
Transmission de données en espace libre et laser à cascade quantique

Amandine Pohardy¹, Cathy Dogon¹, Christiane Carré²,
Sylvain Fève², Isabelle Hardy^{2,3}, Pascal Besnard²

1. IUT de Lannion, IUT de Lannion

Rue Edouard Branly, 22300 Lannion, France

2. Laboratoire Foton, UMR 6082, CNRS, Université de Rennes 1,

ENSSAT, 6 rue de Kerampont, CS 80518, 22305 Lannion, France

christiane.carre@univ-ubs.fr

3. IMT Atlantique Bretagne-Pays de la Loire, Technopôle Brest-Iroise,

CS 83818, 29238 Brest Cedex 3, France

RÉSUMÉ. L'objectif est ici de reporter un travail de vulgarisation scientifique en lien avec la transmission d'informations en espace libre grâce à un laser à cascade quantique. Aujourd'hui transmises de manière confinée, en partie dans la fibre optique, nos données pourraient demain se propager directement dans l'atmosphère, tout en étant cryptées, donc protégées. Il s'agit d'une innovation qui intéresse en particulier les militaires, notamment pour sa capacité de cryptage.

ABSTRACT. The aim of this work was to help two young journalists to communicate on science related to free space data transmission, by use of a quantum cascade laser. Today, optical fibres are high-technology carriers of information, forming a world-wide network. Tomorrow, free space optical communication systems could be an attractive solution by use of chaos-based secure.

MOTS-CLÉS : laser à cascade quantique, transmission des données, espace libre, cryptographie par chaos.

KEYWORDS: quantum cascade laser, data transmission, free space, chaos-based secure communications

DOI:10.3166/I2M.16.1-4.51-59 © 2017 Lavoisier

1. Introduction

Amandine Pohardy et Cathy Dogon, deux étudiantes ayant préparé une licence professionnelle de journalisme à l'IUT de Lannion, ont participé à différents concours qui ont joué le rôle de tremplin vers le monde professionnel au cours de l'année universitaire 2015-2016. En particulier, « Communications optiques : bientôt nos données dans l'atmosphère ? » fut le sujet qu'elles ont choisi pour participer au concours « Le Grand Prix : les jeunes journalistes de la chimie » (concours chimie). Ce concours est organisé chaque année par la Fondation de la Maison de la Chimie en partenariat avec les journaux *Sciences et Avenir* (magazine mensuel français de vulgarisation scientifique) et *Le Figaro* (le plus ancien quotidien de la presse française encore publié). Lors de la première étape, un jury de professionnels sélectionne 4 binômes d'étudiants journalistes sur dossier. Ensuite, l'objectif est de solliciter la créativité et le professionnalisme de ces étudiants pour l'écriture d'un article et la présentation d'une interview filmée sur un thème libre, mais correspondant à une des catégories proposées.

Quatre binômes furent retenus pour la finale du 20 juin 2016 à Paris, dont celui constitué par Amandine et Cathy. Même si les sciences ont été absentes de leur parcours scolaire, elles ont choisi le thème « chimie et technologies de l'information », considérant que c'était l'occasion de s'ouvrir à de nouvelles connaissances. Ce raisonnement est cohérent pour un journaliste puisqu'il ne doit pas chercher à rester dans des zones de confort. Partant du principe que chimie et physique sont deux disciplines étroitement liées et souhaitant s'appuyer sur les compétences lannionaises, elles ont décidé de travailler en partenariat avec le laboratoire FOTON (fonctions optiques pour les technologies de l'information), unité de recherche ayant des activités scientifiques allant du matériau aux réseaux optiques et s'adressant à des secteurs d'applications tels que les télécommunications, le vivant, la sécurité ou l'industrie.



Figure 1. Cathy et Amandine au laboratoire FOTON à la Cité des Télécoms (photo de gauche), puis lors de la préparation de l'interview filmée (droite)

Participer à ce concours a engendré de la part des deux candidates des efforts de compréhension et un gros travail de vulgarisation, sachant que, pour expliquer et transmettre un message attrayant sur un sujet complexe, il faut d'abord le maîtriser.

