abonnement est mis en place, avec une base journalière, mensuelle ou annuelle. Les services de mise à jour et de maintenance sont fournis par LiFi-LED.

- **Signify**

Karen Bamford insiste sur le fait que l'équipe LiFi au sein de Signify est toujours en cours d'exploration de différents modèle d'affaires qu'il serait possible d'implémenter pour leur offre LiFi. Elle en évoque deux principaux.

D'une part, un modèle dit « CAPEX », pour *capital expenditure*, qui se concentrerait sur la vente de matériel à l'utilisateur final ou aux intégrateurs. D'autre part, ils envisagent un modèle dit « OPEX », pour *operational expenditure*, avec lequel Signify proposerait le LiFi sous forme d'offre de location ou de paiement par utilisation. Ceci implique que le client ne serait pas propriétaire des équipements LiFi dans le deuxième modèle.

Les caractéristiques clés de l'offre LiFi sont la stabilité, la sécurité et la rapidité. La solution LiFi de Signify se veut être complémentaire ou indépendante au Wi-Fi en fonction des endroits de déploiement.

- **Oledcomm**

Le mot d'ordre de la proposition de valeur d'Oledcomm est l'innovation : offrir une technologie pérenne qui se veut être respectueuse de l'environnement.

[10] Ces méthodes de diffusion du signal Internet ne seront pas approfondies dans ce mémoire.

L'offre d'Oledcomm se concentre en grande majorité sur du B2B. C'est-à-dire qu'ils vendent leur solution à des entreprises dites « intégratrices » qui vont elles-mêmes la revendre à des consommateurs finaux.

Actuellement, Oledcomm a développé un seul produit pour lequel ils ont utilisé l'appellation marketing LiFiMax (*Annexe U*). Ce dernier fonctionne en infrarouge et se veut être un « produit IT », pour reprendre les mots exacts de monsieur Vanveckhoven, et non pas un produit d'éclairage. L'utilisation du produit nécessite un dongle mais ils travaillent également sur un stick USB, comme mentionné plus tôt. En outre, les caractéristiques clés de l'offre LiFi sont la sécurité, la santé, la stabilité ainsi que la puissance.

- **Velmenni**

Velmenni veut offrir une avancée technologique qui permettra, d'une part, de construire une infrastructure de connectivité plus puissante et sécurisée pour les communications en ligne. D'autre part, cette avancée pourrait résoudre les problèmes du Wi-Fi et des ondes radio fréquences en général grâce au large spectre libre de droit de la lumière visible.

Bien que leader sur le marché, l'entreprise est principalement au stade de démonstration de faisabilité et, dès lors, ne commercialise pas encore de produits ou de services.

Deepak explique que sa solution LiFi fonctionne grâce à un câble Internet connecté à une lumière LED, une technologie efficace et respectueuse de l'environnement, qui module son signal. Ensuite, un photodétecteur reçoit le signal et le convertit afin de pouvoir utiliser Internet avec un appareil connecté.

Son offre se concentre sur une connectivité sans interruption, un débit de données élevé ainsi qu'une sécurité des données transférées.

- **Sinilux**

Alban N'Dri mentionne que Sinilux a deux types d'offre. D'une part, l'entreprise propose des services identiques à son entreprise-mère LiFi-LED. D'autre part, Sinilux veut se concentrer sur la création d'une expérience de *smart city* grâce à des capteurs

environnementaux pouvant faire remonter des données en temps réel à des institutions, organismes, ou personnes qui en auraient l'utilité. Leur volonté est également de proposer un Internet haut débit tout en résolvant les problèmes des zones de France dans lesquelles la connectivité est médiocre. Ces dernières sont appelées « zones blanches et zones grises ». Enfin, la sécurité du réseau est également une préoccupation majeure dans l'offre de Sinilux.

- **Engie**

Cédric Gelpi décrit la proposition de valeur d'Engie comme la possibilité d'apporter une solution de bout en bout, comme un intégrateur le fait, grâce aux solutions LiFi. Ces offres prennent différents formats en fonction des clients finaux. Ces derniers sont de trois types.

Premièrement, Engie veut offrir une connectivité stable, homogène et rapide dans les écoles. Dans l'éducation, il faut utiliser un dongle, bien qu'ils travaillent avec les partenaires pour avoir un dongle sous forme de clé USB qui permettrait sécurité par empreinte digitale, stockage de données et connectivité Internet. Au plafond, il est nécessaire d'installer des panneaux LiFi : un ensemble composé de lampes LED classiques et d'un module LiFi infrarouge.

Deuxièmement, le LiFi est installé dans des espaces de co-working grâce à un point d'accès LiFi infrarouge, identique à celui intégré dans les panneaux LiFi susmentionnés, ainsi que grâce à l'utilisation d'un dongle pour recevoir le signal. Dans ce cadre, le LiFi est une solution qui offre sécurité et stabilité.

Troisièmement, le LiFi vient se positionner de manière similaire dans les maisons de repos mais avec une volonté de positionner ces point d'accès à des endroits stratégiques du bâtiment afin d'encoder des données spécifiques personnelles sur les résidents (prises de médicaments, etc.).

- **Orange**

La proposition de valeur d'Orange couvre différentes technologies de communications optiques, dont le LiFi. Selon Micheline Perrufel, le LiFi est une technologie

complémentaire au Wi-Fi qui offre essentiellement du très haut débit et une sécurité accrue.

En gardant l'offre du LiFi en tête, ils veulent offrir une plateforme de management unique de tous ces produits, services et appareils connectés du marché afin d'offrir centralisation et interopérabilité . Elle donne l'exemple d'intégrer les services Wi-Fi de chez Cisco et les services Li-Fi de chez Signify.

Néanmoins, le cœur de métier d'Orange sont les réseaux WAN, c'est-à-dire un accès de connectivité, qui soit stable et sécurisé. Ce service est agrémenté par l'offre de service d'une plateforme centralisée. Ils intègrent le LiFi aux côtés de leurs différentes offres, sans jouer le rôle de fabricant ou de créateur.

Pour résumé, voici une vue générale des propositions de valeur, et de ses caractéristiques clés:

	PROPOSITION DE VALEUR					PROPOSITION DE VALEUR Caractéristiques clés			
	Vente (in)directe	Location	Solution hybride ou complémentaire	Utilisation d'un dongle	Résoudre des problèmes d'infrastructure	Sécurité	Stabilité	Rapidité, haut débit	Santé
LiFi-LED		X			X				
Signify	X	X	X	X		X	X	X	
Oledcomm	X		X	X		X	X		X
Velmenni				X	X	X	X	X	
Sinilux				X	X	X		X	
Engie			X	X		X	X	X	X
Orange			X	X		X		X	

Tableau 7: Proposition de valeur

3.2.8 Utilisateurs et contextes

- **Grand public & Smart cities**

Bien qu'ils ne proposent pas encore d'offre dans le secteur, une volonté future de Signify est d'offrir du LiFi aux privés du secteur résidentiel. De son côté, Sinilux évoque sa solution comme intégralement destinée au grand public avec une volonté de développer les *Smart Cities*. Cet objectif de long terme est également partagé par Orange.

LiFi-LED dédie à peu près 80% de son offre au grand public avec l'autonomisation des femmes, la formation des jeunes dans les zones rurales ainsi que des applications de la vie de tous les jours.

Orange et Oledcomm sont d'avis que le résidentiel ne peut pas être un segment viable actuellement car le manque d'un standard IEEE de télécommunication LiFi empêche l'intégration de photorécepteurs dans nos appareils électroniques connectés. En effet, sans ce standard officiel, l'interopérabilité entre les différents composants d'un système LiFi provenant de différents fabricants n'est pas possible. Ainsi, la réduction des coûts est actuellement rendue difficile et les solutions actuelles manquent d'ergonomie. Ce point sera davantage développé dans l'analyse.

- **Segment des professionnels**

Signify, Velmenni et Engie concentrent leurs efforts sur le secteur des entreprises et des espaces de collaboration en intérieur, aussi appelé espaces de *co-working* pour reprendre le mots exacts de Cédric Gelpi, afin d'améliorer la sécurité ainsi que les débits selon Deepak Solanki de Velmenni. Marc Vanveckhoven explique qu'Oledcomm veut aussi apporter sa solution aux professions libérales, comme à un cabinet d'avocats par exemple, à des fins de sécurité.

- **Industrie & Agriculture**

Sans ajouter plus de détails, Signify et Velmenni mentionnent respectivement vouloir offrir de la connectivité sans fil à des acteurs industriels.

Un des segments d'utilisateurs principaux de la solution de LiFi-LED est celui des agriculteurs qui bénéficient des connaissances partagées sur Internet.

- **Éducation**

Comme expliqué plus haut, l'éducation est un des piliers de l'offre de LiFi-LED. De plus, Oledcomm travaille avec l'intégrateur Engie afin d'équiper des écoles de solution LiFi qui amène plus de facilité que des solutions câblées ainsi qu'une solution meilleure pour la santé que des solutions fonctionnant par ondes radio fréquences selon Marc Vanveckhoven d'Oledcomm. Cédric Gelpi ajoute que la connectivité sera également meilleure, plus stable et pourra proposer des expériences de smart class.

- **Problèmes d'interférences**

Les contextes dans lesquels le LiFi possède une grande légitimité sont les endroits où le trafic en connectivité est important et pose des problèmes en raison des interférences d'ondes radiofréquences selon Velmenni et Engie. C'est notamment le cas des hôpitaux comme le mentionnent Micheline Perrufel de chez Orange et Marc Vanveckhoven de l'entreprise Oledcomm.

- **Autres…**

Karen Bamford de chez Signify expose que chacun des segments d'intérêt recherche une ou plusieurs des trois caractéristiques clés du LiFi de Signify : la stabilité, la sécurité ou la vitesse. Un discours similaire est tenu par Oledcomm avec, en résumé, l'enseignement pour les avantages sur la santé, le secteur de la santé avec les problèmes d'interférences résolus, et les professions libérales qui bénéficieront d'une plus grande sécurité.

Velmenni se concentre sur les contextes mondiaux de connectivité médiocre et mentionne le fait qu'il n'est parfois pas possible de creuser les routes afin d'installer du câblage nécessaire. D'où sa solution LiFi qui permettrait d'offrir une connectivité équivalente en installant des modules interconnectés entre bâtiments jouant le rôle de la fibre optique.

Engie se concentre également sur les maisons de repos où l'attrait pour la santé est également important.

	UTILISATEURS & CONTEXTES					
	Segment grand public	Smart cities	Segment des professionnels	Industrie & Agriculture	Education	Problèmes d'interférences
LiFi-LED	X			X	X	
Signify	X		X	X		
Oledcomm			X		X	X
Velmenni			X	X		X
Sinilux	X	X				
Engie			X		X	X
Orange		X				X

Tableau 8: Utilisateurs et contextes

3.2.9 Usage suivant

- **Applications actuelles**

Ange-Frédérick Balma et Alban N'Dri, de chez LiFi-LED et Sinilux respectivement, insistent sur le fait que leurs équipements suivent un procédé précis et que ces derniers sont recyclables, réutilisables, réparables ou transformables. Bien que cette question n'ait pu être approfondie avec LiFi-LED, Alban N'Dri précise que les ampoules et les panneaux solaires peuvent être réparées ou encore que l'on peut réutiliser l'équipement satellite. Il mentionne explicitement : « *Notre solution est verte et ne laisse aucune emprunte environnementale peu importe où nous la déployons.* ».

De leurs côtés, Engie procède déjà à des maintenances régulières et Orange est particulièrement attentif au label *récyclum* permettant de juger de la « qualité environnementale » des lampes LED.

De plus, Orange mentionne que la priorisation de projets en interne se fait grâce à une évaluation des impacts environnementaux et sociétaux, appelée grille KOBA. Si le « score RSE » du LiFi à l'issue de cette évaluation est bon, le projet aura donc priorité face à d'autres projets en interne. On peut y retrouver que « *les matériaux mis en œuvre sont recyclables […]. Les formes du produit minimisent l'impact environnemental associé à la production.* ».

- **Projets futurs**

Karen Bamford de chez Signify évoque le fait que ces questions d'usages suivants n'ont pas encore été discutés en interne mais qu'ils prévoiraient de créer des luminaires entièrement recyclables grâce à de l'impression 3D et qu'ils examineraient d'autres problématiques d'usages suivants lorsqu'ils atteindront une taille critique grâce à l'étape de *scale-up*.

Marc Vanveckhoven (Oledcomm) mentionne le fait que lorsqu'un produit arrive en fin de vie, l'objectif sera d'aller le récupérer et non de le laisser « traîner dans la nature », afin de penser à des réutilisations. De plus, Oledcomm envisage de mettre en route un programme de récompense des utilisateurs afin d'atteindre le zéro déchet. Marc insiste beaucoup sur la volonté d'Oledcomm de continuer sur la lignée d'un produit respectueux

de l'environnement en intégrant un mode de pensée similaire sur toutes les activités de l'entreprise.

Deepak Solanki de chez Velmenni insiste sur le fait qu'ils travaillent pour faire en sorte que les produits utilisés soient recyclables en utilisant par exemple moins de plastique et plus de métal.

- **Suivi de procédures internes**

Pour continuer sur les objectifs de Signify, Karen Bamford émet l'hypothèse de l'alignement sur la politique de Signify de ne plus inclure de plastique dans les emballages à l'horizon 2021.

Engie, de son côté, sous-traite le recyclage à une autre entité en interne et mentionne son objectif d'aller vers la transition zéro carbone.

Enfin, Orange a recours également à de la sous-traitance en faisant appel à des partenaires externe pour de la *refabrication* et supporte également une politique de retour d'anciens appareils électroniques désuets.

	USAGE SUIVANT		
	Applications actuelles	Projets Futurs	Suivi de proécdures internes
LiFi-LED	X		
Signify		X	X
Oledcomm		X	
Velmenni		X	
Sinilux	X		
Engie	X		X
Orange	X		X

Tableau 9: Usage suivant

3.2.10 Distribution

- **Évènements**

Signify, Velmenni, Sinilux et Engie utilisent leur présence dans des salons, conférences, conventions et congrès afin de faire connaître leurs offres.

- **Réseau de partenaires**

Alors que Signify et Oledcomm utilisent un réseau d'intégrateurs, LiFi-LED utilisent eux un réseau de vendeurs et revendeurs. Sinilux et Oledcomm mettent l'accent sur l'importance de ces partenaires afin de faire connaître leurs offres. Oledcomm insiste notamment sur une relation client indirecte mise en place à travers les intégrateurs.

- **Réseaux sociaux**

L'utilisation des réseaux sociaux pour faire la publicité de leurs offres est une activité commune chez Oledcomm, Velmenni et Engie.

- **Structure interne**

Engie et Orange comptent sur une structure interne bien en place pour profiter, tous les deux, de responsables commerciaux mais également de possibilité d'*upselling* pour Cédric Gelpi et de profiter d'une présence dans le catalogue Orange pour Micheline Perrufel. De son côté Signify entend profiter d'une forte présence locale dans une multitude de pays.

	DISTRIBUTION			
	Evènements	Réseau de partenaires	Réseaux sociaux	Structure interne
LiFi-LED		X		
Signify	X	X		X
Oledcomm		X	X	
Velmenni	X		X	
Sinilux	X	X		
Engie	X		X	X
Orange				X

Tableau 10: Distribution

3.2.11 Revenus et coûts

- **Revenus**

D'une part, comme nous l'avons vu, LiFi-LED et Sinilux proposent des solutions OPEX avec leurs systèmes d'abonnement et Signify pense à une facturation par location ou par utilisation. D'autre part, le modèle CAPEX avec de la vente en direct ou en indirect est utilisé par Sinilux, pour son infrastructure, et par Oledcomm, avec ses POC. Ce modèle est aussi envisagé par Signify et Velmenni. Toutes les données générées par les systèmes LiFi pourraient être destinées à la revente par LiFi-LED, Sinilux et Engie.

