

# LIVRE BLANC



Illuminer les Télécommunications

---



# Le LiFi par Lucibel : Illuminer les Télécommunications

Christophe Jurczak, Directeur Scientifique

[christophe.jurczak@lucibel.com](mailto:christophe.jurczak@lucibel.com)

26 Novembre 2017

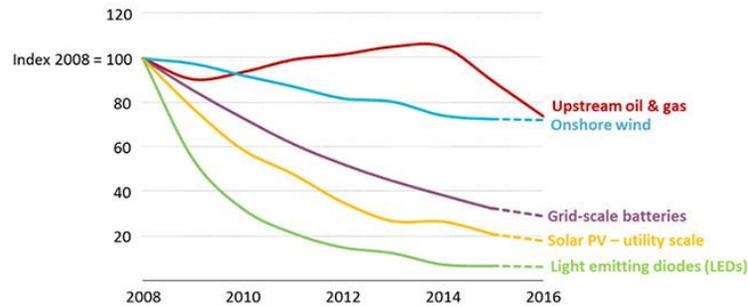
## Résumé

Le LiFi est une technologie de communication sans fil transformant l'éclairage intérieur à base de LED en une infrastructure critique pour la société de l'information. La technologie a atteint sa maturité, avec le premier luminaire LiFi commercialisé par Lucibel et PureLiFi en 2016. Plus de 50 clients de Lucibel ont réalisé des projets avec une grande variété de cas d'usage, et des améliorations très significatives du débit de communication au delà de 10 Gbps (Giga bits par seconde) suggèrent un futur lumineux pour le LiFi, qui se positionne comme un complément ou dans certains cas une alternative au WiFi et aux technologies 4G et 5G.

## 1. LiFi et Éclairage

Parmi les innovations majeures dans le secteur de l'énergie, le développement de l'éclairage LED a été spectaculaire ces dix dernières années, grâce à la conjonction vertueuse du développement technologique et des politiques et mesures en faveur de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Les ampoules LED commercialisées aujourd'hui consomment 85% d'énergie en moins que leurs homologues à incandescence, et leur déploiement a un impact considérable sur le mix énergétique, l'éclairage représentant actuellement 15% de la consommation mondiale d'électricité et 5% des émissions de gaz à effet de serre.

Les coûts ont été drastiquement réduits grâce à des améliorations de fabrication, mais aussi à une meilleure efficacité de la quantité de lumière pour une même consommation électrique. Les coûts par ampoule LED restent plus élevés que pour les technologies incandescentes et fluorescentes, mais une durée de vie plus longue (jusqu'à 25 000 heures) et des économies d'énergie rendent le coût par lumen - une mesure de la quantité totale de lumière visible émise par une source - beaucoup plus compétitif. La part LED du marché annuel de l'éclairage est déjà de 40-50% selon les pays et, dès 2020, 70% d'un marché global de l'éclairage estimé à 100 milliards de dollars devrait être constitué de lampes et luminaires LED. Aux États-Unis, la part des LED dans l'éclairage installé devrait passer de 6% en 2016 à près de 60% en 2025 et 90% en 2035 [1].



**Figure 1 :** Evolution des coûts des technologies clés dans le secteur de l'énergie. Le secteur des LED a bénéficié de la réduction de coût la plus spectaculaire au cours des dix dernières années, supérieure à celle du solaire photovoltaïque. Source : World Energy Outlook 2016, AIE

Alors que l'industrie de l'éclairage a toujours été lente à s'adapter et à évoluer, avec des cycles de produits supérieurs à 10 ans, l'éclairage LED offre l'opportunité, à un rythme accéléré, d'améliorer les installations et de créer de nouvelles opportunités commerciales. Avec les technologies d'éclairage dites « Solid State Lighting » (SSL) - incluant LED, LED organiques et diodes laser - des systèmes de contrôle et de communication peuvent se développer au niveau de l'alimentation faisant la conversion courant alternatif / continu. Ces systèmes élargissent considérablement l'éventail des fonctions d'un luminaire, ce qui en fait un élément central des concepts de Bâtiment et Ville intelligente.

Lucibel est, depuis 2008, à la pointe de la révolution des LED, en fabriquant des luminaires et en fournissant des solutions d'éclairage intérieur innovantes pour ses clients dans les secteurs tertiaire et industriel. Depuis ses débuts, Lucibel a mis l'accent sur l'innovation et la valeur ajoutée alors même que la forte baisse des prix refaçonnait l'industrie de l'éclairage. Les systèmes de contrôle, connectés ou non, n'agissent que sur l'une des deux composantes de la lumière, son intensité, de manière conventionnelle et quasi statique. Lucibel s'appuie sur ces systèmes et développe des fonctionnalités supplémentaires pour ses luminaires, qui répondent à deux besoins pressants de notre société : le bien-être et la communication à haut débit.

Le premier axe de développement consiste à programmer ou à ajuster à la demande le contenu spectral de l'éclairage LED, c'est-à-dire sa couleur, pour suivre les rythmes circadiens au cours de la journée d'une manière efficace d'un point de vue biologique et émotionnel. Le deuxième axe porte sur la modulation de l'intensité lumineuse à une fréquence élevée et de façon imperceptible pour encoder des informations et créer un canal d'échange de données sans fil à très grande vitesse entre un luminaire et un récepteur. Cette technologie s'appelle la Communication par la Lumière Visible (VLC - « Visible Light Communication »). Sur cette base, le LiFi, un terme inventé [2] en 2011 par le Professeur Haas - également co-fondateur du partenaire de Lucibel, PureLiFi - est une solution complète de communication mobile, bidirectionnelle et multi-utilisateurs.

Les communications optiques ne sont pas nouvelles. Sans aller jusqu'au photon de Bell en 1880, les technologies de fibres optiques développées à partir des années 1970 ont révolutionné l'industrie des communications et ont été un catalyseur majeur de l'ère de l'information. L'internet fonctionne principalement sur la base de fibres optiques et leur déploiement « jusqu'au dernier kilomètre » est fréquent. Avec le LiFi, Lucibel étend la révolution de la communication optique au client final, jusqu'au dernier mètre, transformant l'éclairage intérieur en un composant fondamental de la digitalisation.

