DESCRIPTIF DÉTAILLÉ DE LA THÈSE

Unité de recherche : LISV (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes – EA4048) / UVSQ
Localisation : Vélizy-Villacoublay (78140 France)
Partenaire industriel : OLEDCOMM
Contacts scientifiques :
Luc CHASSAGNE, Professeur et Directeur du LISV, luc.chassagne@uvsq.fr
Hongyu GUAN, Ingénieur de recherche LISV, hongyu.guan@lisv.uvsq.fr

Etude et développement d'un réseau sécurisé et agile de cellules LiFi à grand nombre de point d'entrée

Contexte général du LiFi

Avec l'apparition récente des éclairages à LEDs et leur démocratisation dans tous les environnements (maisons, usines, milieu des transports, grands espaces publics), des techniques dites 'VLC' (Visible Light Communications) ou LiFi (Light Fidelity) font l'objet d'études depuis quelques années afin de transmettre de l'information par voie optique par le même support que l'éclairage. Les canaux optiques par LEDs peuvent être très faible coût car déjà installés, et très performants tant au niveau débit qu'au niveau fiabilité et sécurité intrinsèque.
Cette nouvelle technologie présente de nombreux atouts complémentaires aux liaisons sans fil traditionnelles type Wi-Fi, Bluetooth ou GSM car elle n'est pas sujette aux mêmes réglementations de bande de fréquence d'une part, et permet des liens ponctuels d'autre part ce qui peut assurer un premier niveau de sécurité.

Les laboratoires de recherches dans le domaine ont développé plusieurs pistes d'études pour tirer avantage des propriétés de la lumière. On peut citer par exemple :

- Des travaux sur des liaisons haut-débit voir très haut débit (plusieurs Gb/s en laboratoire) en point à point [1]. La bande passante théorique disponible est extrêmement vaste et libre à ce jour, et les sources à disposition sont modulables à très hautes fréquences potentiellement.
- Des travaux sur des points d'accès à très grands nombres d'utilisateurs pour tirer bénéfices de la grande disponibilité des points d'accès et la bande passante importante [2].
- Des travaux sur de nouvelles sources (LEDs blanche à base de laser bleu, système multi-couleur, diodes laser non dangereuses pour l'œil, microled, [3]), ou également des systèmes de photodétection performants (adaptation optique à large ouverture, SPADs, etc [4]).
- Des travaux sur de nouvelles modulations plus propices à optimiser les propriétés de la lumière par rapport à celles utilisées avec les radiofréquences [5].
- Des travaux sur les IoT et des transmissions bas débit sécurisées pour tirer bénéfice des LEDs présentes dans tous les objets du quotidien [6].
- Des travaux sur la géolocalisation « indoor » grâce au réseau d'éclairage des bâtiments [7].

L'ensemble de ces travaux de recherche suit différentes pistes de développement et certains produits ont déjà vu le jour, commercialisé par quelques entreprises. Les applications sont nombreuses dans divers domaines (transports, sécurité, milieu du bâtiment, etc).

Travaux développés au LISV récemment et précurseurs du sujet de thèse

Dans ce contexte, le LISV a été précurseur sur le domaine en France et dans le monde par des premières études dès 2007, principalement associées au milieu automobile au travers de la transmission de données véhicule-véhicule ou véhicule-infrastructure à l'aide des phares à LEDs.
Le LISV a également conduit des travaux récents (thèse de Mounir MOHAMMEDI MERAH, 2019 [8]) sur les liaisons haut-débit (environ 300 Mb/s) avec une source blanche d'éclairage standard. La thèse a démontré les capacités de transmission d'une cellule LiFi d'environ 4 m^2 de surface de

réception, avec un nombre d'utilisateurs pouvant atteindre 20. Les travaux ont également démontré que grâce à des modulations et protocoles d'accès moins usuels que ceux développés pour les ondes RF (modulation m-CAP et accès SCM-SubCarrier Multiplexing par exemple), les propriétés de la porteuse lumineuse pouvaient permettre une allocation plus agile et correspondant au plus près à la demande des utilisateurs. Le critère de la qualité de service peut être ainsi mieux assuré et mis en avant, car l'allocation des canaux plus simple et directe. Ce critère de qualité de service est un point essentiel.

Sujet de thèse proposé

L'objectif de la thèse serait de modéliser, optimiser et réaliser un prototype de test d'un réseau multi-cellules LiFi (entre 5 et 10 couvrant plusieurs pièces) qui permettrait d'assurer une qualité de service pour un nombre important d'utilisateurs (40/cellule).

En se basant sur les travaux issus de la thèse précédente et des prototypes réalisés par OLECOMM, il est raisonnable d'envisager :

- Un débit par cellule de 1 Gb/s (démonstrateur prototype à 650 Mb/s grâce à une source VCSEL),
- Une taille de cellule d'environ 8 m^2,
- Un nombre d'utilisateurs de 40/cellule (20 démontré dans la précédente thèse, 40 potentiels modélisé à ce jour).