- **Coûts**

Les coûts des ressources humaines sont encourus sans équivoque par tous les acteurs interrogés. Ensuite, nous avons également la recherche et développement qu'endosse Signify, Oledcomm, Velmenni et Engie. Les composants et matériaux sont également un poste principal de coût pour Signify, Velmenni, Sinilux et Engie. De plus, des dépenses d'infrastructure et de laboratoires sont encourus par LiFi-LED, Velmenni et Sinilux. Enfin, les coûts de logistique, marketing et d'autres coûts divers de support sont relevés par quatre acteurs : LiFi-LED, Signify, Oledcomm et Sinilux.

	REVENUS				COÛTS				
	OPEX	CAPEX	Revente de données	Publicité	Ressources humaines	Recherche et développement	Composants et matériaux	Capital	Support
LiFi-LED	X		X	X	X			X	X
Signify	X	X			X	X	X		X
Oledcomm		X			X	X			X
Velmenni		X			X	X	X	X	
Sinilux	X	X	X	X	X		X	X	X
Engie			X		X	X	X		
Orange									

Tableau 11: Revenus et Coûts

3.2.12 Impacts positifs

Dans cette section, les informations brutes recueillies ont été classées dans quatre catégories afin d'apporter une meilleure clarté.

- **Technologie**

D'un point de vue de la technologie, six intervenants sur les sept prônent une meilleure connectivité grâce au LiFi : que ça soit par sa vitesse (Signify, Sinilux, Orange), par une amélioration de la sécurité (Signify et Engie), grâce à des implantations possibles là où la fibre optique n'est pas une option (Velmenni) ou encore dans des environnements sensibles (Signify).

Mis à part Oledcomm et Sinilux, les cinq autres acteurs défendent une évolution de la technologie grâce à leurs recherches.

- **Société**

Grâce à l'implémentation des smart class (Oledcomm et Engie) ou par la possibilité de s'éclairer et de bénéficier d'une connectivité en zone rurale (LiFi-LED), le LiFi serait une technologie bénéfique pour l'éducation.

Le LiFi offrirait la possibilité d'apporter Internet dans des zones rurales dans les pays en voie de développement (LiFi-LED) ou dans les zones reculées des pays développés (Sinilux) et ainsi de ne pas être réservé à certaines zones ou pays.

La gestion intelligente rendue possible grâce aux LEDs permet de développer des maisons intelligentes et de répondre à des demandes spécifiques du public, comme par exemple la température de la lumière ou son intensité (LiFi-LED, Sinilux, Engie). Il est possible également de restreindre certaines zones d'une maison grâce à des applications mobiles de *smart home* et ainsi d'éduquer de plus jeunes générations au digital (Oledcomm, Orange).

- **Environnement**

Six sur les sept acteurs plaident pour l'efficacité énergétique de cette solution technologique grâce notamment à l'utilisation de LEDs. Velmenni se concentre néanmoins sur une possibilité d'équiper le LiFi dans les avions et ainsi de réduire l'utilisation de câbles et donc de kérosène grâce à l'allègement conséquent de l'avion.

- **Santé**

L'utilisation de la lumière visible au lieu d'ondes radiofréquence est quasiment unanimement défendue comme étant bénéfique pour la santé.

	IMPACTS POSITIFS						
	Technologie		Société			Envir.	Santé
	Meilleure connectivité	Evolution de la technologie (R&D)	Education d'aujourd'hui et demain	Internet pour tout le monde	Gestion intelligente	Efficacité énergétique	Aspect sanitaire
LiFi-LED		X	X	X	X	X	
Signify	X	X				X	
Oledcomm	X		X		X	X	X
Velmenni	X	X					X
Sinilux	X			X	X	X	X
Engie	X	X	X	X	X	X	X
Orange	X	X			X	X	X

Tableau 12: Impacts positifs

3.2.13 Impacts négatifs

De la même façon et pour la même raison que pour les impacts positifs, la classification suivante a été réalisée pour les impacts négatifs.

- **Technologie**

La technologie étant nouvelle, voire à ses « balbutiements » pour reprendre l'expression exacte d'Oledcomm, un certain nombre de points négatifs sont relevés par les intervenants. En effet, cinq acteurs déplorent son coût élevé. Cela serait dû au manque de standard mondial qui, selon Velmenni et Orange, empêche l'intégration de la technologie dans les appareils connectés actuels et ainsi oblige l'utilisation d'un dongle (Signify, Oledcomm, Engie).

- **Société**

Oledcomm et LiFi-LED mettent en perspective les avantages de cette technologie en évoquant respectivement, d'une part, que l'on expose des peuples nouveaux à Internet et à des contenus potentiellement superflus et, d'autre part, en évoquant la question de l'utilité intrinsèque de cette connectivité abondante.

- **Environnement**

Quatre entreprises, précisément LiFi-LED, Orange, Signify et Engie, relèvent la question des déchets électroniques de cette nouvelle technologie et la difficulté que posent le recyclage ou la réparation de composants électroniques. En particulier, Signify met le doigt sur ce dongle qu'il faut produire additionnellement. Ce dernier est vu comme éphémère et ainsi comme futur déchet par Oledcomm. Enfin, l'installation du LiFi nécessite souvent des câbles supplémentaires qui ont également un impact environnemental selon Oledcomm et Engie.

	IMPACTS NEGATIFS					
	Technologie		Société	Environnement		
	Coût élevé	Limitation technologique	Exposition & excès	Déchets et recyclage	Dongle	Câblage
LiFi-LED	X		X	X		
Signify	X	X		X	X	
Oledcomm	X	X	X		X	X
Velmenni		X				
Sinilux	X					
Engie	X	X		X		X
Orange		X		X		

Tableau 13: Impacts négatifs

3.2.14 Résumé : Méta Circular Canvas

Afin d'offrir une vision générale sur les résultats des interviews décrits dans les sections précédentes, la *Figure 13* illustre un *méta Circular Canvas* reprenant les points saillants

partagés par les intervenants. Bien que ce dernier aborde des éléments allant au-delà des hypothèses initialement proposées, il advient tout de même de faire le point sur ces dernières. Dans cette optique, l'*Annexe V* propose le Canvas des hypothèses ayant été confirmées ou infirmées.

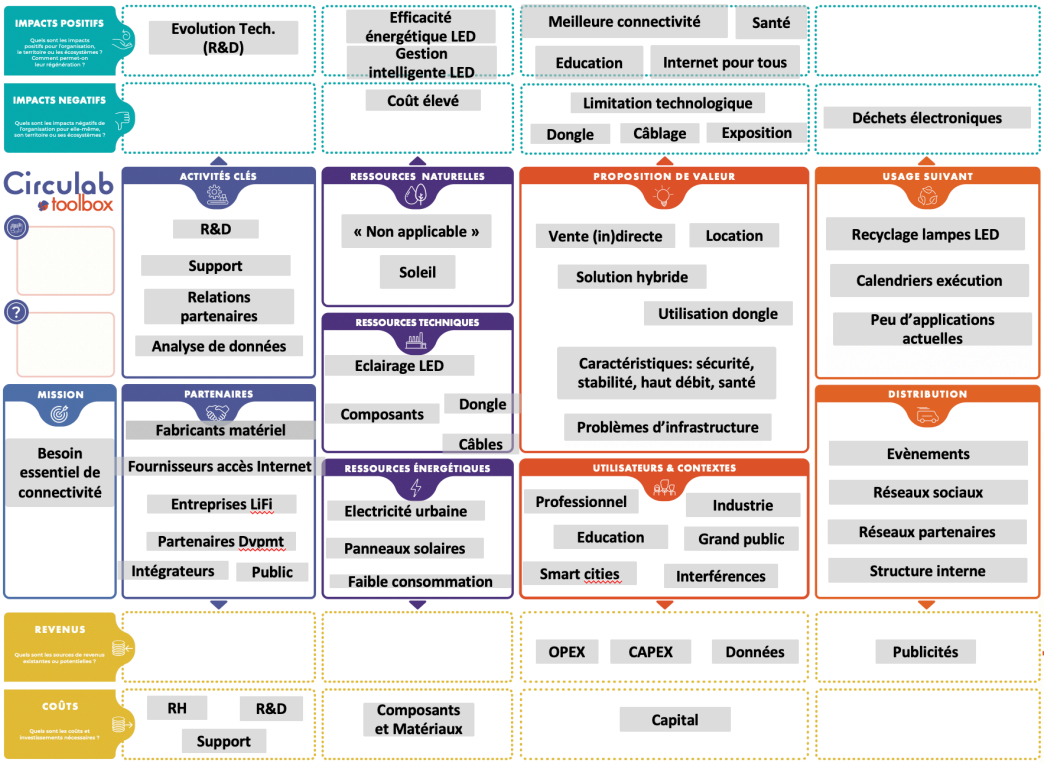


Figure 13: Méta Circular Canvas

3.3 Analyse

3.3.1 Analyse générale

Nous venons de voir que chaque entretien avec les entreprises ayant répondu favorablement à ma demande d'interview a été extrêmement enrichissant afin de pouvoir mener à bien cette recherche qualitative. Cette section va nous permettre d'analyser les éléments centraux ressortant de la confrontation des résultats qualitatifs avec la revue de la littérature.

Premièrement, d'un point de vue technologique, il apparaît d'après les résultats qualitatifs obtenus que la méthode principale utilisée actuellement pour la transmission du signal internet en LiFi est l'infrarouge, et non pas la lumière visible. C'est un résultat étonnant pour deux raisons. D'une part, nous pouvons remarquer que les entreprises insistent sur

les technologies d'éclairage LED dans la partie des ressources techniques. D'autre part, la théorie décrit le LiFi comme une solution utilisant la lumière visible, catégorisée comme étant une technologie Visible Light Communication (VLC), et non pas comme une technologie infrarouge (IR) comme le montre Perwej (2017) en *Figure 4*. Cela montre que l'association du LiFi avec la lumière pousse les entreprises à proposer des solutions combinées, comme par exemple Engie proposant un panneau d'éclairage LED simple équipé d'un module LiFi infrarouge de chez Oledcomm. Il est important de noter que ce module LiFi est également proposé de manière indépendante lorsque les éclairages existants sont déjà de qualité suffisante. Ce genre de solution, malgré une mention pour l'infrarouge dans la définition officielle du LiFi par Haas (2018), n'étaient pas envisagées initialement car l'infrarouge était prévu pour la liaison montante uniquement.

Par ailleurs, malgré un flou théorique et empirique sur la question, Orange nous éclaire sur le fait que la transformation de lampes dites « non normalisées »[11] en lampes compatibles LiFi a été exploré aux débuts du développement de la technologie mais est désormais un projet gelé. Ni les experts du secteur, ni les scientifiques ne semblent avoir la réponse sur la direction future de cette initiative. Il faut donc aujourd'hui compter sur des lampes normalisées ou des modules infrarouges pour bénéficier d'une connectivité en LiFi.

Ceci étant dit, il est évident que les technologies précises d'éclairage LED mentionnées dans la théorie n'ont pas été abordées car elles ne sont actuellement plus le moyen de transmission préféré. Cependant, il apparaît que pour des solutions de smart cities et des solutions de zones rurales, la lumière est quand même utilisée pour transmettre le signal, comme c'est le cas pour Sinilux et LiFi-LED. Il apparaît également que la vision idéale et futuriste du LiFi consisterait en des villes, bâtiments et habitations dans lesquels les lumières seraient les seuls émetteurs d'Internet. Nous aurions alors affaire à une société « super-connectée par la lumière », avec notamment un IoT fortement développé. Ce projet est également la ligne de conduite générale de la littérature scientifique sur le sujet concernant les développements futurs.

[11] L'équivalent théorique de "non compatible LiFi"

Le dernier point technologique concerne le fait que la littérature et les applications actuelles prévoient l'utilisation d'un dongle afin de bénéficier de la connectivité par la lumière. Le flou théorique sur la raison sous-jacente a été éclairci par les entretiens avec Orange et Velmenni. En effet, la technologie du LiFi étant très récente, un standard de télécommunication provenant de l'organisme IEEE[12] n'a pas encore été mis en place. Ce type de standard permet par exemple à des fabricants à travers le monde de produire des composants de leurs côtés sans devoir se préoccuper de problèmes de compatibilité. Le respect des règles du standard IEEE Wi-Fi, par exemple, permet à leurs appareils de fonctionner ensemble. De son côté, le LiFi ne possède actuellement pas de standard IEEE. Par conséquent, chaque équipement produit est dit *propriétaire* et n'est donc pas compatible avec des équipements de différents fabricants. Pour illustrer cela, il n'est donc pas possible d'utiliser une lampe LiFi Signify et un dongle Oledcomm par exemple. Le paysage est néanmoins appelé à changer lorsque le standard IEEE LiFi *802.11.bb* sera lancé à l'horizon 2021, comme précisé lors des entretiens (IEEE, 2018).

Concernant le paysage économique, la revue de la littérature identifie principalement des acteurs qui ont intégré le LiFi dans leur offre, comme c'est le cas de Signify par exemple, mais aussi et surtout des startups, comme Velmenni et Oledcomm. Il semble que bien que ces dernières soient importantes pour la mise en place du LiFi, certains acteurs principaux du secteur sont rarement mentionnés dans la littérature. Orange nous oriente vers la *Light Communications Alliance* dont elle fait partie. Cette dernière est un organisme responsable de la définition des concepts de communication par la lumière et est composée de différentes entités comme c'est le cas d'Orange et Oledcomm. La LCA identifie un écosystème du LiFi beaucoup plus large que celui identifié dans la revue de la littérature, comme le montre la *Figure 14* ci-dessous. On y trouve notamment les intégrateurs, comme Engie, Orange et Systemat, les organismes de recherche et les fournisseurs de chipset par exemple.

[12] L'IEEE est un développeur de normes internationales dans les domaines des télécommunications et des technologies de l'information (IEEE, 2020).

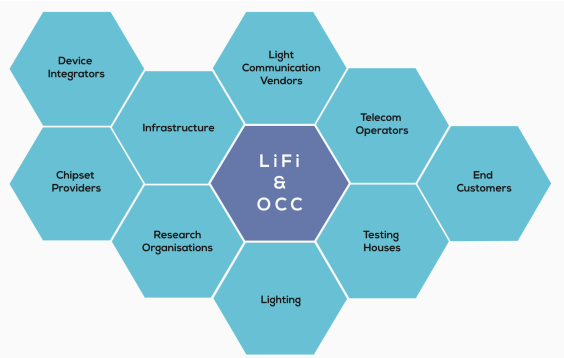


Figure 14: Écosystème LiFi (LCA, s.d.)

En ce qui concerne les modèles d'affaires, il semble que les entreprises prennent des directions diverses et variées avec des missions qui varient mais surtout des propositions de valeur qui ont tendance à se différencier fortement. La revue de la littérature n'est pas extrêmement fournie sur le sujet mais anticipe généralement une proposition de valeur se focalisant sur un fonctionnement de base avec un point d'accès (lampe LED) accompagné d'un photodétecteur. Cependant, les entretiens qualitatifs nous permettent d'aller beaucoup plus loin. Il apparaît que certaines entreprises entrevoient, ou ont déjà mis en place, un modèle de location. Ce dernier paraît intéressant et pourrait constituer un changement de paradigme futur dans la consommation d'éclairage et d'Internet par la lumière, qui n'est malheureusement pas abordé dans la littérature. L'hypothèse de vente d'équipements LiFi « classique » provenant de la littérature a été confirmé par les entretiens mais ces derniers ont permis de découvrir deux choses principales concernant la proposition de valeur. D'une part, bien que les acteurs du LiFi s'adonnent en effet à une activité de vente, celle-ci apparaît bien souvent se faire de manière indirecte via des intégrateurs. D'autre part, un modèle qui ne concerne que la vente de chipset LiFi a été révélé par l'entreprise Velmenni, qui n'agirait donc pas comme un acteur normal mais plutôt comme un fournisseur d'équipement. Cette dernière entrevoit aussi la possibilité d'un modèle d'affaire se concentrant sur la vente de propriété intellectuelle à des grands acteurs du secteur de la fabrication de composants électroniques.