L'objectif du CMOI étant de favoriser l'échange des connaissances scientifiques et techniques entre la recherche et l'industrie, pour faciliter les applications industrielles dans tous les domaines où les contrôles et les mesures optiques sont ou peuvent être concernés, il nous a semblé pertinent de reporter dans le cadre du colloque 2017 l'ensemble du travail réalisé par Amandine et Cathy.

2. Objectifs du travail

300 000 kilomètres par seconde, c'est la vitesse à laquelle se propagent les ondes électromagnétiques associées à la lumière dans le vide, et par conséquent, sensiblement la vitesse à laquelle peuvent se propager des données dans l'air, en espace libre. Aujourd'hui *via* la fibre optique, ce sont déjà plusieurs dizaines de millions de mégabits d'informations qui transitent chaque seconde sur la surface du globe. Avec l'augmentation massive du trafic internet induit par le boom de la TV en ligne, le streaming et la quantité croissante d'objets connectés au réseau, la bande passante des fibres optiques, considérée au départ comme illimitée commence à se saturer. Ces câbles en verre, présents dans nos immeubles, nos villes et jusque dans les profondeurs des océans ne seront bientôt plus suffisants pour échanger les données à travers le monde. Les remplacer ou les dupliquer est, en revanche, très coûteux en infrastructure.

C'est dans ce contexte qu'Amandine et Cathy ont en particulier discuté avec des chercheurs des laboratoires de Télécom ParisTech, qui travaillent sur les spécificités du laser à cascade quantique (QCL pour « Quantum Cascade Laser »). Ils ont montré, au début de l'année 2016, que ce laser est capable d'émettre de la lumière selon un régime de fonctionnement chaotique et, donc, utilisable pour la transmission d'informations en espace libre de façon sécurisée par cryptographie (QCLaser). Amandine et Cathy ont été séduites par cet objectif de travail en adéquation avec le thème "chimie et technologies de l'information.

3. Répondre aux questions

Mais comment présenter de façon simple et attrayante ce sujet au grand public ? Y répondre constituait dès le départ un véritable défi, sachant qu'en plus la chimie ne devait surtout pas être mise de côté dans ce concours ! Les questions étaient nombreuses et il fallait être capable d'y répondre pour préparer l'article et le reportage. Avec l'aide des chercheurs du laboratoire FOTON, Amandine et Cathy se sont intéressées aux communications optiques de façon globale et ont découvert le principe de fonctionnement des fibres optiques. Leur attention s'est ensuite portée sur le fonctionnement du laser à cascade quantique, puis à quoi correspondaient les bandes spectrales de l'atmosphère autorisant le passage de certaines longueurs d'onde, en particulier infrarouges.

3.1. Pourquoi utilise-t-on des fibres optiques ? Qu'est-ce qu'une fibre et comment transmet-elle des informations ?

Dans un premier temps, Cathy et Amandine se sont rendues à la Cité des Télécoms à Pleumeur-Bodou, ce qui correspondait à un formidable voyage à travers le temps et les technologies (rencontre avec les pères fondateurs de la société de communication, découverte des secrets du réseau de câbles sous-marins et des satellites, etc.). Elles ont alors pu comprendre pourquoi la fibre optique, technologie dominante pour les télécommunications, permet de digérer la masse considérable d'informations circulant dans le monde.