Les nouveaux défis scientifiques proposés dans le cadre de ces travaux sont multiples :

- Modéliser et optimiser la couche physique pour l'accès à une cellule afin de monter les performances. À ce jour, la limite de 300 Mb/s provient essentiellement de la source blanche d'éclairage qui n'a qu'une bande passante de 1,4 MHz. Les techniques utilisées pour dépasser cette limite (pré-égalisation, post-égalisation, utilisation de modulation type m-CAP) doivent être optimisées. Des pistes ont été explorées au travers par exemple de l'utilisation de réseaux de neurones sur la partie post-égalisation [9]. Les premiers démonstrateurs haut-débit (650 Mb/s) grâce à l'utilisation de diode VCSEL sont prometteurs également, il est nécessaire de pousser les recherches en ce sens. Les diodes laser présentent l'avantage de pouvoir être modulées plus haut en fréquence mais ne sont pas dédiées à l'éclairage à la base. L'utilisation récente de VCSEL peut être une piste intéressante.
- Modéliser la gestion du multi-utilisateurs au niveau de la couche dite MAC de la liaison. L'objectif est de 40/cellule, ce qui parait raisonnable au vu des premiers résultats de la thèse précédente. Néanmoins, une autre difficulté peut résider dans l'hétérogénéité des utilisateurs tout en gradant la même qualité de service. Pour qu'une cellule soit performante, il est intéressant qu'elle puisse gérer aussi bien des IoT à très bas débit mais à signal très faible potentiellement pour des raisons d'économie d'énergie, que des points d'accès type ordinateurs à très haut-débit. L'agilité en terme de protocole est donc un point clé qu'il s'agira d'examiner dans les modélisations. Les liaisons LiFI en point à point et sur une zone très précise permettent d'envisager des allocations personnalisées pus performantes comme cela a été démontré dans [8].
- Une autre caractéristique des cellules LiFi qui n'a pas encore été réellement examinée est la robustesse à la coupure du signal. Le lien direct est en effet en même temps un avantage mais également un inconvénient. Une coupure du signal peut arriver à tout moment (main qui coupe le faisceau, rotation intempestive de l'élément de réception par exemple). Il est alors indispensable que la connexion puisse être ré-établie avec une latence très faible (quelques ms dans l'idéal). Ces aspects à notre connaissance n'ont que très peu été prospectés à ce jour. Ils dépendent là aussi beaucoup des types de modulation et protocole d'accès mais également du rapport signal à bruit. Ce phénomène est propre à la technologie LiFi et les premières simulations ont démontré que la connaissance fine de la position de l'utilisateur dans la cellule est un atout afin d'optimiser le canal associé.
  Or la géolocalisation fine de l'utilisateur par le réseau d'éclairage est un des atouts qui a déjà été démontré avec la technologie LiFi. Grâce aux caméras d'un smartphone par exemple, la position dans la cellule peut être connue à quelques centimètres près. C'est un atout essentiel pour gérer la qualité de la connexion. La cellule pourra donc intégrer cette capacité de localisation et ceel-ci simplifiera la gestion des allocations en cas de multi-accès.
  Ce type de fonction apporte également un intérêt majeur pour le domaine des IoT où l'on sait que le positionnement peut jouer un rôle dans le cas d'une quantité importante d'objets mobiles.
- La capacité à modéliser et gérer le passage d'une cellule à une autre (« Handover »), avec des latences relativement faibles. Là aussi, cette problématique est potentiellement un point fort du

LiFi mais reste à ce jour peu explorée pour la simple raison qu'à ce jour aucun démonstrateur multi-cellules n'a vu le jour dans une configuration réelle. Des études sur les protocoles à faible latence ont été menées [10] mais restent encore à optimiser et finaliser.

L'objectif d'un tel réseau de cellules est de démontrer sa capacité à gérer un nombre important d'utilisateurs hétérogènes, dans un environnement potentiellement ultra-sécurisé.

Dans ce contexte le savoir-faire d'OLEDCOMM sur une cellule commerciale (100 Mb/s, et premiers démonstrateurs avec une VCSEL), et les travaux théoriques et expérimentaux du LISV (liaison avec une cellule standard d'éclairage à 300 Mb/s, 20 utilisateurs) permettront au doctorant de démarrer les travaux avec une base solide et les performances envisagées dans les trois ans sont donc ambitieuses mais réalistes.

Bibliographie :

[1] R. Bian, I. Tavakkolnia, et H. Haas, "15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs", *J. Light. Technol.*, vol. 37, n° 10, pp. 2418- 2424, May 2019.
[2] J. Shi, Y. Hong, J. He, R. Deng, et L.-K. Chen, "Experimental Demonstration of OQAM-OFDM based MIMO-NOMA over Visible Light Communications", in *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, 2018, pp. 1- 3.
[3] S. Rajbhandari *et al.*, "A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications", *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 32, n° 2, p. 023001, 2017.
[4] Z. Ahmed, R. Singh, W. Ali, G. Faulkner, D. O'Brien, et S. Collins, "A SiPM-based VLC Receiver for Gigabit communication using OOK Modulation", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2020.
[5] H.-H. Lu, Y.-P. Lin, P.-Y. Wu, C.-Y. Chen, M.-C. Chen, et T.-W. Jhang, "A multiple-input-multiple-output visible light communication system based on VCSELs and spatial light modulators", *Opt. Express*, vol. 22, n° 3, p. 3468- 3474, Feb. 2014.
[6] A. Duque, "Bidirectional visible light communications for the internet of things", PhD Thesis, Université de Lyon, 2018.
[7] Y. Zhuang *et al.*, "A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 20, n° 3, p. 1963- 1988, 2018.
[8] M. M. Merah, "Conception and realization of an indoor multi-user Light-Fidelity link", PhD Thesis, Université Paris-Saclay, 2019.
[9] P. A. Haigh *et al.*, "Wavelength-Multiplexed Polymer LEDs: Towards 55 Mb/s Organic Visible Light Communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, n° 9, p. 1819- 1828, Sept. 2015.
[10] P. Wilke Berenguer *et al.*, "Optical Wireless MIMO Experiments in an Industrial Environment", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, n° 1, p. 185- 193, Jan. 2018.