Ces éléments économiques et d'affaires nous permettent de constater que les entretiens ont englobé une partie plus large de la chaîne de valeur que ce qui était voulu initialement lors de la composition de l'échantillon. En effet, nous remarquons par exemple le rôle de recherche et de producteur de Velmenni ou encore le rôle d'entreprise d'éclairage de Signify. Ceci nous a permis de bénéficier d'une vision systémique encore plus riche

qu'anticipée initialement. Nous arrivons à cette observation grâce au schéma de l'écosystème de la *Figure 14* mais aussi grâce aux multiples propositions de valeur des entreprises interrogées. En outre, la position de l'entreprise interviewée sur le graphe de l'écosystème déterminera également les partenaires, qui seront, eux, positionnés sur les autres cases du schéma non occupées par l'entité étudiée. Par exemple, Velmenni en tant que producteur de chipset travaille avec les entreprises d'infrastructure, les fabricants d'éclairage et les instituts de recherche afin de pouvoir développer une offre complète.

En ce qui concerne les caractéristiques clés, il semble que les avantages ciblés dans la littérature et les diverses offres des entreprises recouvrent principalement les mêmes éléments : une connectivité plus stable, plus rapide, plus sûre et plus saine, ou encore une utilisation d'un large spectre libre de droit. La case du Circular Canvas traitant des *utilisateurs et contextes* telle que remplie par les sept entretiens qualitatifs aborde également les éléments centraux de la section 2.5.5 de la littérature sur les applications du LiFi en se focalisant sur l'éducation, l'industrie, les *smart cities* et autres. Par ailleurs, le développement de l'offre résidentielle est mentionnée à fréquences égales dans les parties théorique et empirique, pour des raisons de manque d'un standard IEEE de télécommunication mentionné plus tôt. Cependant, d'autres parties plus techniques, comme par exemple l'exploration sous-marine ou les centrales nucléaires, n'ont pas été abordées de manière empirique malgré le fait que ces dernières semblent être un élément central des applications théoriques du LiFi.

D'un point de vue environnemental, il semblerait que les résultats empiriques pencheraient davantage vers un effet rebond léger voire inexistant, ce qui s'aligne avec les résultats théoriques de Schleich, Mills et Dütschke (2014). En effet, la gestion intelligente de LED grâce à des applications mobiles permettant de suivre la consommation, d'actionner ou éteindre les lampes à distance permettraient de ne pas consommer davantage d'énergie. En outre, il est également possible d'actionner les lampes uniquement lors de l'arrivée d'un utilisateur, comme le propose Engie. De plus, comme nous l'avons vu plus tôt, l'utilisation de la technologie infrarouge rend la consommation d'Internet totalement indépendante de la consommation lumineuse. Comme le mentionne l'entreprise de solution d'éclairage Signify, le marché du LiFi actuel préfère ne pas « avoir les mains liées » en proposant des lampes LED LiFi. Il semblerait

dès lors que l'effet rebond devra être analysé plus en profondeur lorsque la technologie sera implémentée telle que décrite dans la société super-connectée. En d'autres mots, les technologies LiFi infrarouge étant plus populaires, l'association avec la lumière n'est plus autant présente et l'effet rebond de l'utilisation de l'éclairage LED n'apparaît plus comme un sujet d'étude pertinent, pour le moment.

Par ailleurs, les entretiens ont confirmé les faibles attraits environnementaux du développement de la technologie. En effet, la communauté scientifique et les entreprises semblent vendre la technologie comme étant respectueuse de l'environnement grâce à la faible consommation des lampes LED principalement. Cependant, rares sont les considérations données aux développements selon des principes durables ou circulaires comme le démontre la case des *Usages Suivants*. En effet, ces derniers sont assez pauvrement explicités, manquent souvent de détails ou bien consistent en une liste de projets futurs ou de projets supportés par des politiques RSE des entreprises mères. Par ailleurs, ces dernières ont probablement comme objectif de redorer l'image des entreprises ou encore de respecter des règles gouvernementales, comme le mentionne spécifiquement Micheline Perrufel par exemple. Pourtant, la théorie proposait des utilisations de panneaux solaires mais seule LiFi-LED l'utilise réellement dans son offre (bien qu'à des fins purement énergétiques). Cependant, aucune entreprise n'anticipe de pouvoir coupler le photovoltaïque et la réception d'information en intégrant des cellules solaires dans un photodétecteur.

D'un point de vue social, nous pouvons voir que malgré une vision de développement intéressante proposée par Pauli (2018), le stade de développement actuel de la technologie n'est pas près d'atteindre cette vision. Cependant, des initiatives sont mises en place comme c'est le cas de l'entreprise LiFi-LED qui porte le partage ainsi que les aspects d'éducation et de formation des sociétés rurales de pays en voie de développement au cœur même de son offre. Cependant, comme nous l'avons vu sur la *Figure 9* des taux de croissance du marché du Li-Fi, les pays en voie de développement ne sont pas ceux qui anticipent une croissance importante pour la technologie dans ces quatre prochaines années. L'échantillon des entretiens prouve bien que la possibilité de « combler le fossé socio-économique » n'est pas dans l'agenda du développement actuel et ne fera l'objet uniquement d'initiatives personnelles d'entrepreneurs isolés. Dès lors,

nous pouvons actuellement appréhender la vision de Gunter Pauli comme un objectif de très long terme.

Enfin, en ce qui concerne les impacts sanitaires, nous remarquons qu'il s'agit là d'une préoccupation omniprésente tant en termes théoriques qu'en termes de développement du modèle d'affaire et de cette offre nouvelle de connectivité. Il semblerait que cela soit un des arguments majeurs d'implémentation de la technologie et qu'elle pourrait bénéficier des cadres légaux, comme la loi abeille par exemple, afin de s'implémenter.

Les considérations ci-dessus prises en compte, une carte de segmentation stratégique de l'échantillon des acteurs du LiFi interviewés dans le cadre de ce mémoire a été réalisée et est présente en *Figure 15*. Cela permettra au lecteur de se faire une idée précise de l'état actuel du marché. Cette carte est construite sur base d'un axe reprenant le *stade de développement d'affaires* et un axe représentant *la portée sociétale*, s'attachant ainsi précisément à la question de recherche de ce mémoire. Étant donné les rôles d'intégrateurs que jouent Engie et Orange sur le marché du LiFi, il est pertinent de ne pas les inclure et de ne garder que les entreprises qui sont au niveau du développement de la solution.

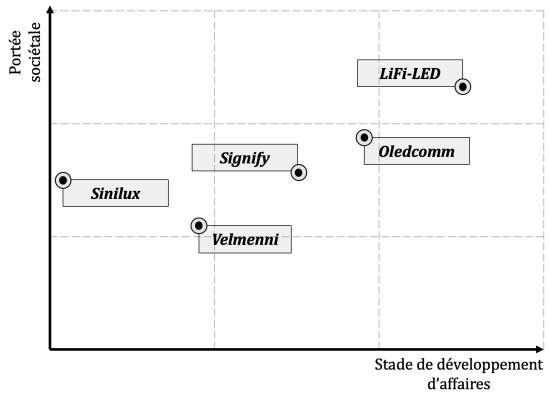


Figure 15: Carte de segmentation

3.3.2 PESTEL

Pour terminer cette analyse, intéressons-nous à une vue macro-économique du secteur du LiFi en proposant une analyse PESTEL synthétique qui se base sur les recherches de la partie théorique ainsi que sur les informations recueillies dans la partie empirique. Nous terminerons par une réflexion ouverte sur l'utilité de la technologie dans la section suivante.

Politique	Le spectre de la lumière n'est pas divisé et fortement réglementé comme les ondes radio (cf. 2.5.4.1.1 Capacité). Le LiFi peut protéger des zones militaires et à vocation de défense publique.
Économique	Le LiFi peut proposer de nouveaux modèles d'affaires de la lumière et d'Internet combinés en un service. Le LiFi bénéficie d'une croissance du secteur des LEDs mais également du secteur grandissant des télécommunications.
Social	Internet est un droit humain de base selon les Nations Unies (Howell & West, 2016). Le LiFi a le potentiel de combler le fossé socio-économique mondial. Les implémentations du LiFi permettraient de réduire les impacts sur la santé probables et démontrés des ondes radiofréquence. Recul plus important des impacts sur la santé des ondes de la lumière visible comparé au faible recul des ondes radio. Une sécurité accrue des données est rendue possible grâce au LiFi, mais également une sécurité physique grâce à des applications industrielles et routières (ex. VàV).
Technologique	Le LiFi permet de ne pas se heurter au crunch spectral des ondes radio grâce à l'utilisation du spectre visible et proche infrarouge. Impacts technologiques tels que prévu par la partie *2.5.4 avantages* : haut débit, sécurité, stabilité. Possibles implémentations qui seraient omniprésentes : développements de l'IoT et des *smart cities* facilités.
Environnemental	Intérêt grandissant pour les problèmes climatiques (Bardi, 2019). Efficacité énergétique et durabilité des lampes LED. Probable effet rebond à quantifier plus précisément sur les moyen et long termes, en fonction des applications et différences d'implémentations respectives.
Légal	Division légale du spectre des ondes radio hors de préoccupation. Norme internationale IEEE régissant d'un standard LiFi à l'horizon 2021.

Tableau 14: Analyse PESTEL

3.3.3 Réflexion ouverte sur l'utilité

Les avantages au niveau de la connectivité qu'offrent la technologie du LiFi sont inébranlables, indéniables et sans précédent dans l'industrie des télécommunications. Malgré les avancées importantes du secteur, qu'en est-il de l'utilité réelle de cette technologie ?

L'entretien avec un expert en télécommunication, le professeur Raskin de l'École Polytechnique de Louvain, nous permet d'y voir plus clair sur la question. En effet, notre société a connu ces 20 dernières années des bouleversements majeurs, comme nous l'avons vu dans la première partie de ce travail. Nous avons développé des appareils mobiles capables de créer, transmettre et stocker la donnée. La conjonction de ces trois paramètres et la loi de Moore ont créé un climat économique qui suit un *technology push* : on veut fabriquer de l'électronique plus dense, plus rapide, plus petit et moins cher.

Dans ce cadre, le LiFi s'inscrit comme une technologie intéressante qui permet entre autres de ne pas utiliser d'ondes radio, d'augmenter les débits et d'éviter le crunch spectral. Cependant, cette technologie s'inscrit dans la même lignée que les précédentes d'un point de vue historique. En effet, tout comme la transition de la 3G à la 4G par exemple, le LiFi va se positionner comme une technologie additive par rapport au Wi-Fi. Les solutions LiFi/Wi-Fi dites « hybrides » dans la littérature vont également en ce sens. En d'autres mots, le LiFi viendra s'additionner au Wi-Fi et aux autres moyens de communication.

Cependant, si nous allons dans la même direction, les technologies de l'information vont atteindre un niveau d'émission de CO_2 équivalent au secteur de l'automobile mondial en 2025. Dans ce contexte, bien que le LiFi résoudrait des problèmes technologiques, la technologie nous propulserait aussi directement vers une situation environnementale plus désastreuse qu'aujourd'hui. Ceci est paradoxal en considérant que la technologie est décrite et vendue comme écologique par les entreprises ainsi que divers scientifiques.

D'autre part, ce genre de technologie, bien que considérée comme intéressante par le professeur Raskin, donne lieu à des usages qui doivent également être remis en question.

Le secteur est gouverné par une poignée d'acteurs qui proposent leurs services mais sans réflexion en amont, comme l'indique également Pauli (2018). Mais quelles sont les réelles utilités ? L'histoire des nouvelles technologies a mis en avant le développement de ces nouvelles avancées comme ayant des avantages majeurs pour la sécurité et la santé. Il n'est pas anodin d'y retrouver deux des avantages centraux du LiFi. De plus les avancées proposées bénéficieront aux plus riches et justifieront des investissements colossaux qui amèneront certainement à une situation de consommation excessive.

Ces schémas qui se reproduisent dans l'histoire sont appelés à se répéter dans le futur. Ces derniers amènent à se poser des questions quant à l'utilité intrinsèque des avancées technologiques et des changements structurels que notre société doit connaître afin de changer de manière profonde et d'éviter des drames socio-environnementaux.

Il est donc temps d'innover en pleine conscience et d'arriver à des révolutions technologiques qui seraient plus durables pour l'Homme et son écosystème.

4 Conclusion

4.1 Résumé de la recherche et recommandations

Cette recherche exploratoire sur la technologie du LiFi, ses modèles d'affaire et ses impacts sociétaux, a été abordé avec un point de vue systémique afin d'offrir au lecteur une vue d'ensemble sur les impacts sociétaux d'une technologie qui n'en est qu'à ses balbutiements.

Afin d'offrir cette recherche, une revue de la littérature a été réalisée et a permis de découvrir des éléments clés concernant la technologie et ses thèmes connexes. Nous avons découvert que la croissance constante et exponentielle des besoins en connectivité vont dépasser la capacité des technologies actuelles et ainsi nous mener vers une situation de crunch spectral. Cependant, les développements de la technologie LED de ces dernières années ont fait naître l'opportunité d'allier la lumière avec la transmission du signal Internet, pour ainsi éviter une telle situation. Nous avons insisté sur les technologies de communications optiques OWC et VLC afin de replacer le LiFi dans son contexte, de comprendre son origine et sa classification technologique.

Après avoir découvert que le signal Internet pouvait être transmis grâce aux scintillements de la lampe LED, nous avons pu également analyser quels avantages la technologie présentait. Il apparaît que sa capacité supérieure, sa meilleure stabilité, sa sécurité accrue ainsi que son impact inexistant sur la santé forment la liste des avantages principaux de cette dernière. Les applications pour les villes et appareils intelligents, ainsi que pour l'industrie ont ensuite été abordées, bien qu'il apparaît que l'utilisation de la lumière permet d'envisager une infinité d'applications potentielles.

Par la suite, des études de marché ont permis de révéler les acteurs principaux, mais également que la croissance de marché du LiFi de ces prochaines années serait considérable. Nous avons conclu la revue de la littérature avec une analyse des impacts socio-environnementaux ainsi que sur la santé qui ont permis de mettre en avant que le LiFi apparait comme une solution plus respectueuse de l'environnement, sans aspect néfaste pour la santé et avec des perspectives sociales intéressantes.

Afin d'offrir une vue sur les modèles d'affaire existant à ce stade du développement de la technologie, ainsi que sur les impacts sociétaux des entreprises LiFi, une analyse qualitative a été réalisée. Sept leaders ou acteurs fondamentaux du marché présentant une haute pertinence ont ainsi été interviewés. Le Circular Canvas a permis d'aborder tous les aspects d'une analyse classique d'un modèle d'affaires et d'offrir également une vue sur les impacts sociétaux de chaque entreprise interrogée.

L'utilisation de l'infrarouge bidirectionnelle est ressortie comme l'élément technologique le plus contrasté face aux hypothèses initiales. D'un point de vue économique, il est apparu que les entreprises se focalisent sur des missions assez similaires basées sur la connectivité mais que de manière générale elles disposent de propositions de valeur variées. Il en ressort, dans la plupart des cas, que les aspects socio-environnementaux et sanitaires sont des additions aux bénéfices technologiques, comme le prouvent notamment le manque de connaissance dans l'utilisation des *Ressources*, ainsi que la temporalité des *Usages Suivants*.