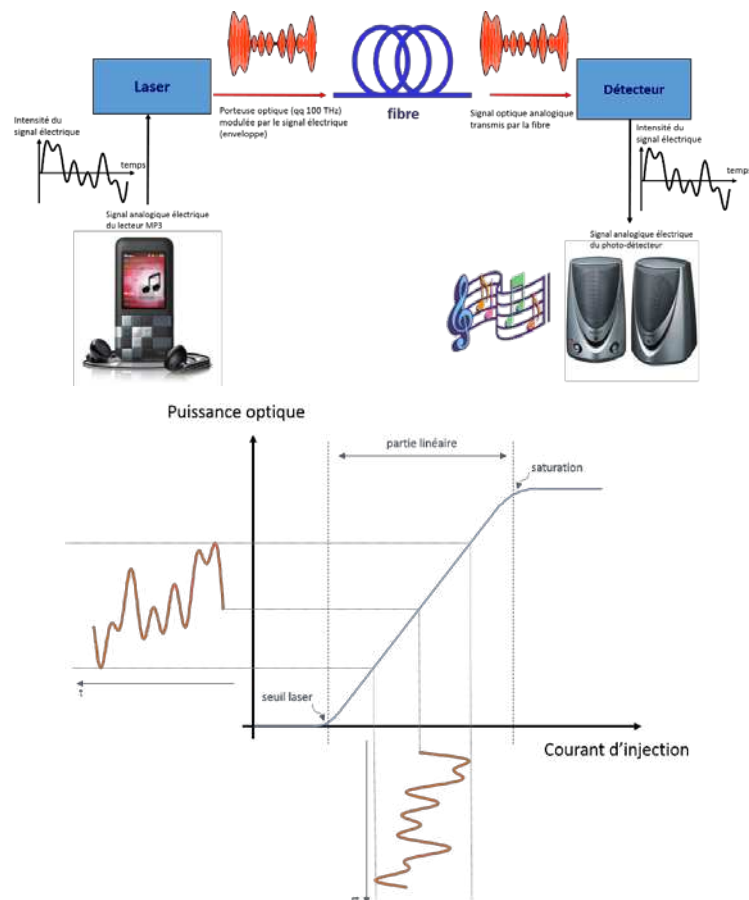


Figure 2. Expérience illustrant la transmission analogique du son sur une porteuse optique

C'est alors qu'une première expérience fut proposée au laboratoire FOTON correspondant à la transmission analogique du son sur une porteuse optique. Il est en effet particulièrement aisé de transmettre le son issu d'un lecteur mp3 par voie optique (Chartier, 2008).

Pour obtenir le signal optique portant l'information sonore, il suffit de convertir le signal analogique électrique de la sortie audio du lecteur en un signal analogique optique au moyen d'un laser à semi-conducteur. En effet, un tel laser possède une partie linéaire dans sa courbe donnant la puissance optique en fonction du courant d'injection (entre le seuil laser et la saturation). Ainsi, à condition que les variations du signal électrique en sortie du lecteur mp3 soient inscrites dans cette plage de linéarité, l'information électrique sur la porteuse optique au moyen du laser est littéralement recopiée. Alors, ce signal peut être injecté dans une fibre optique et transmis sur une distance qui peut atteindre la centaine de kilomètres sans ré-amplification en utilisant les technologies laser/fibre des réseaux de télécommunications actuels. A la sortie de la fibre, un photorécepteur effectue l'opération inverse (conversion linéaire optique-électrique) pour retrouver le signal analogique électrique qui est envoyé sur des haut-parleurs, afin d'entendre le signal sonore émis par le lecteur.

3.2. Comment propager des données en espace libre ?

Ayant compris les principes de transmission des informations par l'intermédiaire des fibres optiques, l'attention s'est portée sur la transmission en espace libre, correspondant à des réseaux mobiles faciles à installer ou permettant des transmissions « sans fil » sur n'importe quel terrain, d'où en particulier l'utilisation par les militaires.

Mais hors vide, la lumière ne se transmet pas indéfiniment : le faisceau peut être atténué. C'est alors que la notion d'absorption de la lumière par une molécule quelconque a été abordée, ce qui permettait donc d'introduire d'établir un lien entre les technologies de l'information et la chimie physique. Lorsqu'une substance absorbe un rayonnement électromagnétique, les molécules correspondantes passent dans un état excité correspondant à un niveau d'énergie plus élevé. Cette absorption d'énergie peut être à l'origine d'une réaction chimique photoinduite (réaction de photopolymérisation par exemple) ou conduire à un processus de désexcitation par émission d'un photon de plus faible énergie, donc de plus grande longueur d'onde (ex : par fluorescence comme illustré ci-après). Mais, cette molécule peut aussi subir des processus de relaxation vibrationnelle ou subir un choc avec une autre molécule. Elle peut donc aussi perdre de l'énergie sous forme de chaleur, pour revenir à son état fondamental (Atkins, 1998).