## 2. La Communication par la Lumière

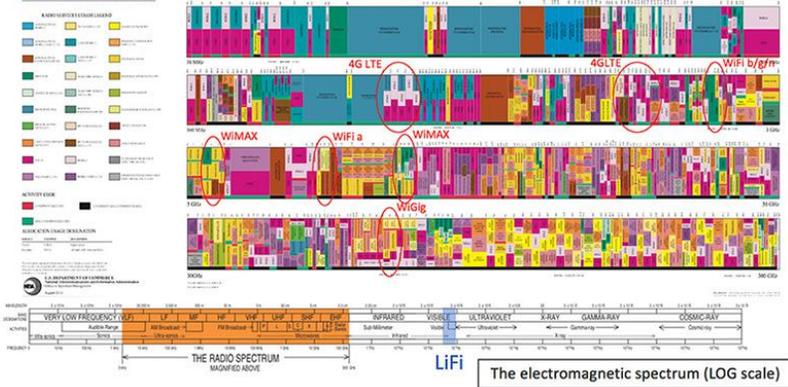
Il y a plusieurs façons de coder l'information sur la lumière, et elles impliquent toutes une combinaison de modulation de l'amplitude, de la fréquence et de la phase du champ électromagnétique. Le but ultime du traitement du signal est d'atteindre un niveau fiable de communication sans fil avec un taux d'erreur minimum entre deux nœuds du réseau, c'est-à-dire de minimiser la quantité de bits erronés par rapport au nombre total de bits transmis en fonction du rapport signal sur bruit du signal modulé. Des erreurs se produisent dans un canal de communication en raison de bruit, de présence d'interférences, de distorsion ou de problèmes de synchronisation.



**Figure 2 :** *Les applications privilégiées à court terme du LiFi sont là où la connectivité sans fil à haut débit doit être garantie et sécurisée ou lorsque les communications radio sont entravées ou interdites, comme c'est le cas dans certaines zones des hôpitaux. Source : APHP*

Dans le contexte du VLC, la lumière est émise par une LED et détectée soit par une photodiode ou une photodiode à avalanche en cas de faible irradiation, soit par une caméra, par exemple la caméra d'un téléphone mobile. Dans ce dernier cas, on parle de «Optical Camera Communication» (OCC). Avec de tels composants *front-end*, le VLC pose un défi délicat : contrairement à ce qui se passe dans le domaine des radiofréquences (RF), l'amplitude et la phase du champ électromagnétique émis par les LED ne peuvent pas être modulées et détectées séparément, en l'absence d'un oscillateur local de référence au point de détection. La transmission de données ne peut être réalisée que par la modulation et la détection directe de l'intensité lumineuse. Cela impose une contrainte sur le signal qui peut être utilisé pour moduler la LED par le biais de l'alimentation électrique : ce doit être un signal réel et strictement positif pour être transposé avec succès dans l'intensité lumineuse et cela limite la typologie des schémas de modulation admissibles par rapport aux technologies RF.

UNITED STATES  
FREQUENCY ALLOCATIONS  
THE RADIO SPECTRUM



**Figure 3 :** Carte d’attribution des fréquences aux Etats-Unis (échelle logarithmique). 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, plus généralement exprimée en longueur d’onde de 400 nm à 1,2  $\mu\text{m}$ , n’est pas régulée et peut être utilisée pour des communications lumineuses. Sources : US Department of Commerce [3]

La gamme des fréquences utiles pour le VLC, dans le proche infrarouge et le visible, n’est pas régulée et dépasse en largeur de bande de loin la gamme RF, qui va souffrir du « crunch spectral » dû à l’augmentation exponentielle des besoins en bande passante. C’est l’un des points clés en faveur du LiFi.

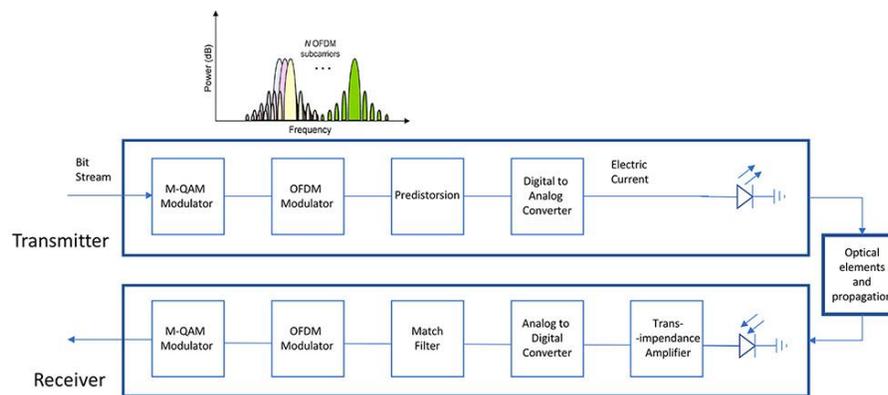
Enfin, la conception de la modulation de l’intensité lumineuse doit être conçue en tenant compte des caractéristiques du luminaire: la gradation doit être possible, aucun scintillement ne doit être perçu (réalisé avec une fréquence de modulation supérieure à 2kHz), l’aspect visuel des LED caractérisé par l’indice de rendu de couleur (IRC) et la température de couleur corrélée (CCT) ne doit pas être affecté, les pertes de puissance et la dissipation de chaleur doivent être minimisées. En effet, les systèmes LiFi doivent être conçus comme des systèmes d’éclairage dotés de capacités de communication, et non l’inverse.