Bien que les résultats aient été extrêmement pertinents, et malgré certains intérêts sociétaux des entreprises interviewées, nous voyons donc que les entreprises ont à cœur d'apporter cette nouvelle technologie sur le marché pour une raison technologique essentiellement. Cependant, dans un monde présentant des défis sociétaux toujours croissants, il paraîtrait intéressant pour ces entreprises d'apporter des modifications structurelles aux modèles d'affaire. En effet, il serait judicieux d'intégrer les volontés sociétales au cœur même des modèles en intégrant l'économie de la fonctionnalité au centre de la proposition de valeur, présentant un potentiel énorme mais ayant été trop peu abordée lors des entretiens. Ces entreprises pourraient également s'intéresser à l'*Objectif de Développement Durable 9* qui propose de développer « *des infrastructures de qualité, fiables, durables et résistantes, soutenant le développement économique et le bien-être social* » promouvant « *un accès inclusif, durable, abordable et équitable pour tous, en utilisant à cette fin des outils nouveaux et innovateurs.* » (Conseil de l'Europe, 2020).

En d'autres mots, il s'agirait pour ces futures grandes entreprises d'arrêter de vouloir faire *mieux en aval* du développement d'une nouvelle technologie mais plutôt de vouloir

faire *bien en amont* depuis la création et le design de l'innovation. En intégrant ce mode de réflexion, les entreprises pourraient ainsi se placer dans le cadrant supérieur droit de la carte de segmentation proposée en *Figure 15*. Ainsi, ces dernières pourraient, tout en étant rentables, avoir des impacts sociétaux positifs sur leurs écosystèmes.

4.2 Limites du travail

Malgré une attention permanente portée sur la rigueur académique ainsi que sur le fil conducteur de ce travail, il est certain qu'il fait face à certaines limites qui peuvent avoir altéré la qualité des résultats obtenus.

D'une part, il est certain que l'exercice de réalisation d'un mémoire possède de manière inhérente une limite temporelle assez stricte. De ce fait, l'échantillon utilisé pour l'analyse qualitative aurait pu être plus large avec plus de temps disponible. Cela aurait permis une meilleure répartition géographique mais aussi de découvrir des informations encore plus variées et ainsi d'offrir une vue d'ensemble plus étendue.

D'autre part, un biais possible se situe au niveau de la compréhension du Circular Canvas et de ses thèmes pour les intervenants. En effet, malgré une explication de l'outil et de ses objectifs en amont des entretiens, ainsi que durant les premières minutes de ces derniers, il est possible qu'un manque de compréhension des termes utilisés aient conduit à une altération de la qualité des résultats obtenus.

4.3 Perspectives futures

De manière générale, il semble que la technologie possède un potentiel gigantesque et peut être perçue comme une étape nécessaire dans le développement du secteur des télécommunications. Toutefois, pour le moment, le développement du nouveau standard LiFi est une étape cruciale qui aura un impact significatif sur le secteur du LiFi à l'horizon 2021.

Dans cette perspective, il serait pertinent de réaliser une recherche similaire à celle-ci quelques années après l'implémentation du nouveau standard. Dans la même logique, une

analyse axée sur l'utilisation des matériaux, des ressources et des cycles de vie pourraient être réalisée par des spécialistes en la matière.

En guise de dernier mot, malgré ces passionnantes perspectives de développement technologique, il semble nécessaire de changer le paradigme avec lequel nous pensons nos innovations aujourd'hui afin de développer le monde de demain de manière plus responsable et plus durable pour l'Homme et son environnement.

5 Bibliographie

Alao, O., Joshua, J., Franklyn, A., & Komolafe, O. (2016). Light Fidelity (Li-Fi): An Emerging Technology for The Future. *Journal of Mobile Computing & Application, 3*(3), pp. 18-28.

Alimi, I. A., Abdalla, A. M., Rodriguez, J., Pereira Monteiro, P., Teixeira, A. L., Zvanovec, S., & Ghassemlooy, Z. (2020). Enabling VLC and WiFi Network Technologies and Architectures Toward 5G. Dans A. M. Abdalla, J. Rodriguez, I. Elfergani, & A. Teixeira, *Optical and Wireless Convergence for 5G Networks* (éd. First Edition, pp. 101-122). John Wiley & Sons.

Andrillon, T. (2020). *Samsung : les premiers téléviseurs Micro-Led n'arriveront pas avant 2021*. Consulté en Février 2020, sur Les Numériques: https://www.lesnumeriques.com/tv-televiseur/samsung-les-premiers-televiseurs-micro-led-n-arriveront-pas-avant-2021-n152735.html

A short history of the light bulb. (2018). Consulté en Avril 2020, sur Senselite : http://senselite.com.my/2018/07/07/a-short-history-of-the-light-bulb/

Assemblée parlementaire. (2011). *Le danger potentiel des champs électromagnétiques et leur effet sur l'environnement*. Consulté en Mai 2020, sur Assemblée parlementaire - Conseil de l'Europe: http://assembly.coe.int/nw/xml/xref/xref-xml2html-fr.asp?fileid=17994

Avendano, C., Mata, A., Sarmiento, C. A. S., & Doncel, G. F. (2012). Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertility and Sterility*, *97*(1), 39-45.

Ayyash, M., Elgala, H., Khreishah, A., Jungnickel, V., Little, T., Sihua, S., . . . Freund, R. (2016). Coexistence of WiFi and LiFi Toward 5G: Concepts, Opportunities, and Challenges. *IEEE Communications Magazine, 54*(2), pp. 64 - 71.

Bardi, U. (2019). *The Public Interest in Climate Change Reaches an All-Time High. It is the Effect of Greta Thunberg*. Consulté en Août 2020, sur Pressenza: https://www.pressenza.com/2019/10/the-public-interest-in-climate-change-reaches-an-all-time-high-it-is-the-effect-of-greta-thunberg/

Bedouret, L., & Dupleix, A. (2019). Impact sociétal de la recherche: évaluation et perspectives. *Techniques de l'Ingenieur*.

Behera, P. C., & Dash, C. (2015). Light Fidelity: "A Substitution Technique to Overcome Challenges in Radio Wave Data Transmission Process". *International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science, 4*(Special issue).

Bell. (2020). *Qu'entend-on par « téléversement » ou « téléchargement »?* Consulté en Avril 2020, sur Bell: https://soutien.bell.ca/services-internet/consommation/qu-entend-on-par-televersement-ou-telechargement

Berkhout, P. H., Muskens, J. C., & Velthuijsen, J. W. (2000). Defining the rebound effect. *Energy Policy, 28*(6-7), 425-432. doi:10.1016/s0301-4215(00)00022-7

Blum, B., Hübner, J., Milde, A., & Neumärker, K. J. B. (2018). *On the evidence of rebound effects in the lighting sector: Implications for promoting LED lighting* (No. 05-2018). The Constitutional Economics Network Working Papers.

Binswanger, M. (2001). Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect? *Ecological economics*, *36*(1), 119-132.

Burnard, P., Gill, P., Stewart, K., Treasure, E., & Chadwick, B. (2008). Analysing and presenting qualitative data. *British Dental Journal, 204*(8), 429-432. doi: 10.1038/sj.bdj.2008.292

Carr-Wilson, S., Drachenberg, E., Freeman, G., Jain, R., Kotze, R., Lekan, M., . . . Tzeng, R. (2016). Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle. *International Institute for Industrial Environmental Economics [IIIEE]*.

Centre international de Recherche sur le Cancer. (2011). *LE CIRC CLASSE LES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES DE RADIOFREQUENCES COMME « PEUT-ETRE CANCEROGENES POUR L'HOMME »*. Consulté en Mai 2020, sur IARC: https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_F.pdf

Chartier, M. (2019). *Internet : Air France équipera des avions en réseaux lumineux Li-Fi*. Consulté en Août 2020, sur Les Numériques: https://www.lesnumeriques.com/vie-du-net/internet-air-france-equipera-avions-en-reseaux-lumineux-li-fi-n87967.html

Circulab. (s.d.-a). *Who we are?* Consulté en Janvier 2020, sur Circulab : https://circulab.com/who-we-are/

Circulab. (s.d.-b). *The Circular Canvas: The tool to design regenerative business models.* Consulté en Janvier 2020, sur Circulab : https://circulab.com/toolbox-circular-economy/circular-canvasregenerative-business-models/

Cisco. (2020). *Cisco Annual Internet Report (2018-2023).* White Paper.

Conseil de l'Europe. (2020). *ODD 9 : Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation*. Consulté en Octobre 2020, sur Conseil de l'Europe: https://www.coe.int/fr/web/congress/goal-9

Cucurachi, S., Tamis, W. L., Vijver, M. G., Peijnenburg, W. J., Bolte, J. F., & de Snoo, G. R. (2013). A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). Environment international, 51, 116–140.

Darty. (2020). *La maison connectée grâce au courant porteur en ligne (CPL)*. Consulté en Mai 2020, sur Darty: https://www.darty.com/achat/comment/informatique/cpl/cpl.html

Dimitrov, S., & Haas, H. (2015). *Principles of LED Light Communications.* Cambridge University Press.

Drachenberg, E., Mihailova, D., & Nandamuri, S. (2016). Digging for Truth Raw Material Extraction and Future Potential for LEDs. *Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle*, 12-20.

Economic and Social Research Council. (2020). *The rebound effect*. Consulté en Mai 2020, sur UKRI - Economic and Social Research Council: https://esrc.ukri.org/about-us/50-years-of-esrc/50-achievements/the-rebound-effect/

European Commission. (2003). *Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought.* Consulté en Avril 2020, sur Europa: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_03_1278

Foster, K. R., & Moulder, J. E. (2013). Wi-Fi and health: review of current status of research. *Health physics*, *105*(6), 561-575.

Gado, M., & Abd El-Moghith, D. (2015). *Li-Fi Technology for Indoor Access.* LAP LAMBERT Academic Publishing.

Garcia-Marquez, J., & Topsu, S. (2017, Juin 19). *Les communications par lumière visible: le Li-Fi.* Consulté en Juin 2020, sur Photoniques: https://doi.org/10.1051/photon/20178622

Gavard-Perret, M. L., Gotteland, D., Haon, C., & Jolibert, A. (2008). Méthodologie de la recherche. *Editions Pearson Education France*.

Ghosal, B., & Panda, A. K. (2014). Li-Fi a Green Energy Initiative. *International Journal of Computer Applications*, *95*(11).

Global LiFi Congress. (2019). *Exhibitor List 2019*. Consulté en Juin 2020, sur Global LiFi Congress: https://www.lificongress.com/Exhibitor-List-2019-104-2.html

Global Market Insights. (2020). *Li-Fi Market Size By Component, By Application,Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2020 – 2030*. Consulté en Juillet 2020, sur GMinsights: https://www.gminsights.com/industry-analysis/lifi-market#:~:text=(Light%20Fidelity)%20Li%2DFi,will%20drive%20the%20market%20growth

Godfroid, T. (2012). Préparer et conduire un entretien semi-directif (séminaire du 10 mai 2012). Campus de lettres et sciences humaines, Nancy: université de lorraine.-Hallenbeck, PN, Lundstedt, S.(1966). Some relations between dogmatism, denial and depression. *The Journal of Social Psychology*, *70*, 53-58.

Godin, B., & Doré, C. (2005). Measuring the impacts of science: Beyond the economic dimension. *INRS Urbanisation, Culture et Société*, 44.

Gracci, F. (2017). Comment fonctionne la vision? *Science&Vie, 16*(QR).

Greening, L. A., Greene, D. L., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey. *Energy policy*, *28*(6-7), 389-401.

Griffiths, S. (2020). *Why your internet habits are not as clean as you think*. Consulté en Juin 2020, sur BBC: https://www.bbc.com/future/article/20200305-why-your-internet-habits-are-not-as-clean-as-you-think

Haas, H. (2011). *TED Global | Wireless Data from Every Light Bulb | Harald Haas*. Consulté en Mai 2020, sur YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=NaoSp4NpkGg&t=3s

Haas, H. (2015). *Forget Wi-Fi. Meet the new Li-Fi Internet | Harald Haas*. Récupéré sur YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=iHWIZsIBj3Q

Haas, H. (2016a). *LiFi to unlock the Third Industrial Revolution | Harald Haas | TEDxWHU*. Consulté en Mai 2019, sur YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=UulEFh8yhCg&t=5s

Haas, H. (2016b). LiFi: Conceptions, Misconceptions and opportunities. *IEEE Photonics Conference (IPC)*, (pp. 680-681). Waikoloa.

Haas, H. (2018). LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. *Reviews in Physics, 3*, pp. 26-31.

Haas, H., Yin, L., Wang, Y., & Chen, C. (2016). What is LiFi? *Journal of lightwave technology, 34*(6), pp. 1533-1544.

Happich, J. (2018). *Li-Fi passes industrial test with BMW's robotic tools*. Consulté en Août 2020, sur eeNews Europe: https://www.eenewseurope.com/news/li-fi-passes-industrial-test-bmws-robotic-tools

Hermans, J. (2019). Entrepreneurship: ENT_IB_session3_2019_Moodle [Diapositives].

Howell, C., & West, D. M. (2016). *The internet as a human right*. Consulté en Août 2020, sur The Brookings Institution: https://www.brookings.edu/blog/techtank/2016/11/07/the-internet-as-a-human-right/

IEEE. (2018). *IEEE 802.11™ Launches Standards Amendment Project for Light Communications (LiFi)*. Consulté en Juin 2020, sur IEEE Beyond Standards: https://beyondstandards.ieee.org/general-news/ieee-802-11-launches-standards-amendment-project-for-light-communications-lifi/

IEEE. (2020). *IEEE at a Glance*. Consulté en Mai 2020, sur IEEE: https://www.ieee.org/about/at-a-glance.html?WT.mc_id=lp_ab_iaa

ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*. Consulté en Juin 2020, sur ISO: https://www.iso.org/fr/standard/37456.html

Joyce, A., & Paquin, R. L. (2016). The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. *Journal of Cleaner Production, 135*, 1474-1486. doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.067

Jurczak, C. (2017). *Le LiFi par Lucibel: Illuminer les Télécommunications.* Livre Blanc.

Jurevicius, O. (2013). *Value Chain Analysis*. Consulté en Juin 2020, sur Strategic Management Insight: https://strategicmanagementinsight.com/tools/value-chain-analysis.html

Jurrien, I. (2020). *Oppo smartphone met LiFi technologie is 100x sneller dan WiFi*. Consulté en Août 2020, sur Let's Go Digital: https://nl.letsgodigital.org/smartphones/oppo-lifi-telefoon/

Kanagarajan, S. (2020, Juillet). *Etats-Unis Brevet n° 10727941.*

Kastrenakes, J. (2019). *Wi-Fi 6: is it really that much faster?* Consulté en Mai 2020, sur The Verge: https://www.theverge.com/2019/2/21/18232026/wi-fi-6-speed-explained-router-wifi-how-does-work

Khandal, D., & Jain, S. (2014). Li-Fi (Light Fidelity): The Future Technology in Wireless Communication. *International Journal of Information & Computation Technology, 4*(16).

Krief, N., & Zardet, V. (2013). Analyse de données qualitatives et recherche-intervention. *Recherches en sciences de gestion*, (2), 211-237.

Kurzweil, R. (2004). The law of accelerating returns. In *Alan Turing: Life and legacy of a great thinker* (pp. 381-416). Springer, Berlin, Heidelberg.

L'Avenir. (2018). *Vitesse d'Internet: la Belgique progresse au classement mondial*. Consulté en Juillet 2020, sur L'Avenir: https://www.lavenir.net/cnt/dmf20180718_01198825/vitesse-d-internet-la-belgique-progresse-au-classement-mondial

LCA. (s.d.). *Light Communications Alliance*. Consulté en Septembre 2020, sur LCA: http://lightcommunications.org

Leba, M., Riurean, S., & Ionica, A. (2017). LiFi - the Path to a New Way of Communication. *2th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, (pp. 1-6). Lisbon.

Légifrance. (2015). *Journal officiel électronique authentifié n° 0034 du 10/02/2015.* Consulté en Mai 2020, sur Légifrance: https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=6x8hyT2x7VPKv4JwGdFinIiX_erjixoTD_Jy3AVXRFk=

Lekan, M., & Tzeng, R. (2016). Lighting the Paths for Eco- Design Life Cycle Assessment of Light Sources. *Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle*, 4-11.