Lors de la transmission d'un signal en espace libre, les différents constituants de l'atmosphère (présence en particulier de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone qui sont deux molécules absorbant du proche infrarouge jusqu'au infrarouges lointains) peuvent

être de véritables obstacles s'ils absorbent à la longueur d'onde utilisée. Il faut en conséquence travailler à des longueurs d'onde correspondant à des fenêtres de transparence de l'atmosphère, c'est-à-dire à des longueurs d'onde pour lesquelles le rayonnement électromagnétique considéré est peu ou pas absorbé (Subran *et al.*, 2011).

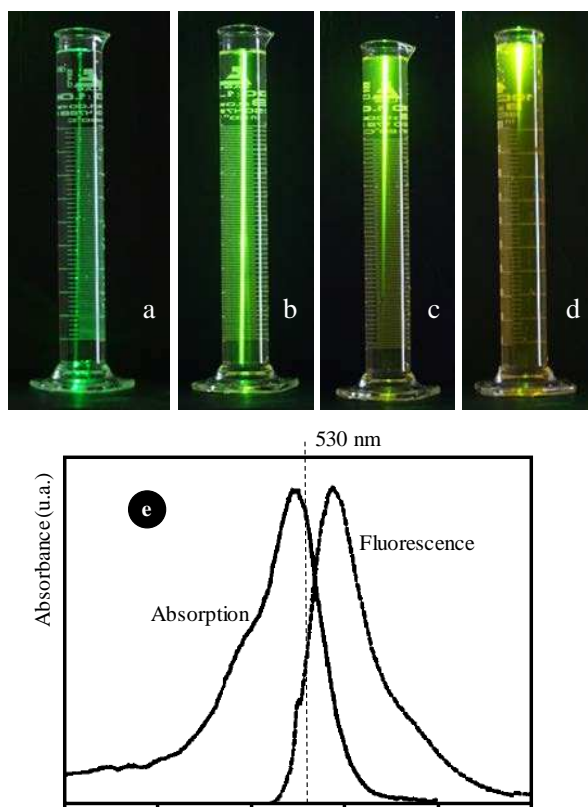


Figure 3. Illustration du phénomène d'absorption de la lumière par un colorant fluorescent, l'éosine, en présence d'un pointeur laser émettant à 530 nm et dirigé du haut vers le bas. Par absorption des photons verts, le colorant passe dans un état excité et retourne principalement à l'état fondamental par émission de fluorescence ((e) : spectres d'absorption dans le visible (maximum d'absorption à 525 nm) et d'émission de fluorescence de l'éosine (maximum à 546 nm)). En absence d'éosine (a), le trajet suivi par la lumière est visualisé par diffusion. Pour une faible concentration en éosine (b), le faisceau est plus facilement mis en évidence grâce au processus de fluorescence. Lorsque la concentration augmente, la probabilité d'absorption d'un photon augmente, ce qui est illustré par la décroissance en intensité dans la colonne (c). Plus la profondeur est élevée, plus faible est la puissance lumineuse incidente. Pour une concentration très élevée (d), les photons sont absorbés dans le premier tiers de la colonne d'eau

3.3. Qu'est-ce qu'un laser à cascade quantique ? Pourquoi choisir ce laser pour la transmission en espace libre ?

La source de lumière ici retenue pour transmettre des informations en espace libre est un laser à cascade quantique qui est un laser à semi-conducteur particulier.