### 3. Les Techniques de Modulation de LED

Les techniques de modulation sur porteuse unique (« Single Carrier Modulation » SCM) sont relativement simples à mettre en œuvre dans les communications par la lumière. On citera parmi d’autres les techniques dites « On-Off Keying » (OOK), « Pulse-Position », « Pulse-Width » et « Pulse-Amplitude ». Le contrôle de l’éclairage peut être pris en charge en ajustant les intensités lumineuses des états « on » et « off » à +/- 10% du niveau de base, sans affecter les performances du système. Différents types d’impulsions (symboles) sont utilisés, tels que les codes « Non-Return-to-Zero » ou Manchester.

La modulation OOK est la technologie de choix pour la communication par caméra, en vue d'applications telles que le marketing basé sur la géolocalisation pour lesquelles une quantité limitée d'informations contextuelles est transmise à un appareil mobile. Mais, pour la communication haut débit, les performances des techniques SCM se détériorent fortement à mesure que les débits augmentent. Ceci est dû en grande partie au fait que les composants *front-end* utilisés sont sur étagère et à faible coût, avec des non-linéarités tension/luminance importantes et une bande passante de modulation limitée pour l'architecture des luminaires LED standards. C'est une caractéristique très différente des systèmes RF, pour lesquels la principale source de non-linéarité est l'amplificateur de puissance. Des techniques d'égalisation sophistiquées avec différents degrés de performance et de complexité de calcul, ainsi que de consommation d'énergie, sont nécessaires pour que les techniques SCM soient efficaces à des débits de données élevés, ce qui les rend en pratique rédhibitoires. L'association de normalisation IEEE a développé la norme 802.15.7 [4] pour ce type de communication par la lumière à courte distance et bas débit.

Pour la communication optique sans fil à haut débit, la modulation multi- porteuse (« Multi Carrier Modulation » MCM) est privilégiée. La technologie développée par Lucibel et PureLiFi repose sur le principe « Orthogonal Frequency Division Multiplexing » (OFDM) [5][6], par lequel des flux de données parallèles sont transmis simultanément à travers une série de sous-porteuses orthogonales. Les spectres des sous-porteuses individuelles se chevauchent, mais en raison de la propriété d'orthogonalité, les sous-porteuses peuvent être démodulées sans interférence. L'espacement des sous-porteuses est l'inverse de la durée de symbole et leur largeur de bande est conçue de sorte qu'elle soit plus petite que la largeur de bande de cohérence d'un canal afin d'omettre des circuits d'égalisation complexes.



**Figure 4 :** Schéma fonctionnel d'un dispositif LiFi à haut débit. Grâce à la répartition du signal parmi une collection de sous-porteuses, l'OFDM est une technique qui permet de transmettre beaucoup plus de signaux dans une porteuse de fréquence donnée que les techniques de modulation à porteuse unique. Les fréquences des sous-porteuses sont choisies de sorte que les signaux soient mathématiquement orthogonaux sur une période de symbole donnée. Chaque sous-porteuse est modulée sur le principe de modulation d'amplitude en quadrature (QAM). La pré-distorsion est utilisée pour linéariser la réponse de la LED. Adapté de [7]

Au niveau de la LED, la technique de modulation d'amplitude en quadrature (« Quadrature Amplitude Modulation » QAM) est utilisée pour coder sur les sous-porteuses les données sous forme de symboles. La QAM introduit de la complexité mais est plus robuste à haut débit au bruit que d'autres solutions. Les symboles parallèles peuvent ensuite être multiplexés dans le domaine temporel en utilisant une transformation de Fourier rapide inverse (IFFT) et ensuite démultiplexés après transformation de Fourier au niveau du récepteur. Un préfixe cyclique est ajouté au début de chaque symbole OFDM dans le domaine temporel avant la transmission, ce qui élimine à la fois les interférences inter-symboles et inter-canaux du signal reçu.

L'OFDM est une technique bien connue, utilisée dans les protocoles de communication RF pour les communications WiFi, courants porteurs en ligne et 4G, et sa mise en oeuvre pour la communication par la lumière est presque équivalente à une différence près qui s'avère très importante : en RF, l'OFDM génère des signaux négatifs et positifs (bipolaires) complexes, incompatibles avec la modulation de l'intensité d'une LED, qui demande un signal réel et positif. Grâce à une symétrisation, le signal temporel passe dans le domaine réel mais au prix d'une réduction de moitié de la bande passante du système. Un moyen simple de rendre un signal bipolaire strictement positif consiste à introduire un biais de courant continu autour duquel le signal bipolaire d'origine peut varier. Ce schéma est connu sous le nom de « DC-biased Optical OFDM » (DCO-OFDM). De nombreuses variantes de l'OFDM ont été développées ces dix dernières années afin de fournir des alternatives énergétiquement et spectralement plus efficaces. C'est toujours un sujet de recherche intense [8]. Un groupe de travail de l'association de normalisation IEEE explore l'ajout de protocoles de communication par la lumière aux normes WiFi 802.11 pour les communications sans fil [9][10]. **En s'appuyant sur certaines des couches du protocole WiFi, la norme LiFi pourrait être rapidement mise en oeuvre.**

Outre ses nombreux avantages, l'OFDM présente néanmoins plusieurs inconvénients, tels que le rapport de puissance crête à puissance moyenne élevé qui impose une large dynamique à de nombreux composants de l'émetteur et du récepteur. Un traitement du signal très rapide est nécessaire pour effectuer des transformations de Fourier et la conception des convertisseurs analogique-numérique est critique en raison de la complexité du signal et de la précision requise. Toutes ces exigences impliquent un coût mais cette technologie bénéficie d'un effet d'échelle, comme en témoigne le prix des composants WiFi dont le coût est passé de 50\$ en 2000 à moins de 3\$ en 2017 pour un composant WiFi + Bluetooth relativement complexe.

## 4. Le LiFi comme solution de communication

**Le LiFi n'est pas seulement un câble photonique virtuel, c'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 connections potentielles très élevée. Chaque luminaire LiFi est un point d'accès [11].**

Pour la communication multi-utilisateurs, l'OFDM optique fournit nativement une technique d'accès multiple appelée OFDMA, qui est également la méthode d'accès pour la nouvelle norme WiFi 802.11ax, où les utilisateurs de données diffusées par un luminaire donné sont séparés par un certain nombre de sous-porteuses orthogonales.