LiFi-LED. (2020). *Borne LIFI*. Consulté en Septembre 2020, sur LiFi-LED: http://lifiled.africa/services/borne-lifi/

Lorriere, N., Betrancourt, N., Pasquinelli, M., Chabriel, G., Barrere, J., Escoubas, L., ... & Simon, J. J. (2020). Photovoltaic Solar Cells for Outdoor LiFi Communications. *Journal of Lightwave Technology*.

Lumoindong, C. W., Muslim, A., Nasreddin, M., & Galina, M. (2018). Performance and Environmental Impacts Review of Li-Fi and Wi-Fi Technologies. *Journal of Env. Engineering & Waste Management, 3*(2), pp. 68-75.

Ministry of Business, Innovation & Employment. (2020, Août). *Electricity statistics On this page you can find the data tables for electricity generation and demand in New Zealand.* Consulté en Septembre 2020, sur Ministry of Business, Innovation & Employment: https://www.mbie.govt.nz/building-and-energy/energy-and-natural-resources/energy-statistics-and-modelling/energy-statistics/electricity-statistics/

Mordor Intelligence. (2020). *LI-FI (LIGHT FIDELITY) MARKET - ANALYSIS OF GROWTH, TRENDS AND FORECAST (2020 - 2025)*. Consulté en Juillet 2020, sur Mordor Intelligence: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/li-fi-market

Niedercorn, F. (2019, Juin). *Li-Fi : un business enfin prêt à sortir de l'ombre*. Consulté en Juillet 2020, sur Les Echos - Entrepreneurs: https://business.lesechos.fr/entrepreneurs/idees-de-business/0601207386367-li-fi-un-business-enfin-pret-a-sortir-de-l-ombre-329671.php

Ohno, Y. (2006). Optical metrology for LEDs and solid state lighting. In *Fifth Symposium Optics in Industry* (Vol. 6046, p. 604625). International Society for Optics and Photonics.

Oledcomm. (2018a). *Who we are*. Consulté en Juillet 2020, sur Oledcomm: https://www.oledcomm.net/about/who-we-are/

Oledcomm. (2018b). *LiFiMAX® High speed internet through invisible light*. Consulté en Septembre 2020, sur Oledcomm: https://www.oledcomm.net/category/products/

Osseiran, Monserrat, & Marsch. (2015). *5G Mobile and Wireless Communications Technology.* Cambridge University Press.

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. John Wiley & Sons.

Pauli, G. (2018). *Li-Fi la communication à la vitesse de la lumière.* Paris: Editions de l'Observatoire/Humensis.

PennState - Center for Nanoscale Science. (2018). *LIGHT BULB EFFICIENCY.* Consulté en Avril 2020, sur Materials Research Science & Engineering Centers: https://www.mrsec.psu.edu/content/light-bulb-efficiency

Peretto, L., Riva, C., Rovati, L., Salvatori, G., & Tinarelli, R. (2009). Analysis of the Effects of Flicker on the Blood-Flow Variation in the Human Eye. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58*(9), 2916-2922. doi:10.1109/tim.2009.2016773

Perwej, Y. (2017). The Next Generation of Wireless Communication Using Li-Fi (Light Fidelity) Technology. *Journal of Computer Networks, 4*(1), pp. 20-29.

Philips. (2019). *Que signifie LED RVB ?* Consulté en Février 2020, sur Philips Lighting: https://www.lighting.philips.be/fr/assistance/assistance-produit/faqs/white-light-and-colour/what-does-rgb-led-mean

Philips. (2020). *À propos de Philips Lighting La lumière au service de la qualité de vie*. Consulté en Juin 2020, sur Philips Lighting: https://www.lighting.philips.fr/support/mieux-nous-connaitre/a-propos

Rensselaer Polytechnic Institue. (2003). *What is an LED driver?* Consulté en Août 2020, sur NLPIP: https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/led/LEDDriver.asp

Research and Markets. (2020). *Li-Fi (Light Fidelity) Market - Analysis of Growth, Trends and Forecast (2020 - 2025)*. Consulté en Juillet 2020, sur Research and Markets: https://www.researchandmarkets.com/reports/4758264/li-fi-light-fidelity-market-analysis-of#rela1-4744487

Richards, E. (2018). *The Carbon Cost of an Email*. Consulté en Juin 2020, sur Carbon Literacy Project: https://carbonliteracy.com/the-carbon-cost-of-an-email/

Riurean, S., Stoica, R., & Leba, M. (2017). Visible light communication for audio signals. *International Journal of Communications*, *2*.

Samsung. (2020). *Refresh rate options on your Galaxy S20 and Note20 Ultra*. Consulté en Mai 2020, sur Samsung: https://www.samsung.com/us/support/answer/ANS00086005/

Saunders, H. D., & Tsao, J. Y. (2012). Rebound effects for lighting. *Energy Policy*, *49*(0), 477-478.

Savaliya, V., Shah, K., Shah, D., Shah, H., & Kadam, P. (2020). Implementation of In-flight Entertainment System Using Light Fidelity Technology. In *Inventive Communication and Computational Technologies* (pp. 983-992). Springer, Singapore.

Savoie-Zajc, L. (1997). L'entrevue semi-dirige. *Recherche sociale. De la problématique à la collecte des données. 3e Édition. Presses de l'Université du Québec. Ste-Foy, Québec*, 263-285.

Sarkar, A., Agarwal, S., & Nath, A. (2015). Li-Fi Technology: Data Transmission through Visible Light. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies, 3*(6).

Scace, S. (2014). *pureLiFi at Mobile World Congress 2014*. Consulté en Août 2020, sur pureLiFi: https://purelifi.com/li-fi-mobile-world-congress-2014/

Scace, S. (2017). *pureLiFi reveals a new product ready to immerse the world in real LiFi*. Consulté en Septembre 2020, sur PureLiFi: https://purelifi.com/say-hello-to-the-lifi-xc/

Schleich, J., Mills, B., & Dütschke, E. (2014). A brighter future? Quantifying the rebound effect in energy efficient lighting. *Energy Policy*, *72*, 35-42.

Schneider Electric. (2020). *Les différentes technologies de lampes*. Consulté le Avril 2020, sur Installation électrique: https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Les_différentes_technologies_de_lampes

Serafimovski. (2017). *Li-Fi - How every LED light could connect you to the internet*. Consulté en Mai 2020, sur YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=O-ncPjD1IeY

Sharma, V., Rajput, S., & Kumar Sharma, P. (2015). Light Fidelity (Li-Fi): An Effective Solution for Data Transmission. *Advancement in Science and Technology*.

Sikdar, B. (2013). A study of the environmental impact of wired and wireless local area network access. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 59(1), 85-92.

Swami, N.V. (2015). Li-Fi (LIGHT FIDELITY) - THE CHANGING SCENARIO OF WIRELESS COMMUNICATION. *International Journal of Research in Engineering and Technology, 04*, 435-438.

The Nobel Prize. (2014). *The Nobel Prize in Physics 2014*. Consulté le Avril 2020, sur The Nobel Prize: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/summary/

Tonzani, S. (2009). Lighting technology: Time to change the bulb. *Nature, 459*(7245), pp. 312-314.

Tsao, J. Y., Saunders, H. D., Creighton, J. R., Coltrin, M. E., & Simmons, J. A. (2010). Solid-state lighting: an energy-economics perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *43*(35), 354001.

Tsonev, D., Videv, S., & Haas, H. (2013). Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking. *Photonics West - Optoelectronic Materials and Devices*.

Tsonev, D., Videv, S., & Haas, H. (2015). Unlocking spectral efficiency in intensity modulation and direct detection systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *33*(9), 1758-1770.

U.S. Department of Commerce. (2016). *United States Frequency Allocations - The Radio Spectrum.* Consulté en Mai 2020, sur National Telecommunications and Information Administration United States Department of Commerce: https://www.ntia.doc.gov/page/2011/united-states-frequency-allocation-chart

Union Européenne. (2009). *RÈGLEMENT (CE) No 245/2009 DE LA COMMISSION.*

Université d'Ottawa. (2014). *Revue de littérature.* Consulté en Mars 2020, sur SASS - Service d'appui au succès scolaire - u Ottawa: https://sass.uottawa.ca/sites/sass.uottawa.ca/files/revue_de_litterature_0.pdf

van Rijnsoever, F. J. (2017). (I can't get no) saturation: a simulation and guidelines for sample sizes in qualitative research. *PLoS One*, *12*(7), e0181689.

Voo. (2020). *De quelle vitesse internet avez-vous besoin ?* Consulté en Mai 2020, sur Voo: https://www.voo.be/fr/internet

Wathern, P. (1984). Ecological impact assessment. In *Perspectives on Environmental Impact Assessment* (pp. 273-292). Springer, Dordrecht.

Yom, S. (2015). From Methodology to Practice: Inductive Iteration in Comparative Research. Comparative Political Studies, 48(5), 616–644. https://doi.org/10.1177/0010414014554685

York, R., & McGee, J. A. (2016). Understanding the Jevons paradox. *Environmental Sociology*, *2*(1), 77-87.

Zhongze, C., Jie, C., Huaiyu, W., Bing, L., Yuanbo, L., & Siong, S. (2014). *Light Becomes Data – Business Model for Li-Fi Technology*. Consulté en Juillet 2020, sur Slideshare: https://fr.slideshare.net/funk97/biz-model-for-purelifi

6 Annexes

Annexe A. Classification des technologies d'éclairage

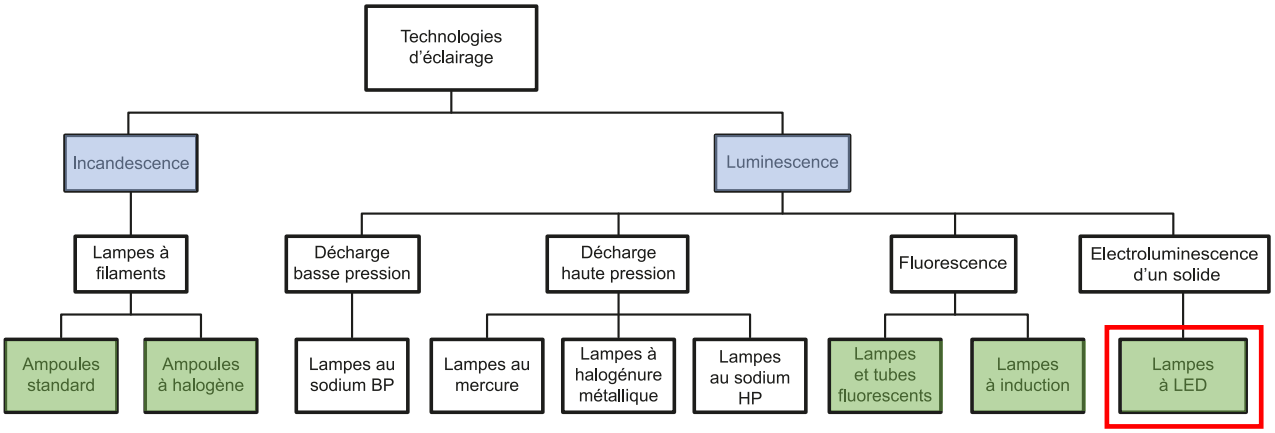


Figure 16: Classification des technologies d'éclairage (Schneider Electric, 2020)

Les technologies d'éclairage mentionnées dans ce mémoire sont en vert.

Annexe B. Les différents types de LED

- pc-LED[13] : cette LED bleue utilise une couche de phosphore pour convertir la lumière bleue en rouge, vert et jaune afin d'obtenir de la lumière blanche (Garcia-Marquez & Topsu, 2017).

- LEDs RVB : les LEDs Rouge Vert Bleu sont aussi appelées des LEDs à trois couleurs et possèdent des émetteurs des trois couleurs susmentionnées. Plus de 16 millions de nuances peuvent être créées grâce à différentes combinaisons de ces 3 couleurs (Philips, 2019).

- Micro LEDs : ces LEDs ont la capacité de scintiller 1.000 fois plus rapidement que des LEDs classiques et ont une taille de l'ordre de $1\mu m^2$. Autrement dit, elles pourraient transmettre des données un million de fois plus rapidement que des LEDs classiques. Plusieurs entreprises s'y attèlent actuellement et souhaiteraient même commercialiser les premières Micro LEDs pour 2021(Andrillon, 2020).

- OLEDs : ces dernières sont fabriquées à partir de molécules organiques et qui offrent une légèreté, une flexibilité, de la transparence et une haute capacité à régler les couleurs. Ces éléments font des OLEDs les moyens d'éclairage moderne idéaux.

[13] pc-LED = Phosphor converted LED

Annexe C. Origines et exemples des premiers systèmes OWC

En 1792, l'ingénieur français Claude Chappe invente un système permettant de transmettre 196 symboles différents encodés grâce à la position de deux bras connectés à une barre transversale. Cette invention prend le nom de sémaphore et est considérée comme étant à l'origine des communications optiques sans fil (Riurean, Stoica, & Leba, 2017).

Des années plus tard, en 1836, l'invention du Morse a permis à la marine de guerre de communiquer avec les phares côtiers via des signaux lumineux (Dimitrov & Haas, 2015).

Finalement, Pauli (2018), Dimitro et Haas (2015) ainsi que Gago et Abd El-Moghith (2015) décrivent le photophone, inventé par Graham Bell inventeur du téléphone, comme étant le dernier exemple des utilisations précoces des communications optiques. Ce dernier a utilisé la lumière modulée, et non l'électricité modulée, afin de transmettre un message vocal sans recourir à un fil.

Annexe D. Solution CPL

Le CPL, ou Courant Porteur en Ligne, est une solution qui permet de se connecter à Internet via les prises électriques. Le principe est assez simple, un « boîtier CPL central » se branche à n'importe quelle prise de la maison. Ce dernier est alimenté directement par le routeur grâce à un câble Ethernet. Une fois cette étape réalisée, Internet peut être utilisé en connectant un « boîtier CPL d'utilisation » sur n'importe quelle autre prise de la maison, sauf que cette fois le boîtier se connectera en Ethernet à l'ordinateur. Il est possible que ce deuxième boîtier émette également du Wi-Fi. Un schéma simple d'utilisation est illustré sur la figure suivante (Darty, 2020).

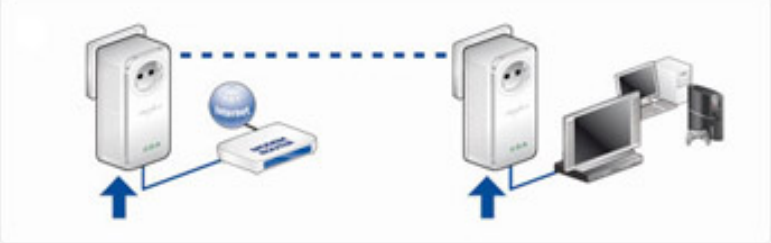


Figure 17: Système CPL (Darty, 2020)

Dans les deux cas principaux expliqués ci-dessus, il s'agit bien de lampes LED « spéciale » compatibles Li-Fi. Certains auteurs parlent néanmoins d'une possibilité d'utilisation de l'infrastructure lumineuse existante comme nous le verrons dans la partie des avantages.