Dans un laser à semi-conducteur, la structure cristalline du réseau atomique induit une distribution de l'énergie en bandes continues possédant une sous-structure constituées de niveaux discrets. La bande de conduction, entièrement vide à l'équilibre thermodynamique, est peuplée d'électrons sous l'effet du pompage électrique (courant d'injection), laissant des « trous » (absence d'électron) dans la bande de valence. Le laser à semi-conducteur classique utilise le processus de recombinaison de « paires électron-trou » (un électron de la bande de conduction redescend combler un trou dans la bande de valence). Les photons alors générés ont une longueur d'onde correspondant à la différence d'énergie entre les 2 bandes, typiquement dans le proche infra-rouge.

En revanche, le laser à cascade quantique utilise des transitions existant dans la structure fine de la bande de conduction (transitions « inter sous-bande »). La différence d'énergie entre les niveaux est alors beaucoup plus faible, donnant accès à des longueurs d'onde beaucoup plus grandes, dans le moyen infra-rouge, comme illustré ci-après (Marcadet *et al.*, 2011) (QC Laser).

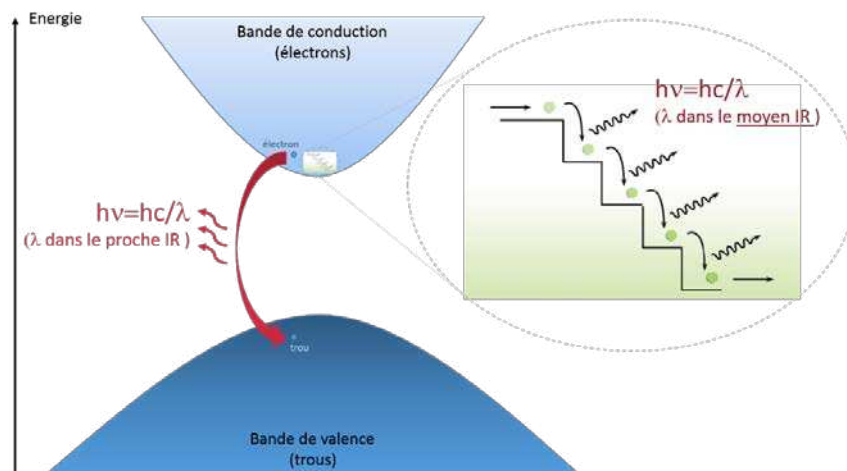


Figure 4. Électron passant d'un sous-niveau au sous-niveau précédent en émettant un photon à chaque cascade

Ces transitions se font à l'échelle subpicoseconde et chaque électron produit en moyenne entre vingt et trente photons. Les performances de ces lasers permettent aujourd'hui de disposer de sources compactes émettant à température ambiante à des longueurs d'onde comprises entre 3,5 et 13 μm (Subran *et al.*, 2011). En particulier,

ils émettent donc entre 11 et 13 μm , fenêtre où la lumière n'est pas perturbée ou absorbée par les diverses molécules présentes dans l'atmosphère. Le QCL permet alors d'émettre l'information à une longueur d'onde optimale dans l'atmosphère.

3.4. Comment peut-on sécuriser les données pour qu'elles ne soient pas interceptées ? Qu'est-ce que le chaos ? Qu'est-ce que le cryptage des données ?

Il va de soi que la transmission analogique décrite au §3.1 n'est absolument pas sécurisée puisque le signal transmis porte lui-même l'information brute (par définition même d'un signal analogique qui varie continuellement dans le temps de manière analogue à la grandeur physique qu'il représente). En revanche, les signaux transmis sur les fibres optiques sont de nature numérique. La conversion analogique/numérique consiste en un échantillonnage et une quantification de manière à obtenir un signal discontinu formé par la succession de symboles binaires (bits d'information). Cette opération confère au signal transmis un premier niveau de sécurité puisque la quantification induit un codage de l'information (bien que ça ne soit pas sa raison d'être, en effet, le signal numérique est surtout plus robuste et plus facile à traiter par l'informatique que le signal analogique). Mais à ce stade, l'information est encore assez facilement accessible. Pour la rendre inintelligible à autre que qui-de-droit, il faut passer par une étape de cryptographie, c'est-à-dire un chiffrement rendant l'information inaccessible à quiconque n'en possédant pas la clé.