D'autres technologies d'accès multi-utilisateurs peuvent également être utilisées.

Pour un système de communication LiFi complet, une communication en mode duplex est nécessaire, c'est-à-dire qu'une connexion montante des terminaux mobiles au point d'accès optique doit être fournie. Les techniques de duplex RF où la liaison descendante et la liaison montante sont séparées par des créneaux temporels différents ou des bandes de fréquences différentes pourraient être transposées. Mais l'émission d'une lumière blanche intense par le terminal récepteur n'est pas acceptable en pratique. Une solution, retenue par Lucibel et PureLiFi, consiste à utiliser la modulation de la lumière visible pour la liaison descendante et la modulation d'une LED IR pour le canal de communication montante. L'utilisation de la communication RF pour la liaison montante est également une option dans certaines configurations, car il existe souvent un déséquilibre du trafic dans les systèmes de communication sans fil actuels qui rend le canal de liaison montante considérablement moins sollicité.

Dans les communications sans fil RF, le réseau est distribué spatialement sur des cellules, chacune desservie par au moins une station de base fixe. En 4G LTE, afin d'améliorer l'accès des utilisateurs, le réseau est densifié par l'addition de cellules de différentes tailles appelées macro-, micro-, pico- et femto-cells dans l'ordre décroissant de la puissance de la station de base. L'objectif est de donner la possibilité aux utilisateurs d'avoir une bande passante élevée sans être tous connectés sur le même point d'accès, qui a une capacité fixée. Mais cela génère des interférences inter et intra-cellulaire, et leur réduction est l'un des défis les plus critiques pour le fonctionnement simultané de ces cellules. Les réseaux sans fil de nouvelle génération 5G devraient par ailleurs voir l'incorporation du WiFi dans des réseaux dits hétérogènes.

Le concept de cellule est facilement transposable au LiFi et le point d'accès optique associé à un luminaire LiFi est fréquemment appelé « attocell » en raison de sa petite taille, qui est la zone éclairée par un luminaire. Grâce à la forte densité des luminaires et à l'éclairage presque uniforme, les attocells optiques peuvent améliorer considérablement la couverture et la densité de connections sans interférence. Dans une configuration mixte LiFi/WiFi [12], le LiFi soulage le réseau WiFi de façon à maintenir la qualité de service pour l'utilisateur. **Chaque utilisateur bénéficie de la bande passante disponible au niveau de chaque luminaire, sans avoir à la partager avec son voisin situé sous un autre luminaire. Cette idée de « densification des connections » est un point clé pour le LiFi par rapport au WiFi, au même titre que le débit par luminaire.**

De plus, alors que des techniques complexes de formation de faisceau sont développées pour les systèmes sans fil RF de prochaine génération (5G) afin d'assurer la connexion à haut débit, c'est une fonctionnalité native pour les communications par la lumière. Il faut noter que, à l'instar des systèmes RF, le MIMO (« Multiple Input-Multiple Output ») en LiFi et plus généralement en VLC est susceptible d'apporter une amélioration du débit [13].

Toutes ces caractéristiques font du LiFi un facilitateur crucial de la mobilité intérieure avec une qualité de service pour l'utilisateur encore inégalée.

## 5. Performances et perspectives

Lucibel a développé avec son partenaire PureLiFi un luminaire LiFi commercial entièrement fonctionnel pour des applications d'entreprise, commercialisé depuis septembre 2016. Il s'agit du premier luminaire LiFi sur le marché mondial.

Le luminaire Lucibel Ores LiFi [14] implémente des technologies propriétaires pour effectuer une modulation efficace spectralement et énergétiquement de la lumière blanche de la LED pour la liaison descendante, et d'une LED infrarouge au niveau du récepteur pour la liaison montante. Le débit maximum est de 42 Mbps (mégabits par seconde) en bidirectionnel et jusqu'à huit utilisateurs peuvent se connecter à chaque luminaire, c'est à dire sur une surface très petite alors qu'un point d'accès WiFi, s'il couvre une surface plus large, doit aussi accomoder bien plus d'utilisateurs qui se partagent un débit maximum donné. La fonction dimming est assurée pendant la transmission de données. Les communications sont cryptées avec les protocoles d'authentification WPA2 standards. Pour une hauteur de plafond de 2,5 m, le diamètre au sol de l'attocell est de 3 m.



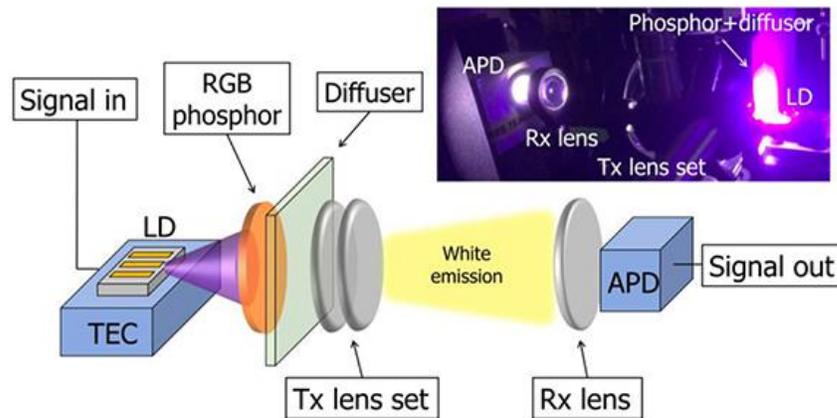
**Figure 5 :** *Le premier luminaire LiFi commercial, par Lucibel et PureLiFi, a été mis sur le marché en septembre 2016. La performance nominale est de 42 Mbps en liaison descendante et en liaison montante dans une géométrie d'éclairage standard à une hauteur de 2,5 m. Huit utilisateurs peuvent être servis simultanément par un luminaire. Le canal de liaison montante se trouve dans la bande proche infrarouge pour éviter l'éblouissement par le récepteur USB connecté à un ordinateur portable ou à une tablette.*

Des caractéristiques telles que les dimensions de clé de réception et le protocole de transfert entre points d'accès seront améliorées dans la deuxième génération LiFi by Lucibel, qui sera lancée en septembre 2018, avec une nouvelle architecture électronique à haut rendement énergétique. D'autres produits, tels que des panneaux 600x600mm<sup>2</sup> et des luminaires sur pied seront mis sur le marché pour élargir la gamme des installations et des cas d'utilisation. Une API LiFi mise à jour améliorera la configuration et la gestion du réseau et fera du système LiFi une composante du système de gestion de l'éclairage développé par Lucibel.