Annexe E. Tableau des avantages du Li-Fi

Auteur(s) → / Avantage ↓	*Haas, 2011*	*Khandal & Jain, 2014*	*Sarkar, Agarwal & Nath, 2015*	*Sharma, Rajput & Kumar Sharma, 2015*	*Alao, Joshua, Franklyn, & Komolafe, 2016*	*Leba, Riuran, & Ionica, 2017*	*Perwej, 2017*	*Haas, 2018*	*Alimi et al., 2020*
Résoudre les problèmes de : 1)Capacité: spectre 10.000 fois plus large ; 2)Efficacité: -les LEDs consomment moins d'énergie et -la transmission de données est « gratuite » ; 3)Disponibilité: -les LEDs sont partout, milliards d'ampoules -là où le WiFi est interdit ; 4)Sécurité du Li-Fi : murs, etc.	X		X						
1)CAPACITE									
La lumière visible dispose de 10.000 fois plus de disponibilités.	X	X	X	X		X	X		
La lumière visible et infrarouge ensemble disposent de 2.600 fois la taille du spectre de fréquence radio.								X	

Très grande capacité/bande passante de l'ordre du THz. Fréquences beaucoup plus hautes que le WiFi.					X				X
Utilisation d'une bande passante gratuite, dite « license free » (et ainsi meilleur marché que le WiFi, ou « cost effective ») .	X		X		X	X	X		X
Le Li-Fi offre la possibilité de décharger la bande des ondes radios, actuellement sous pression, grâce à l'utilisation du spectre de la lumière visible. Phénomène du « Spectrum Relief ».			X	X	X				X
2)EFFICACITE									
EFFICACITE ENERGETIQUE									
Fonction d'éclairage et de connectivité.	X	X				X		X	
Très basse consommation d'électricité, et donc d'énergie.				X	X				
Basse consommation d'énergie : Énergie pour la communication serait de 0 étant donné qu'on utilise déjà la lumière.						X			
Efficacité énergétique: plus faible consommation d'énergie									X
EFFICACITE ECONOMIQUE									
Bon marché: pas de maintenance ou de factures mensuelles ; et efficacité.				X	X				

Coûts d'électricité moindre par rapport au Wi-Fi[14].					X				
Économies d'argent grâce à la longévité des lampes LED.					X				
Coûts de maintenance très bas.					X				
Faible coût d'implémentation du LiFi, dans certains cas.						X			
3)DISPONIBILITE									
Lampes									
Transformer n'importe quelle lampe en une connexion internet.					X		X		
Succès grandissant des LEDs et adoption mondiale croissante.	X							X	X
Milliards de lampes dans le monde qui n'ont besoin que d'être remplacées par des lampes LEDs					X				
Fréquences									
Le LiFi est intolérant aux perturbations d'autres fréquences ; Immunité face aux interférences des ondes radio.	X	X		X	X				X
Utilisation dans des environnements sécurisés et réglementés au point de vue des ondes radios. *Ex. où les fréquences radios sont interdites.*	X			X	X			X	
Bonne solution pour les environnements qui sont									X

[14] Ref à l'article sur la conso d'E → faire un point dessus !

sensibles aux ondes radio. *Ex. hôpitaux, avions, sous l'eau,… .*									
Le LiFi ne perturbe pas les réseaux à fréquences radio.	X			X			X	X	
Le Li-Fi peut être utilisé dans des endroits avec beaucoup de « bruits » de fréquences radios.					X				
Le Li-Fi peut être utilisé dans des endroits où il est difficile d'installer de la fibre optique. *Ex. salle d'opération*.					X				
La lumière visible ne va pas entraver, déranger, les ondes radio existantes, « electromagnetic smog ». *Ex. pour les endroits dangereux.*						X			
4)SECURITE									
Sécurité : les murs, matériaux et objets opaques sont les limites.		X	X	X	X	X	X	X	
Haut degré de sécurité contre l'écoute clandestine, dite *eavesdropping*.									X
Sécurité : hors du faisceau lumineux, on ne reçoit pas l'information.	X								
La source de lumière LED irradie la lumière de manière directionnelle.	X							X	
Autres catégories									
Vitesse									

Débit de données au-delà de 10 Gbps sont possibles. « Ultra haute vitesse ».			X	X	X				
Haute Vitesse: des vitesses commerciales atteignant les 100Gbps et jusqu'à 224Gbps dans des conditions de laboratoire. Environ 100 fois la Vitesse du Wi-Fi.						X	X	X	X
Vitesses élevées de l'ordre du Gbps.			X						
Le Li-Fi offre des vitesses rapides , jusqu'à 500Mbps.					X				
Le Li-Fi est idéal pour une couverture de réseau à haute densité dans une région délimitée.					X				
Infrastructure									
Préexistence de l'infrastructure. Besoin de remplacer uniquement les ampoules.	X	X		X				X	X
« Piggy-back » sur des infrastructures de réseau existantes pour les « backhaul connections ».	X							X	
Amélioration de l'infrastructure lumineuse : plus de lumière par watt comparé aux lampes à incandescences.			X						
Équipement plus compact et de masse faible.									X

Santé									
Elimination des effets des ondes [radios] sur la santé.				X		X			
Toxicité : Les LEDs ne contiennent pas de mercure, par opposition aux lampes fluorescentes.			X						
Application, propriétés de base et autres									
Le Li-Fi peut être utilisé dans les avions sans affecter les signaux radio existants	X		X		X				
Le Li-Fi peut être intégré dans les appareils médicaux et dans les hôpitaux car pas d'ondes radio	X		X		X		X		
Le Li-Fi peut être utilisé pour l'exploration sous-marine	X		X		X				
Le Li-Fi peut être utilisé pour le contrôle du trafic routier (v2v ou v2signals)	X		X		X		X		
Le Li-Fi peut transformer chaque lampadaire pulic en AP gratuit	X		X		X				
Le Li-Fi permet aux utilisateurs de se déplacer librement.				X					
Dimming : Transmettre des données même si la lumière a l'air éteinte.						X			
« Time-to-market » réduit.									X
ON-OFF : Les LEDs peuvent s'allumer et s'éteindre très rapidement.	X		X						

Annexe F. Allocation des fréquences du spectre radio aux États-Unis

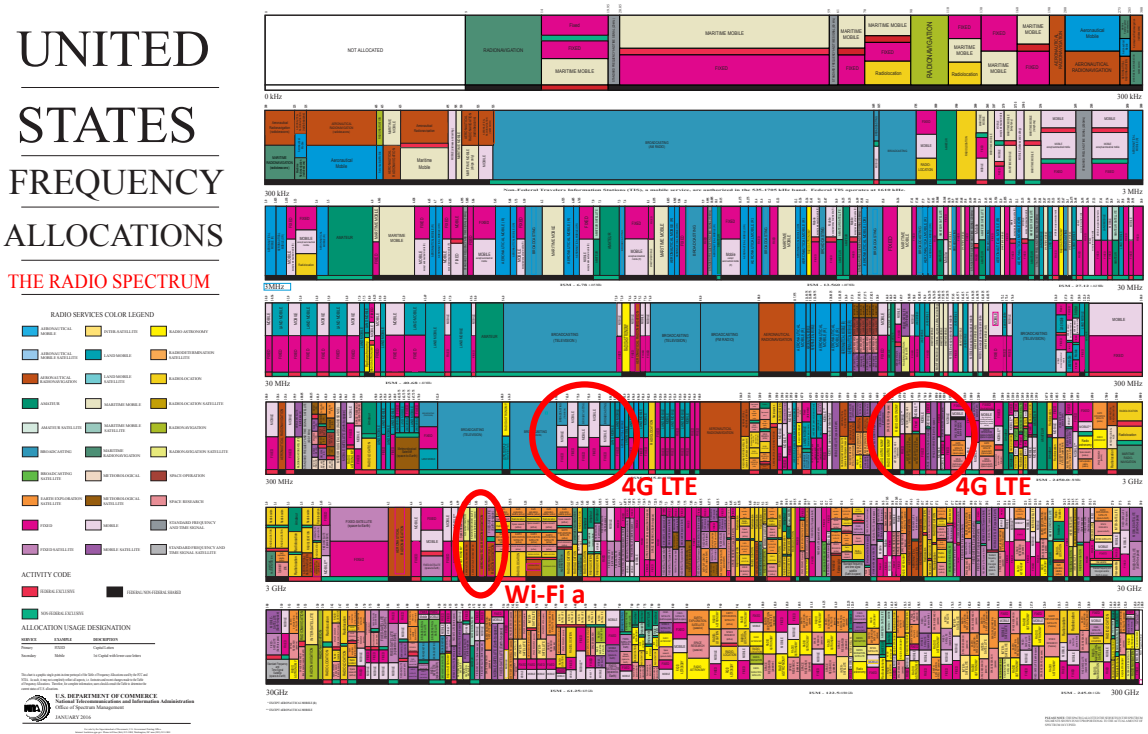


Figure 18: Allocations des fréquences du spectre radio aux États-Unis (U.S. Department of Commerce, 2016)

« *Carte d'attribution des fréquences aux États-Unis. Le spectre RF, qui couvre la gamme 3kHz-300GHz du spectre électromagnétique, est fortement réglementé et utilisé pour de nombreuses applications. Les bandes les plus courantes pour l'électronique grand public et l'internet des objets sont représentées sur le graphique. En revanche, la bande beaucoup plus large de la lumière visible et du proche infrarouge de 250 THz à 800 THz, (…), n'est pas régulée et peut être utilisée pour des communications lumineuses.* » (Jurczak, 2017)

Annexe G. Limites et inconvénients du Li-Fi

Malgré les avantages évidents que la technologie propose, il est certain qu'elle dispose de limites et inconvénients qu'il advient d'éclaircir.

Premièrement, un des avantages majeurs du Li-Fi est son apport de sécurité. Ceci est dû au fait que le faisceau lumineux ne traverse pas les murs. Cependant, cet avantage peut être vu comme un inconvénient lorsque l'on considère que nous sommes habitués depuis des années à utiliser le réseau Wi-Fi qui, lui, peut traverser des surfaces. Ainsi, l'utilisateur ne pourra pas être connecté à Internet s'il est de l'autre côté du mur par rapport à une lampe Li-Fi, ou si un objet entrave le passage de la lumière (Sarkar, Agarwal & Nath, 2015).

Néanmoins, Haas (2011) affirme cependant que nos appareils seraient capables de réceptionner le signal de lampe en lampe. Par exemple, lors de ses changements de pièce, un utilisateur bénéficierait d'une expérience de connectivité fluide dans un bâtiment dans lequel toutes les lampes de ce dernier émettraient un signal Li-Fi. De plus, la technologie peut fonctionner sans que la lumière soit dirigée directement sur le receveur (cf. Annexe J).

De ce fait, la fiabilité ainsi que la couverture du réseau sont deux problèmes à prendre en considération également. Ceci est dû à, d'une part, à ces matériaux opaques qui peuvent causer des interruptions et, d'autre part, à la lumière du soleil pouvant perturber le signal (Sarkar, Agarwal & Nath, 2015).

Cependant, le professeur Haas explique que le Li-Fi peut fonctionner même avec la lumière du soleil et que la technologie pourrait même en bénéficier en utilisant des receveurs Li-Fi sous forme de panneaux solaires afin de pouvoir produire de l'énergie (Haas, 2018). Un composant du système Li-Fi qui pourrait donc avoir un double emploi dans les zones extérieures : récepteur de signal et producteur d'énergie (cf. Annexe J).

Sarkar, Agarwal & Nath (2015) nous indiquent également qu'un désavantage important du Li-Fi est le coût d'installation élevé des systèmes Li-Fi. Toutefois, cet argument est réfuté par d'autres sources défendant que les infrastructures nécessaires sont existantes

ainsi qu'à plus faibles coûts que les infrastructures que l'on utilise aujourd'hui (cf. 2.5.4 tableaux avantages). Pauli (2018) mentionne qu'elles pourraient également être plus rapidement rentabilisées.

Une dernière limite abordée dans la littérature est le besoin de la technologie du Wi-Fi ainsi que des systèmes cellulaires pour des utilisations dans des véhicules en déplacement, ou encore dans des zones reculées où il y a des arbres, des murs, ou tout autre type d'obstacle (Sarkar, Agarwal & Nath, 2015).

Annexe H. Applications industrielles

1) Transport aérien

Dans les avions, le Wi-Fi est généralement interdit par la plupart des compagnies aériennes, ce qui empêche les consommateurs de bénéficier d'un accès à Internet. Toutefois, le Li-Fi pourrait être intégré à chaque lampe de lecture disposée au-dessus des sièges passagers afin d'offrir à ces derniers un accès à Internet haut débit. Le signal lumineux nécessaire au fonctionnement du Li-Fi ne perturberait pas les communications radio nécessaires à la navigation de l'appareil, contrairement aux possibles interférences radio entre le Wi-Fi et l'équipement (Savaliya et al., 2020).

De plus, l'implémentation de ce nouveau type de connectivité permettrait d'enlever une quantité de câbles importante et, par conséquent, de réduire la consommation en kérosène de l'avion. Tout en ayant un impact financier positif grâce à une réduction de coût, cela réduirait également l'impact environnemental des compagnies aériennes.

Très récemment, un brevet a été déposé concernant l'utilisation du Li-Fi afin de faciliter le déplacement de l'avion au sol. Ce type d'application peut rapidement ouvrir la voie à une nouvelle expérience aéroportuaire pour les passagers (États-Unis Patentnr. 10727941, 2020).

2) Environnements dangereux

Les centrales nucléaires, pétrochimiques, les mines et autres environnements considérés comme dangereux sont très sensibles aux ondes radio. En effet, des interférences trop importantes peuvent provoquer des dégâts considérables. Cependant, ces endroits nécessitent également une connectivité stable et rapide afin d'offrir, entre autres, le suivi des données sensibles. Le Li-Fi peut offrir une connectivité abondante, dépourvue de risque, sécurisée, et permettant de faire remonter l'information rapidement, voire en temps réel.

3) Exploration sous-marine

Les véhicules sous-marins téléguidés, aussi connus sous le nom de *ROV*, sont des appareils utilisés pour la recherche et l'exploration sous-marine. Ces derniers sont alimentés en énergie et reçoivent le signal de leurs pilotes grâce à de longs câbles. En effet, les ondes

radio ne conviennent pas pour une utilisation sous-marine dû à la dissipation rapide de ces dernières dans l'eau.

Ainsi, ces explorations pourraient être facilitées en utilisant la communication par la lumière offerte par le Li-Fi, afin d'éviter d'être bloqué par les câbles et de pouvoir avoir libre accès à une superficie d'exploration plus importante. De plus, ces véhicules sous-marins pourraient être équipés de lampes submersibles superpuissantes pour faciliter également la communication entre véhicules.