Lors de l'étude des QCL, des chercheurs de Telecom ParisTech, de Centrale-Supélec et de la start-up mirSense ont démontré pour la première fois que le comportement de ces lasers, que l'on pensait très stables, peut devenir chaotique, c'est-à-dire imprévisible sous certaines conditions de fonctionnement (Républicain Lorrain). Ce résultat expérimental non prévu du point de vue théorique fut obtenu en renvoyant une petite partie du signal émis dans la cavité optique du laser. Cela a permis de montrer que l'apparition du chaos n'est pas liée à la fréquence de relaxation, mais à celle de la cavité externe, les paramètres variables étant la longueur de la cavité et la quantité de lumière renvoyée (Sciamanna et Shore, 2015) (QC Laser).

Le fait, qu'il soit possible de générer avec ces lasers un comportement chaotique du signal, ouvre actuellement la voie au cryptage par chaos pour les longueurs d'onde émises par le QCL (QC Laser). Grâce à ce chaos, 2 QCL appairés (2 lasers du même fabricant et de la même série) permettent de générer un signal aléatoire, donc indéchiffrable, servant de support aux informations à transmettre, sans risque que celles-ci soient interceptées dans l'atmosphère et surtout déchiffrées. Ainsi, la solution aujourd'hui proposée consiste à utiliser deux jeux de deux lasers appairés pour l'émission et la réception, de façon à protéger (coder) les données transportées, puis à les décrypter et ainsi assurer des transmissions sécurisées (Sciamanna et Shore, 2015). Les données deviennent indéchiffrables pour quelqu'un d'autre que le destinataire, ce qui correspond à une vraie révolution dans le monde de la communication en espace libre.

4. Conclusion

Le jour de la finale, même si elles ne furent pas les lauréates, le jury a estimé qu'il s'agissait d'un sujet innovant, mais complexe, et a félicité les candidates pour le gros travail de compréhension effectué ! Simultanément, ce fut une belle aventure d'amitié entre nos deux journalistes qui ont eu l'opportunité de découvrir le monde de la recherche et celui des télécommunications. Depuis, Amandine nous a expliqué : « J'ai été très fière de réaliser ce concours. Cela m'a montré que tous les sujets étaient à notre portée, la clef étant de savoir bien se faire entourer ». Quand à Cathy, elle travaille maintenant pour une émission radiophonique de vulgarisation scientifique, le Labo des savoirs !

Remerciements

Les auteurs remercient vivement Frédéric Grillot pour l'aide apportée à Amandine et Cathy, sachant que Frédéric n'a pas hésité à prendre de son temps pour répondre par téléphone aux questions.

Bibliographie

- Atkins P.W. (1998). *Eléments de chimie physique*. De Boeck Université, Paris.
- Chartier T. (2008). Démonstration d'une transmission analogique par fibre optique. *JNOG 2008 (rencontres pédagogiques)* Actes du colloque, Lannion [AP11]
- Concours Chimie : <http://mcetv.fr/grand-prix-jeunes-journalistes-chimie/>
- Marcadet X., Carras M., Maisons G., de Naurois, Simozrag B. (2011). Les lasers à cascade quantique : l'accès au moyen infrarouge. *Photonique*, vol. 54, p. 54-57.
- QC Laser : <https://blogrecherche.wp.imt.fr/2016/02/29/laser-a-cascade-quantique-lexperience-du-chaos/>
- Républicain Lorrain : <http://www.republicain-lorrain.fr/edition-de-metz-ville/2016/02/17/lumiere-toujours-plus-de-decouvertes>
- Sciamanna M., Shore K.A. (2015). Physics and Applications of laser diode chaos. *Nature Photonics*, vol. 9, p. 151-162.
- Subran C., Radunsky M., Henson M. (2011). Lasers à cascade quantique dans les applications militaires modernes. *Photonique*, vol. 55, p. 52-55.