Le luminaire LiFi est compatible avec la technologie PoE (« Power over Ethernet ») qui permet de transmettre à travers un seul câble RJ45 à la fois les données et l'alimentation électrique, minimisant ainsi le câblage nécessaire au déploiement d'une infrastructure de réseau LiFi, et réduisant les coûts d'installation. Les architectures PoE sont également plus économes en énergie.

Tous les composants du système LiFi ont un impact sur les performances en matière de débit et de consommation d'énergie mais, en environnement maîtrisé en laboratoire, une fois la meilleure technologie de modulation sélectionnée, le facteur le plus important est la réponse en fréquence de la LED. Une fréquence de modulation basse se traduit par un débit inférieur, bien que la relation ne soit pas directe et que les données publiées ne soient pas facilement comparables. Des techniques d'égalisation améliorent la fréquence de cutoff à 3dB, mais au détriment de l'efficacité énergétique. Différentes méthodes sophistiquées de traitement du signal peuvent augmenter la fréquence de modulation et le débit, mais elles ne sont souvent ni compatibles avec l'ergonomie de l'émetteur et du récepteur, ni compétitives en termes de coût.

Les LED bleues commerciales, recouvertes d'un phosphore jaune pour produire de la lumière blanche, ont des largeurs de bande de modulation limitées à quelques MHz en raison des longues durées de photoluminescence des phosphores. L'application d'un filtre bleu sur le récepteur supprime la composante lente du signal et permet d'atteindre des fréquences de modulation allant jusqu'à 20 MHz [12]. C'est la technologie standard utilisée dans le luminaire Ores LiFi de Lucibel. Plusieurs stratégies sont poursuivies pour améliorer la performance de modulation.



**Figure 6 :** *Expérience de mise en évidence de la communication en lumière blanche à un débit supérieur au gigabit par seconde, fondée sur une diode laser en UV proche et des phosphores émettant en rouge, vert et bleu [15]. Les caractéristiques de la lumière blanche sont en ligne avec celles des luminaires LED commerciaux standards.*

Les micro-LED peuvent offrir des bandes passantes de modulation optique supérieures à 600 MHz grâce à leurs zones actives de faibles dimensions [16]. Elles peuvent être positionnées en réseau pour permettre une communication multicanaux, ce qui peut être intéressant pour la communication entre l'écran d'un mobile et des écrans ou de la signalétique.

Une autre façon de créer de la lumière blanche est de mélanger optiquement les émissions de trois LED ou micro-LED rouge, verte et bleue. Pour le LiFi, ceci présente deux avantages principaux : il n’y a pas besoin de convertisseur au phosphore limitant la bande passante et les trois LED peuvent être modulées séparément, permettant ainsi la transmission de trois flux d’information indépendants et parallèles [17].

Mais le meilleur moyen d’améliorer la réponse en modulation est d’utiliser des diodes laser GaN, car leur vitesse de modulation est contrôlée par la durée de vie des photons, de l’ordre de la ps, au lieu de la durée de vie des porteurs pour les LEDs, de plusieurs ordres de grandeur supérieure. Une fréquence de modulation de 2,6 GHz a été reportée [18] et 15 Gbps (Giga bits par seconde) ont été transmis en lumière bleue [19]. Alors que les diodes laser sont aujourd’hui une option coûteuse pour l’éclairage intérieur, leur coût devrait être réduit de façon exponentielle au cours des cinq prochaines années en raison de la demande du marché pour des applications telles que l’éclairage automobile, les projecteurs et le LIDAR pour les voitures autonomes.

Technologie	Débit	Référence
LED bleue et traitement phosphore	1.1 Gbps	[20]
μLED et conversion de couleur	1.7 Gbps	[21]
LEDs et μLEDs multicolores R(Y)GB	2 – 11.3 Gbps	[17] [22][23]
Diode laser et conversion de couleur	1 - 4 Gbps	[15] [24]

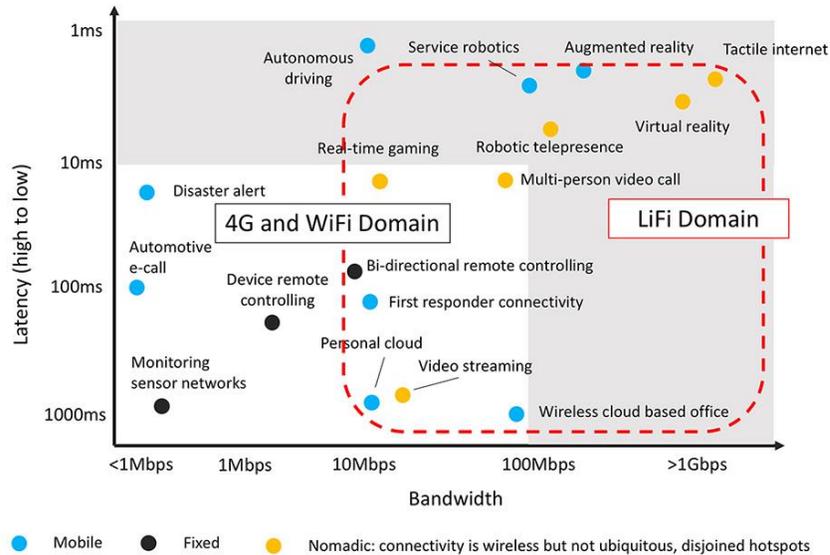
**Table 1 :** Vitesses de transmission de données en lumière blanche pour diverses technologies d’éclairage à semi-conducteurs. À l’exception des LED bleues couvertes de phosphore qui constituent la référence pour les luminaires LED commerciaux actuels, les autres technologies sont en phase de démonstration pour les applications d’éclairage.