Annexe I.Tableau des applications du Li-Fi

Auteur(s) → / Application ↓	Khandal & Jain, 2014	Sarkar, Agarwal, & Nath, 2015	Haas, 2016	Alao, Joshua, Franklyn, & Komolafe, 2016	Leba, Riurean, & Ionica, 2017	Perwej, 2017	Pauli, 2018	Alimi et al., 2020
APPAREILS INTELLIGENTS								
Technologies de la santé : Li-Fi (dans les hôpitaux) et les salles d'opération et équipements sans interférences et plus de spectre disponible	X	X		X	X	X	X	X
Éducation & auditoires (connexion en temps réel entre 500 appareils)	X			X		X		
« Smart Class »		X		X				
Système de localisation précis en intérieur	X		X	X	X		X	X
Jouets & jeux interactifs avec des LEDs intégrées pour des communications à bas coûts		X						
Console de jeu : communication à un téléviseur sans câble						X		
Communications sans fil en intérieur : spectre gratuit, libre de droit et non sensible aux interférences radio ; sources lumineuses déjà présentes et sécurité des données		X					X	
Gestion intelligente de la consommation d'énergie dans les foyers et bureaux					X			
Surveillance de la santé grâce à des émetteurs portables (bracelets, boucles d'oreilles, bracelets LED)					X		X	X
Connectivité mobile (ordinateurs portables, smartphones, tablettes, …) / Électronique grand public						X	X	X
Solution WLAN infrarouge en intérieur								X

Transmission de signaux musicaux								X
VILLES INTELLIGENTES								
Technologies de la santé : Li-Fi dans les hôpitaux (et les salles d'opération) et équipements sans interférences et plus de spectre disponible	X	X		X	X	X	X	X
Gestion des catastrophes naturelles/Délégation d'information / Terrorisme	X					X	X	X
Système de localisation précis en intérieur	X		X	X	X		X	X
Feux de signalisation (V2Signal) – sécurité	X	X		X	X		X	X
Automobile : communication entre les feux des véhicules (V2V) – sécurité	X	X	X	X	X		X	X
Éclairage public : lampadaire public en « hotspots Li-Fi » (éclairage intelligent)	X	X	X	X	X	X	X	
Analyse [des données] du commerce de détail : suivre les comportements d'achat		X					X	X
Nouvelle expérience lors du shopping : promotions sur positions, kioskes tactiles, écrans interactifs, scanners, … Et la fin des codes-barres.			X				X	X
Développement du LBS (Location Based Service) tel que la publicité						X		
Casinos		X						
Stade (pas de place pour tout le monde sur le spectre radio)			X					
Régions rurales avec des panneaux solaires			X				X	
Connectivité sous-terre : tunnels, mines, métros, parking							X	
Nouveau réseau informationnel local							X	
INDUSTRIE								

Compagnies aériennes (et avions) : la lumière de lecture devient une connexion internet – sans interférences. Wi-Fi souvent interdit dans les avions	X	X		X	X	X	X	X
Centrales électriques, pétrolières, chimiques et nucléaires (sont des espaces sensibles aux ondes radio où le Li-Fi peut offrir une connectivité abondante, sécurisée, et efficace en terme de coûts) ou mines ou autres environnements dangereux	X	X	X	X	X	X		X
Dépollution après Crise nucléaire : Li-Fi insensible aux radiations							X	
Explorations et communications sous-marines	X	X	X	X	X	X		X
Applications militaires sous-marines				X				
Communications cachées (ex. communications militaires)		X						
Industrie 4.0 : automatisation et robots ; applications dans la production et l'industrie			X				X	X
Communications inter- et intra-puces électroniques								X
Connectivité sous-terre : tunnels, mines, métros, parking							X	
AUTRES								
Lieux où il est difficile de poser de la fibre optique	X							
Situations dans lesquelles la sensibilité aux fréquences radio est un problème		X					X	
Personnes sensibles aux ondes radio						X	X	
Communications entre appareils (Internet of Things)			X					X

« Internet of People » plutôt que Internet of Things							X	

Annexe J.Évolution du Li-Fi : ligne du temps synthétique

Afin de permettre au lecteur de se repérer dans le temps face aux développements du Li-Fi de ces dernières années, il est intéressant de se référer à une description historique, à une brève ligne du temps, qui présentera les moments forts de la technologie jusqu'au temps présent. A noter qu'il ne s'agit pas de relater tous les évènements qui se sont produits mais bien de capturer l'essence des stades de développement d'une technologie novatrice, afin de pouvoir mieux l'appréhender.

Voici ci-dessous un résumé des grandes étapes qu'a connu le Li-Fi ces dernières années. Une version plus exhaustive se trouve en Annexe.

- *Dans les années 2000*, « le Li-Fi était déjà dans les esprits » (Garcia-Marquez & Topsu, 2017).
- *En 2005*, le développement du Li-Fi « prend forme » (Garcia-Marquez & Topsu, 2017).
- *En 2010*, le nombre annuel de publications de brevets et d'articles sur le Li-Fi dépasse les 100. (Garcia-Marquez & Topsu, 2017)
- *12 juillet 2011*. Le professeur Harald Haas, connu comme l'inventeur du Li-Fi, fait une démonstration d'un prototype de système Li-Fi à une conférence TED Global à Édimbourg. Le président des Communications Mobiles à l'université d'Édimbourg utilise une lampe à LED afin de transférer une vidéo qui est ensuite projetée sur un écran (Haas, 2011).
- *2012*. L'entreprise Cisco réalise une démonstration en 2012 au *Consumer Electronics Show* de Las Vegas où deux smartphones ont su échanger des données en utilisant les lumières de leurs écrans (Khandal & Jain, 2014).
- *En août 2013*, des vitesses de données de plus de 1.6Gbps grâce à une LED monocolore ont été démontré (Perwej, 2017).
- *En octobre 2013*, des fabricants chinois travaillent avec des kits de développement pour Li-Fi. (Perwej, 2017)
- *2014.* Khandal et Jain nous expliquent dans leur article en 2014 que jusqu'à cette date, le Li-Fi était implémenté via des ampoules LEDs blanches uniquement mais que des équipes des Universités d'Oxford et d'Édimbourg se concentraient toutes

deux sur de la transmission de données parallèle grâce à l'utilisation de plusieurs LEDs, où chaque LED transmettrait différentes données.

- *En avril 2014*, l'entreprise Russe Stins Coman travaille sur le développement d'un réseau local sans fil Li-Fi appelé BeamCaster et prédise pouvoir atteindre 5Gpbs. (Perwej, 2017)
- *Février 2014*. L'entreprise pureLiFi, créée par Harald Haas, réalise une démonstration du premier système Li-Fi commercialisable au célèbre salon Mobile World Congress de Barcelone (Scace, 2014).
- *En 2014*, une entreprise Mexicaine du nom de Sisoft ont atteint des transferts de données jusqu'à 10Gbps. (Perwej, 2017)
- *En 2015*, le nombre total de publications de brevets et d'articles sur le Li-Fi atteint les 1000. (Garcia-Marquez & Topsu, 2017)
- *En 2018*, des tests sont réalisés dans les usines du constructeur automobile allemand BMW afin d'implémenter le Li-Fi (Happich, 2018).
- *En juin 2019*, l'entreprise française Oledcomm fait part de son souhait d'équiper les avions Air France et KLM d'une connectivité Li-Fi avec une vitesse promise de 100Mpbs par siège ce qui ridiculise les Wi-Fi le plus rapides avoisinant les 15Mpbs (Chartier, 2019).
- *En 2020,* le nombre d'applications potentielles ne cesse de croître et de nouveaux brevets sont développés comme c'est le cas du brevet pour les aéroports par exemple (Etats-Unis Patentnr. 10727941, 2020).
- *En août 2020*, le site Let's Go Digital a repéré un brevet déposé par le constructeur de téléphone mobile chinois OPPO pour intégrer du Li-Fi dans ses appareils (Jurrien, 2020).

Annexe K. 6 idées fausses courantes sur le Li-Fi

1) Le Li-Fi est une technologie « LoS »

Une technologie dite « line-of-sight », qui peut être traduit par technologie à visibilité directe, signifie que l'émetteur du signal doit être placé face au receveur du signal, sans quoi il serait impossible de transmettre le message. Prenons une métaphore simple : vous êtes deux personnes dans une petite pièce. Si vous gardez l'autre personne dans votre dos et que vous parlez suffisamment fort, votre voix va rebondir sur le mur et atteindre les oreilles de cette autre personne.

Au même titre que votre voix, Le Li-Fi peut dès lors fonctionner sans être en visibilité directe, dans des scénarios dits « non-line-of-sight », en pointant la lampe LED vers un mur blanc dans la direction opposée au receveur du signal (Tsonev, Videv, & Haas, 2013).

2) Le Li-Fi ne fonctionne pas à la lumière du soleil

Bien que le soleil constitue une source de perturbation du signal, des techniques ont été trouvées afin de filtrer le flux continu de la lumière du soleil. Haas (2018) ainsi que Lorrière et al. (2020) veulent utiliser le soleil comme un avantage en créant des receveurs de signal sous forme de panneaux solaires qui pourront faire double emploi : réceptionner le signal et générer de l'énergie.

3) L'intensité de l'éclairage ne peut pas être réduite

Diverses expériences ont prouvé que l'intensité lumineuse pouvait être réduite[15] tout en continuant à transmettre des données à une vitesse élevée (Tsonev, Videv, & Haas, 2015). La lumière pourra même aller jusqu'à paraître éteinte à l'œil nu bien que toujours en train de transmettre un signal (Pauli, 2018).

4) La lampe scintille

Les taux de rafraichissement des écrans actuels sont de l'ordre de 100Hz de fréquence moyenne pour les écrans standards d'ordinateur, et de l'ordre de 60Hz pour des smartphones haut de gamme (Samsung, 2020). Cela signifie que, pour ces écrans, 60 ou

[15] Procédé de « dimming » en anglais.

100 nouvelles images sont générées toutes les secondes afin de proposer une expérience fluide.

Concernant le Li-Fi, la plus faible fréquence à laquelle la lumière est modulée, et donc clignote, se situe aux alentours des 1MHz, soit 1.000.000Hz, autrement dit 10.000 fois plus rapide que les meilleurs écrans du marché. De plus, afin de prouver la non-dangerosité des scintillements, ceux-ci ont été testé par le standard EN 61000-4-15 (Peretto et al., 2009).

5) **Le Li-Fi ne fonctionne que pour du réseau descendant**

Le Li-Fi a l'avantage de pouvoir utiliser l'éclairage pour transmettre des données mais ce n'est pas l'unique option. En effet, les fonctions d'éclairage et de transmission de données peuvent être séparées en utilisant le spectre infrarouge afin de faire remonter les données sur le réseau (Haas, Yin, Wang, & Chen, 2016).

Les cinq points ci-dessus sont communément partagés par Haas (2016b), contenu qu'il raffinera d'un point de vue technologique deux ans plus tard (Haas, 2018), mais aussi Leba, Riurean et Ionica (2017) bien que ces derniers rajoutent également le point suivant :

6) **Les lampes existantes doivent être remplacées**

La solution peut être implémentée en utilisant l'infrastructure lumineuse existante et en y ajoutant l'équipement Li-Fi nécessaire (Swami, 2015). Ce point ayant des implications importantes quant à l'utilisation des matériaux et divers équipements devra faire l'objet d'une vérification dans la partie empirique.

Annexe L. Tableau complet de comparaison Li-Fi et Wi-Fi

	Li-Fi	Wi-Fi
Appellation complète	Light Fidelity	Wireless Fidelity
Année de création *(Ghosal & Panda, 2014)*	2011	1990
Opérations	Transmission de données par des lampes LEDs	Transmission de données par des routeurs Wi-Fi
Spectre = Moyen de transmission (Haas, 2018)	Lumière visible	Ondes radio
Gamme du spectre	750 THz	0,3THz
Fréquence de fonctionnement (Behera & Dash, 2015)	Centaines de THz	2.4 ou 5.0GHz
Monétisation du spectre (Pauli, 2018)	Libre de droit – gratuit	3 à 4 licences par pays et partage de fréquences pour certains opérateurs
Interférences (Perwej, 2017)	Aucunes	Interférences avec les équipements émetteurs d'ondes radio et points d'accès à proximité
Débit de données le plus rapide	250Gbps	9,6Gbps (en Wi-Fi 6)
Débit moyen en 2020	?	70Mbps
Coût (Behera & Dash, 2015)	Moindre que le Wi-Fi car spectre libre de droit	Cher en comparaison car utilisation du spectre radio
Applications (Perwej, 2017)	▪ Trafic aérien ▪ Exploration sous-marine ▪ Hôpitaux ▪ Résidentiel ▪ autres[16] Transfert de données et navigation Internet.	Navigation Internet grâce à des points d'accès Wi-Fi
Confidentialité / Sécurité (Sarkar, Agarwal, & Nath, 2015)	La lumière (et donc le signal) est bloqué par les murs : transfert sécurisé de données.	Le signal n'est pas bloqué par les murs, des techniques spéciales doivent être utilisées pour garantir la sécurité.
Distance de couverture	~10 mètres	~32 mètres

[16] cf. 2.5.5 Applications du Li-Fi

(Perwej, 2017)		
Équipements *(Perwej, 2017)*	▪ Driver LED* ▪ Lampe LED ▪ Photodétecteur	▪ Routeur
Maturité du marché *(Sharma et al., 2015)*	Faible	Élevée
Consommation énergétique *(Perwej, 2017)*	Moyenne	Moyenne
Impact environnemental *(Alao et al. 2016)*	Faible	Moyen

* Selon Rensselaer Polytechnic Institute (2003) : « Un driver de LED remplit une fonction similaire à celle d'un ballast pour les lampes à décharge. Il contrôle le courant qui circule dans la LED.».

Annexe M. Étapes du cycle de vie des LEDs

★★★ Significant total environmental impact
★★ Major total environmental impact
★ Minor total environmental impact

RAW MATERIALS

★★★

This stage has low data availability and is only included in few LCA reports.

- Aluminum is used to make heatsink (a heat exchanger that is used to absorb and disperse excess heat from the LED diode) in a LED light and acquisition of aluminium makes the LED exceed the CFL in the life cycle impact category of hazardous waste to landfill.
- The development and use of ceramic heatsinks help to alleviate environmental impact from heatsinks.[1]

MANUFACTURING

★★

Total environmental impact results related to energy usevary from 1%-24%[3, 4,6]

This stage has low data availability (manufacturing data are regarded as confidential and complex due to intellectual property rights of suppliers for materials like yttrium, cerium, etc.)[1].

- The only stage that surpasses other lighting sources.
- Impacts (energy use category) are mainly associated with: driver (average 40% of total environmental impacts), LED array (28% of total impacts), LED components, silicone covering sheet, and aluminum reflector and heatsink.[3]
- Material composition of a (5 mm) LED chip is not devoid of hazardous materials.[7]
- Materials used in LEDs like copper, lead, chromium are hazardous if occur in high concentrations.[8]
- Energy consumption is becoming more significant due the complex lighting technology.
- There are tradeoffs between energy efficiency rate and amount of metal containing components.[3]
- LCAs don't consider the premature failure at LED (as well as other electronic equipment).

DISTRIBUTION

★

This stage has low data availability and is only included in few LCA reports.

There is minimal insight into calculation assumptions regarding distance of transport, type of transportation vehicle and the estimated capacity of the vehicle.

- Transporting of a packaged light from the manufacturing facility to the retail outlet.