Toutes ces technologies ont été évaluées en laboratoire pour l’émission de lumière blanche, la modulation d’intensité et le transfert de données vers une photodiode. La faisabilité de la transmission de données par LiFi au delà du Gbps est établie, avec des travaux en cours y compris par Lucibel en vue de la commercialisation de produits sous peu. Avec des diodes laser, des débits de données supérieurs à 100 Gbps sont envisagés [25]. Les développements dans les domaines de la conception et de la fabrication des LED [26][27], des diodes laser [28], des convertisseurs de couleur [29] et des systèmes optiques d’émission et de détection [30][31], ainsi que dans le domaine du traitement du signal [13], sont suivis de près par les équipes de Lucibel pour identifier et mettre à jour la meilleure technologie disponible afin d’intégrer le LiFi le plus performant dans son offre.

## 6. Cas d’Usage : vers des marchés de masse

Le VLC fait l’objet de recherches et de développements intenses depuis plus de 15 ans, avec des améliorations constantes en termes de performances, de coût, de fiabilité et de compacité des composants. Alors que de nombreuses applications ont été imaginées, telles que les communications entre véhicules ou la transmission de données sous-marines, le développement exponentiel de l’éclairage par LED a orienté les développements à court terme vers les cas d’usage les mieux définis et avec le plus de valeur pour les utilisateurs.

Lucibel a installé des luminaires LiFi chez plus de 50 clients, acquérant ainsi une expérience unique sur les cas d'utilisation et l'apport de valeur de cette première génération de produits LiFi. Combinée à celle de son partenaire PureLiFi, il s'agit de la base installée la plus importante au monde qui fournit des données très précieuses pour permettre à Lucibel de préserver et même d'accroître son avantage concurrentiel.



**Figure 7 :** Caractéristiques de la demande d'accès aux réseaux pour les technologies RF (4G LTE et WiFi 2.4 et 5 GHz) et LiFi. Sa faible latence intrinsèque et la perspective d'un très grand débit font du LiFi une technologie de référence pour le streaming vidéo et l'accès au cloud, ainsi que pour des cas d'utilisation émergents, tels que la réalité virtuelle et les applications robotiques dans l'industrie, les bureaux ou dans les espaces publics. Sources : AT&T [32], Lucibel

Les clients de Lucibel utilisent le LiFi comme un complément ou une alternative au WiFi et à la 4G, dans des environnements où l'échange de données doit être parfaitement sécurisé (banques, centres de R&D, Défense, ...), où les ondes radio sont interdites ou d'usage restreint (hôpitaux, écoles maternelles, installations industrielles sensibles aux radiations électromagnétiques telles que les stations de compression de gaz naturel) et où la connectivité doit être garantie (salles de conférence, hôtels). Des configurations telles que la communication entre trains sont également envisagées.

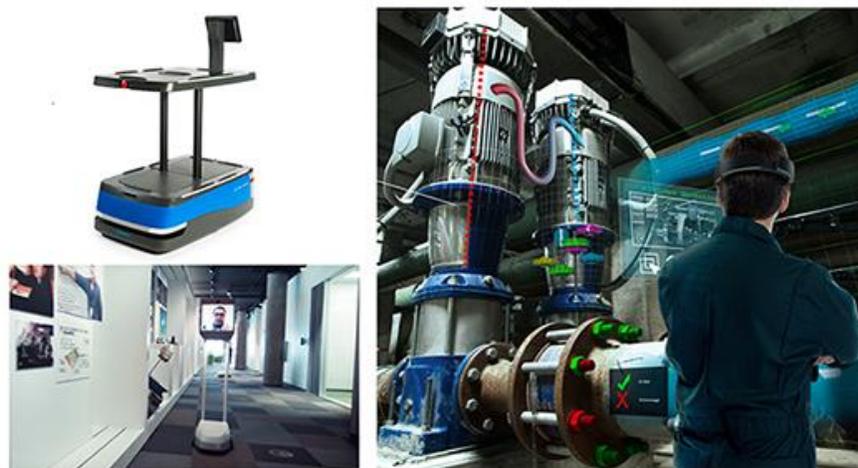
Le choix des cas d'usage est motivé par le fait que, d'une part, la communication par la lumière est sans interférences et non régulée et, d'autre part, les communications se produisent exclusivement dans le cône de lumière, ce qui apporte en particulier une garantie de sécurité fondamentale [33] alors même que les hackers s'attaquent de plus en plus aux réseaux et aux équipements WiFi. Les limites évidentes de la technologie, telles que le fait que la lumière doit être allumée au minimum à 30% de sa puissance maximum, doivent être reconnues et constituent de simples conditions limites parmi les nombreux cas d'usage.

Il n'y a pas encore de réalisation à grande échelle dans le résidentiel. Il est nécessaire pour cela d'atteindre des réductions de coûts supplémentaires, une miniaturisation accrue et l'intégration des composants du récepteur dans des appareils électroniques grand public, ce qui devrait se produire à l'horizon 2020.

La vitesse de transmission des données du LiFi par Lucibel, dans la gamme 10-50 Mbps, et la densité des points d'accès et donc des connections, positionnent le LiFi comme un élément clé de la transformation digitale des entreprises et des infrastructures. Trois chiffres donnés par Cisco explicitent la demande globale sans cesse croissante de débit en mobilité [34] : d'ici 2021, plus de la moitié des 17 milliards d'appareils connectés seront mobiles, 65 % du trafic IP proviendra des appareils mobiles, 80 % du trafic Internet sera de la vidéo nécessitant une connexion sans fil à haut débit et le débit sans fil moyen sera de 20 Mbps. Le streaming vidéo mobile et l'accès au cloud personnel sont des domaines dans lesquels le LiFi excelle. Avec une population dans les pays industrialisés passant plus de 90% de son temps en intérieur, l'éclairage est appelé à devenir une infrastructure de communication de choix.

Avec le LiFi, les technologies d'éclairage à LED offrent un surcroît valeur aux clients pour les inciter à passer de l'éclairage incandescent et fluorescent à des LED beaucoup plus efficaces et économiques. Cela sera un facteur important pour augmenter la pénétration des LED dans les bâtiments existants où la demande pour la première génération d'éclairage intelligent a été jusqu'à présent assez faible. La forte demande pour un accès à Internet de haute qualité et à haute vitesse pourrait accélérer les programmes de rénovation d'éclairage.

**Mais ce qui fait du LiFi une technologie encore plus prometteuse, c'est la possibilité d'atteindre, avec une prochaine génération de produits LiFi by Lucibel, des vitesses de transmission et de réception de l'ordre de 1 à 100 Gbps avec une très faible latence inhérente aux technologies optiques. De nouveaux cas d'usage vont se concrétiser rapidement.**



**Figure 8 :** Nouveaux cas d'utilisation pour le LiFi : robot de service en entrepôt, téléprésence robotisée, réalité augmentée. Les images sont uniquement à des fins d'illustration. Sources : 6 River Systems, Suitable Technologies, Diota

La téléprésence robotisée au bureau est un parfait exemple de synergie entre les fonctions d'éclairage et de communication de la solution LiFi de Lucibel. Dans l'espace de travail, l'éclairage est omniprésent et le LiFi dispose d'une couverture garantie sur l'ensemble de l'espace avec une bande passante minimum élevée, sans interférence ni déconnexion, parfaitement adaptée au streaming vidéo. De plus, le LiFi, et plus généralement les technologies VLC, ont la capacité inhérente de localiser des appareils au niveau d'un luminaire, mais avec une précision bien supérieure, centimétrique, grâce à du traitement du signal [35] [36]. Ceci est fondamental pour de nombreuses applications, car les technologies RF indoor sont de loin moins précises [37].

En ce qui concerne l'internet des objets (IoT), si le débit du LiFi se situe bien au-delà des besoins pour connecter des appareils tels que des thermostats et des détecteurs de présence qui ont des besoins d'échange de données inférieurs à 10 kbps, la densité de connections potentielles est telle que de très nombreux appareils peuvent se connecter sur un seul point d'accès et agréger leur débit. Ces appareils peuvent même capter l'énergie des LED ou des diodes laser via le canal de communication [38] [39], ce qui est fondamental car l'alimentation en énergie est un problème loin d'être résolu dans le secteur de l'IoT. La communication par la lumière est également possible directement entre objets.

Le LiFi en tant que moyen de communication à haut débit est extrêmement bien placé pour être une solution de choix pour l'IoT industriel, par exemple pour alimenter et collecter des données 3D vers et à partir de dispositifs de réalité augmentée (AR) au service des employés sur un site industriel.

**Lucibel construit avec ses partenaires, start-up et sociétés établies désireuses d'innover, un écosystème pour amener progressivement sur le marché les produits qui vont alimenter la pénétration à grande échelle du LiFi à travers tout l'éventail des cas d'usage évoqués ci-dessus, et bien d'autres sans doute. Les premières étapes consistent à sensibiliser sur la technologie, à faire connaître son potentiel et ses limites, à mettre en œuvre rapidement les enseignements tirés des premiers déploiements et à former les installateurs aux compétences nécessaires pour construire des projets à la confluence des technologies d'éclairage et de communication. La normalisation du LiFi via le groupe de travail IEEE 802.11 est aussi un élément important pour accélérer le déploiement à grande échelle de la technologie.**

*A propos de Christophe Jurczak*



Ancien élève de l'Ecole Polytechnique et de l'Ecole Normal Supérieure, Christophe Jurczak est également titulaire d'un doctorat en physique quantique. Après avoir débuté au Ministère de la Défense en tant que responsable de programmes en optronique, Christophe Jurczak a mené une carrière en Europe et aux Etats-Unis qui l'a notamment conduit à mettre en œuvre des technologies innovantes au service de nouveaux modèles d'affaire dans le secteur de l'énergie. Basé à Palo Alto (Californie), Christophe Jurczak est Directeur Scientifique de Lucibel depuis février 2017.

## Références

- [1] National Academies of Sciences Engineering and Medicine, *Assessment of solid state lighting, part II*. 2017.
- [2] H. Haas, “TED Talk - Wireless data from every light bulb,” 2011.
- [3] United States Department of Commerce, “United states frequency allocation chart,” 2016.
- [4] IEEE Standards Association, “Standard for local and metropolitan area networks - part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light,” 2011.
- [5] J. Armstrong, “OFDM for optical communications,” *Journal of lightwave technology*, vol. 27, no. 3, pp. 189–204, 2009.
- [6] M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, and D. Knipp, “Visible light communication using OFDM,” in *TRIDENTCOM 2006*, pp. 6–pp, IEEE, 2006.
- [7] H. Hass, “Li-fi modulation and networked li-fi attocell concept,” 2012.
- [8] M. S. Islam and H. Haas, “Modulation techniques for li-fi,” *ZTE Commun*, vol. 14, no. 2, pp. 29–40, 2016.
- [9] IEEE Standards Association, “Status of IEEE 802.11 Light Communication Study Group,” 2017.
- [10] H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, “VLC: Beyond point-to-point communication,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 7, pp. 98–105, 2014.
- [11] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi*. Cambridge University Press, 2015.
- [12] M. Ayyash, H. Elgala, A. Khreishah, V. Jungnickel, T. Little, S. Shao, M. Rahaim, D. Schulz, J. Hilt, and R. Freund, “Coexistence of wifi and lifi toward 5G: Concepts, opportunities, and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64–71, 2016.
- [13] R. Zhang, “Localisation, communication and networking with VLC: Challenges and opportunities,” *arXiv preprint arXiv:1709.01899*, 2017.
- [14] Lucibel, “Ores LiFi technical datasheet,” 2017.
- [15] C. Lee, C. Shen, C. Cozzan, R. M. Farrell, J. S. Speck, S. Nakamura, B. S. Ooi, and S. P. DenBaars, “Gigabit-per-second white light-based visible light communication using near-ultraviolet laser diode and red-, green-, and blue-emitting phosphors,” *Optics Express*, vol. 25, no. 15, pp. 17480–17487, 2017.
- [16] M. S. Islam, R. X. Ferreira, X. He, E. Xie, S. Videv, S. Viola, S. Watson, N. Bamiedakis, R. V. Penty, I. H. White, *et al.*, “Towards 10 gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED,” *OSA*, 2017.