USE

★★★

Total environmental impact results related to energy consumption vary from 76% to 98%.[2,3,6]

- Since LEDs are categorised as energy-related product (ErP) (2009/125/EC), various energy sources render different results in different geographical regions (e.g. French electricity has lower impacts in relation to many environmental aspects such as GWP and resource depletion, than the European average).[3]
- LED's "long life"makes it difficult to measure its whole life cycle (uncertainty).[3]

END-OF-LIFE

★

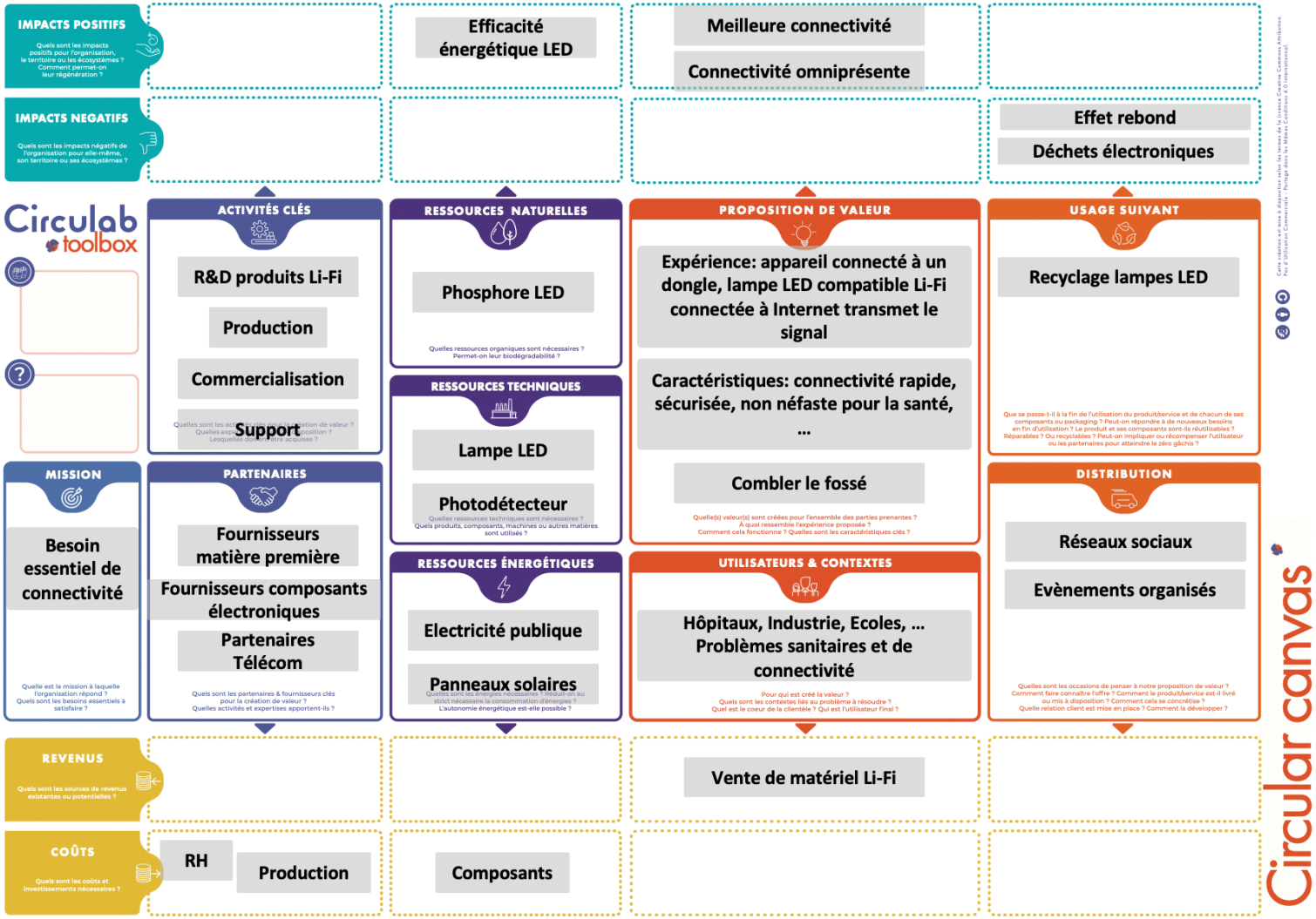
Total environmental impact results are minor yet remain highly underinvestigated (lack of recycling statistics, recycling process data)

- LED's End-of-life solutions are environmentally and economically beneficial as they help to recycle plastic components and retrieve valuable materials such as silver, nickel, gold, antimony, and copper.[5]
- The standard waste recycling is not able to recover LEDs' materials due to complex structures and diverse material use.[1]
- It is recommended to conduct assessments for toxicity and resource depletion potentials in the earliest stages of LEDs' development. The relevant policies, which have the capacity to influence the development of technologies, such as REACH Directive, RoHS Directive or WEEE Directive, should become stricter.

Annexe N. *Circular Canvas*



Annexe O. *Hypothèses*



Les hypothèses ci-dessus tirent majoritairement leur origine de la revue de la littérature. En effet, cette dernière est venue nourrir les cases suivantes :

Case du Circular Canvas	***Source de l'hypothèse***
Mission	3.3.2 PESTEL
Ressources naturelles	2.3.3 La LED
Ressources techniques	2.7 Résumé et comparaison entre le Li-Fi et le Wi-Fi
Ressources énergétiques	2.5.3 Fonctionnement du Li-Fi Annexe J . 6 idées fausses courantes sur le Li-Fi
Proposition de valeur	2.5.3 Fonctionnement du Li-Fi 2.5.4 Avantages, limites et inconvénients 2.8.2 Impact social et sur la santé
Utilisateurs et contextes	2.5.5 Applications du Li-Fi
Usage Suivant	Carr-Wilson et al. (2016) mentionnent des projets de recyclage pour les LEDs.
Impacts positifs	2.5.4 Avantages, limites et inconvénients 2.3.3 La LED
Impacts négatifs	2.9 Effet rebond 2.8.1 Impact environnemental

Néanmoins, il est également important de pouvoir poser des hypothèses sur les cases du Canvas qui n'ont pas été mentionnées dans la revue de la littérature. Dans ce contexte, le document *Light Becomes Data – Business Model for Li-Fi Technology* (Zhongze et al., 2014) a été utilisé afin d'émettre des hypothèses concernant les cases *Activités Clés*, *Partenaires*, *Distribution* ainsi que *Revenus et Coûts*.

Annexe P. Guide d'entretien

Mission

- Mission : quelle mission l'organisation vise à remplir ? Quel besoin de base remplit-elle ?

Activités clés et partenaires

- Activités clés : quelles sont les activités clés pour la création de valeur ? Quelles compétences et expertises sont déjà disponibles ? Lesquelles doivent être acquises ?

- Partenaires : qui sont nos partenaires clés, fournisseurs, et ressources humaines pour la création de valeur ? Quelles activités et expertise apportent-ils ?

Ressources

- Ressources naturelles : quelles ressources organiques sont nécessaires ? Est-ce qu'on facilite leur biodégradabilité ?

- Ressources techniques : quelles ressources techniques sont nécessaires ? Quels produits, composants, matériaux, machines, ou autres matières sont utilisés ?

- Ressources énergétiques : quelles ressources énergétiques sont nécessaires ? Est-ce que la consommation d'énergie est optimisée, c'est-à-dire réduite au strict nécessaire ? L'autonomie énergétique est-elle possible ?

Proposition de valeur et Utilisateurs & Contextes

- Proposition de valeur : Quelle(s) valeur(s) sont créées pour l'ensemble des parties prenantes ? Quels sont les problèmes résolus par notre offre ? Quels différents types de valeur sont créés pour toutes nos parties prenantes ? Comment décrieriez-vous l'expérience offerte ? Comment cela fonctionne-t-il ? Quelles sont les caractéristiques clés ?

- Utilisateurs & contextes : Pour qui la valeur est-elle créée ? Qui sont les consommateurs ciblés et/ou les utilisateurs finaux ? Dans quels contextes est-ce que l'offre résout les problèmes ?

Prochaine utilisation et distribution

- Usage suivent : quel est le scénario de fin d'utilisation pour le produit/service et chacun de ses composants/emballage ? Ce scénario peut-il remplir des besoins nouveaux à la fin du cycle d'utilisation ? Est-ce que le produit (ou ses composants) peuvent-ils être réutilisés/réparés/recyclés ? Est-ce que l'utilisateur ou les partenaires peuvent-ils être impliqués ou récompensés pour la réalisation de l'objectif de zéro déchet ?

- Distribution : quelles opportunités donne-t-on aux consommateurs pour penser à la proposition de valeur ? Comment faire connaître l'offre ? Comment l'offre est livrée ou mise à disposition ? Comment ce processus fonctionne-t-il ? Quel niveau de service est en place pour le consommateur ? Quelle relation client est mise en place ? Comment peut-elle être développée davantage ?

Revenus et Coûts

- Revenus : Quels sont les sources de revenu existantes ou potentielles ?
- Coûts : Quels sont les coûts et les investissements requis ?

Impacts

- Impacts positifs : Quels sont les impacts positifs pour l'organisation, la communauté locale ou leurs écosystèmes ? Comment l'organisation leur permet de se régénérer ?
- Impacts négatifs : Quels ton les impacts négatifs pour l'organisation, la communauté locale ou leurs écosystèmes ?

Annexe Q. Liste des personnes interviewées

Entité	**Intervenant**	**Rôle**	**Durée**
LiFi-LED	Ange-Frederik Balma	CEO	*100 min*
Signify	Karen Bamford	Product Manager	*90 min*
Oledcomm	Marc Vanveckhoven	Responsable stratégie	*120 min*
Velmenni	Deepak Solanki	CEO	*60 min*
Sinilux	Alban N'Dri	Responsable Marketing	*90 min*
Engie	Cédric Gelpi	Innovation Officer	*150 min*
Orange	Micheline Perrufel	Ingénieur de Recherche et Chef de Projet Innovation	*90 min*
UCL-EPL	Jean-Pierre Raskin	Professeur Télécommunications	*70 min*

Annexe R. Circular Canvas Individuels

- **Circular Canvas de LiFi-LED**



- **Circular Canvas de Signify**



- **Circular Canvas d'Oledcomm**



- **Circular Canvas de Velmenni**



- **Circular Canvas de Sinilux**



- **Circular Canvas d'Engie**



- **Circular Canvas d'Orange**



Annexe S. Accès vers les enregistrements audio

Afin d'accéder aux enregistrements, scannez le QR code suivant :

Si ce dernier ne fonctionne pas, vous pouvez également accéder à la plateforme d'hébergement des fichiers audio via lien suivant :

https://drive.google.com/drive/folders/1iysCI40NO3Vd_a5ClXGAZKD2DGmgoIH4?usp=sharing

Annexe T. Borne LiFi de chez LiFi-LED



Figure 19: Borne LiFi de chez LiFi-LED (LiFi-LED, 2020)

Annexe U. Produit « LiFiMax » de chez Oledcomm



Figure 20: LiFiMax (Oledcomm, 2018b)

Installation Diagram

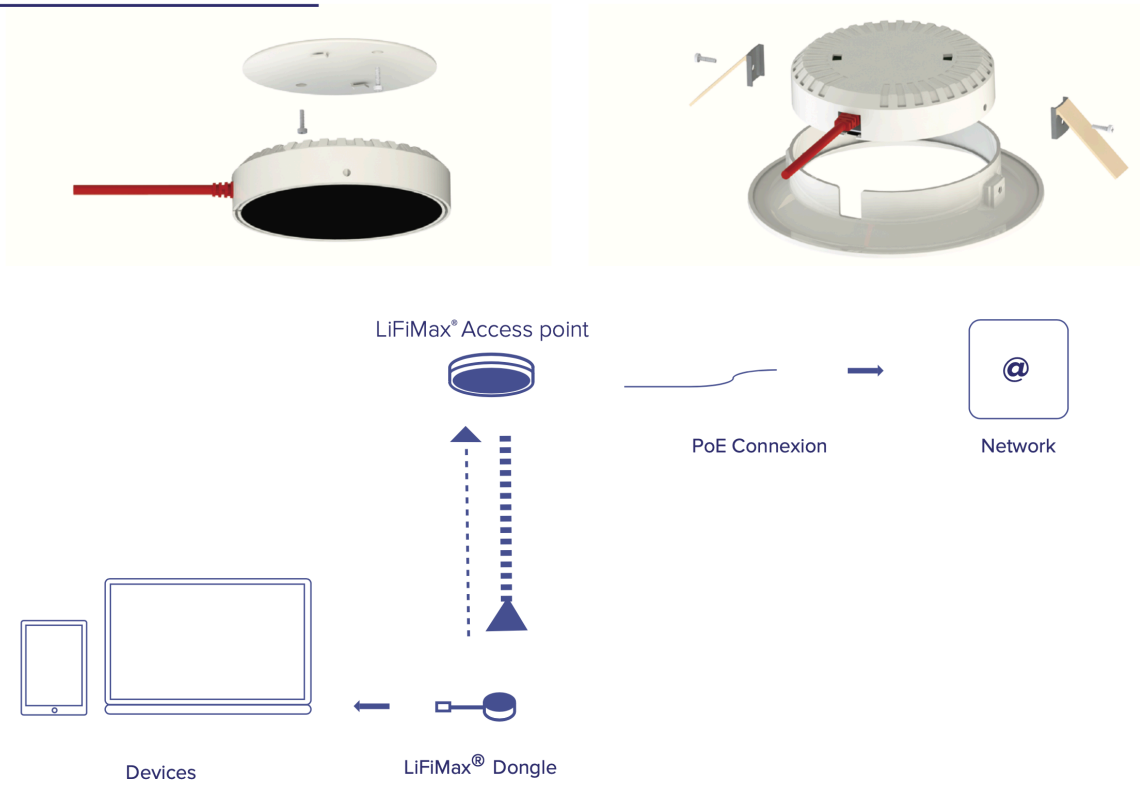
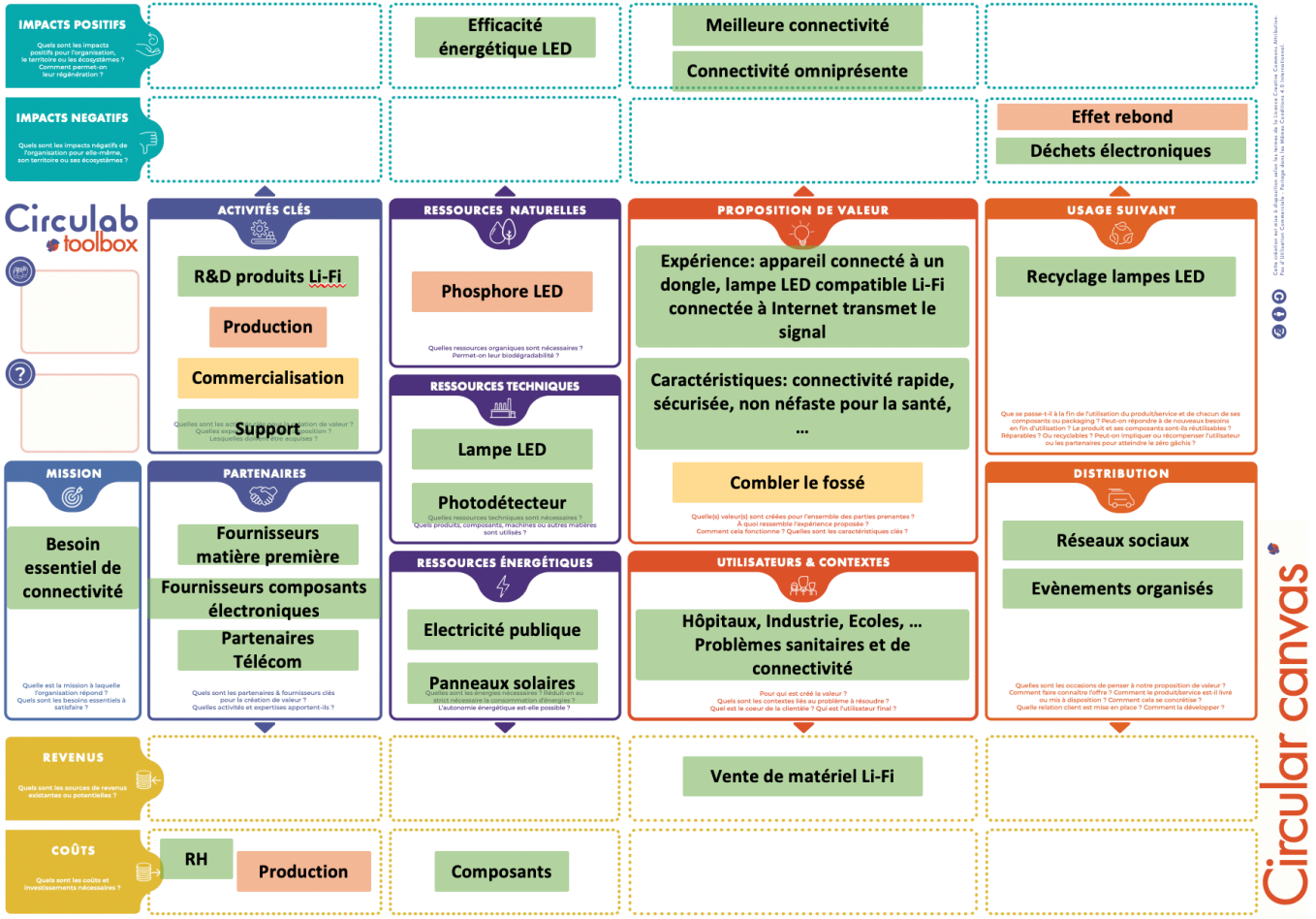


Figure 21: LiFiMax (Oledcomm, 2018b)

Annexe V. *Vérification des hypothèses de départ*



Légende : Vert – Hypothèse confirmée ; Rouge – Hypothèse infirmée ; Jaune – Partiellement abordé

LOUVAIN-LA-NEUVE | BRUXELLES | MONS | TOURNAI | CHARLEROI | NAMUR
Place des Doyens, 1 bte L2.01.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/lsm**