- [17] G. Cossu, A. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella, “3.4 gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED,” *Optics express*, vol. 20, no. 26, pp. B501–B506, 2012.
- [18] C. Lee, C. Zhang, M. Cantore, R. M. Farrell, S. H. Oh, T. Margalith, J. S. Speck, S. Nakamura, J. E. Bowers, and S. P. DenBaars, “4 gbps direct modulation of 450 nm GaN laser for high-speed visible light communication,” *Optics express*, vol. 23, no. 12, pp. 16232–16237, 2015.
- [19] S. Viola, M. S. Islim, S. Watson, S. Videv, H. Haas, and A. E. Kelly, “15 gb/s OFDM-based VLC using direct modulation of 450 GaN laser diode,” in *Advanced Free-Space Optical Communication Techniques and Applications III*, vol. 10437, p. 104370E, International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [20] A. Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury and E. Ciaramella, “1 gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 1465–1473, 2012.
- [21] H. Chun, P. Manousiadis, S. Rajbhandari, D. A. Vithanage, G. Faulkner, D. Tsonev, J. J. D. McKendry, S. Videv, E. Xie, E. Gu, *et al.*, “Visible light communication using a blue GaN micro LED and fluorescent polymer color converter,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 20, pp. 2035–2038, 2014.
- [22] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, D. Tsonev, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, D. C. O’Brien, and H. Haas, “LED based wavelength division multiplexed 10 gb/s visible light communications,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 13, pp. 3047–3052, 2016.
- [23] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, and N. Chi, “8-gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order cap modulation and hybrid post equalizer,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1–7, 2015.
- [24] Y.-C. Chi, Y.-F. Huang, T.-C. Wu, C.-T. Tsai, L.-Y. Chen, H.-C. Kuo, and G.-R. Lin, “Violet laser diode enables lighting communication,” *Scientific Reports*, vol. 7, 2017.
- [25] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, “Towards a 100 gb/s visible light wireless access network,” *Optics Express*, vol. 23, no. 2, pp. 1627–1637, 2015.
- [26] C.-K. Li, M. Piccardo, L.-S. Lu, S. Mayboroda, L. Martinelli, J. Peretti, J. S. Speck, C. Weisbuch, M. Filoche, and Y.-R. Wu, “Localization landscape theory of disorder in semiconductors. iii. application to carrier transport and recombination in light emitting diodes,” *Physical Review B*, vol. 95, no. 14, p. 144206, 2017.
- [27] G. Lozano, S.R. Rodriguez, M.A. Verschuuren and J.G. Rivas, “Metallic nanostructures for efficient LED lighting”, *Light Science & Application*, vol. 5, no. 6, p. 16080, 2016.
- [28] C. Lee, C. Zhang, D. L. Becerra, S. Lee, C. A. Forman, S. H. Oh, R. M. Farrell, J. S. Speck, S. Nakamura, J. E. Bowers, *et al.*, “Dynamic characteristics of 410 nm semipolar (20 2<sup>-</sup> 1<sup>-</sup>) iii-nitride laser diodes with a modulation bandwidth of over 5 ghz,” *Applied Physics Letters*, vol. 109, no. 10, p. 101104, 2016.

- [29] M. F. Leitaó, J. M. Santos, B. J. E. Guilhabert, S. Watson, A. E. Kelly, M. S. Islam, H. Haas, M. D. Dawson, and N. Laurand, “Gb/s visible light communications with colloidal quantum dot color converters,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017.
- [30] M. Lestoquoy, *Multimaterial Fiber Electronics*, PhD thesis, MIT, 2014.
- [31] Y. Fink, “LiFi – Lighting Up the Digital Highway System,” 2017.
- [32] AT&T Foundry, “Enabling mobile augmented and virtual reality with 5G networks,” 2017.
- [33] Z. Chen, and H. Haas, “Physical layer security for optical attocell networks,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-6, IEEE, 2017.
- [34] CISCO, “Complete visual networking index forecast,” 2017.
- [35] T.H. Do, and M. Yoo, “An in-depth survey of visible light communication based positioning systems,” *Sensors*, vol. 16, no. 5, p.678, 2016.
- [36] B. Lin, X. Tang, Z. Ghassemlooy, C. Lin, and Y. Li, “Experimental demonstration of an indoor VLC positioning system based on OFDMA,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1–9, 2017.
- [37] J. Hu, C. Gong, and Z. Xu, “Demonstration of a robot controlling and positioning system based on visible light,” in *8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [38] H. G. Sandalidis, A. Vavoulas, T. A. Tsiftsis, and N. Vaiopoulos, “Illumination, data transmission, and energy harvesting: the threefold advantage of VLC,” *Applied Optics*, vol. 56, no. 12, pp. 3421–3427, 2017.
- [39] X. Xu, Y. Shen, J. Yang, C. Xu, G. Shen, G. Chen, and Y. Ni, “Passive VLC: Enabling practical visible light backscatter communication for battery-free IoT applications,” in *MobiCom '17*, 2017.

9, avenue Edouard Belin  
92500 Rueil-Malmaison  
FRANCE

---

[www.lucibel.io](http://www.lucibel.io)