

Vers la nanophotonique

Camillo Stefanucci

16 décembre 2009



1 Introduction

De nos jours nous sommes entourés par des technologies et des dispositifs toujours plus sophistiqués. Un domaine qui a beaucoup influencé la vie de tous les jours est la photonique, dès les premières télévisions jusqu'aux écrans actuels LCD que nous pouvons retrouver partout (téléphones portables, ordinateurs, iPod,...). Dans ce petit exposé nous voudrions résumer en peu de pages quelles sont les applications actuelles de cette branche de la technologie, surtout en soulignant l'évolution qui est aujourd'hui en train de mener à obtenir des dispositifs toujours plus petits (en effet nous parlons d' "intégration" des composants et de "nanotechnologie"). Il suffit de penser une minute pour se rendre compte que la photonique est très vaste, donc nous devons faire un tri dans les thèmes. Nous pourrions les exposer en trois sections : la première dédiée à la compréhension du sujet, car un bon point de départ est de comprendre qu'est-ce que c'est la photonique. Ce n'est pas facile, en première analyse nous pourrions dire que ce sont des technologies qui travaillent avec la lumière, mais ce serait réducteur. Aujourd'hui définir de manière exacte ce qu'est la photonique est un problème non résolu et on comprendra pourquoi. Après, dans la deuxième section, nous pouvons faire une exposition chronologique de certains dispositifs photoniques basés sur la jonction PN. C'est un dispositif très important dans la science des semi-conducteurs et comprendre son fonctionnement est fondamental

pour la compréhension des dispositifs photoniques les plus avancés. Souvent nous nous demandons : comment est-ce qu'il fonctionne ? Ce n'est pas de la magie, ce sont des dispositifs basés sur des principes physiques et l'âme fondamentale de ces principes est la jonction PN. La dernière section nous pouvons la dédier à une branche des applications technologiques qui se sert beaucoup de la photonique : les télécommunications. Cette branche est très développée et en continue évolution avec des technologies qui permettent d'échanger informations toujours plus rapidement. Si nous y pensons, il y a trente ans le téléphone portable n'existait pas donc la communication actuelle a fait un grand bond. L'objectif est de réussir à échanger plus d'informations en moins de temps possible. Une tendance actuelle est d'utiliser la photonique, parce que la lumière est rapide, rien d'autre n'est plus rapide. Donc aujourd'hui, il y a une grande catégorie d'applications avec systèmes micro-nano opto-mécanique qui sont utilisés pour contrôler des faisceaux de lumière et guides lumineuse qui sont construits à échelles plus petites. Ces technologies sont invisibles pour nous mais, en utilisant de façon incorrecte les mots d'Antoine de Saint-Exupéry, "l'essentiel est invisible pour les yeux" pour dire que nous utilisons quotidiennement ces technologies. Depuis les premières ampoules d'Edison à aujourd'hui, nous sommes capables de produire efficacement une énergie lumineuse à échelles plus petites et avec la lumière nous transportons et modifions les informations. Et ça, ce que le futur nous réserve ? À quelles dimensions arriverons-nous dans les futurs dispositifs photoniques ? À quelles vitesses de communication est-ce que leur usage nous portera ?

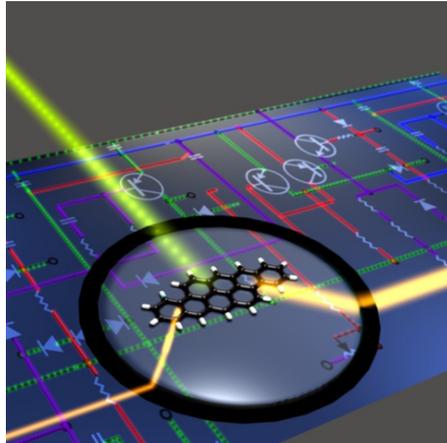


FIGURE 1 – Le transistor est l'âme de l'électronique moderne , est-ce qu'un jour il sera possible de faire des transistors moléculaires photoniques qui révolutionneront le monde ? Dans la figure il y a une représentation artistique d'un circuit optique complet avec un hypothétique transistor optique. Dans le cercle noir, une molécule amplifie un signal optique (jaune), comme le transistor fait avec les signaux électriques. Le contrôle de l'amplification est obtenu avec un deuxième faisceau de lumière (vert), qui décide si amplifier, atténuer ou laisser inchangé le signal d'entrée.

2 La photonique

La science de la lumière est l'optique qui étudie la propagation et la détection de la lumière. Aujourd'hui, trois développements sont responsables du renouvellement de la technologie moderne ; l'invention du laser, la fabrication des fibres optiques et l'introduction des dispositifs optiques à semi-conducteur. Le résultat de ces développements a conduit à de nouvelles disciplines émergentes et de nouveaux termes ont été utilisés : effets électro-optiques, effets acousto-optiques, effets thermo-optiques, optoélectronique, optique quantique, optronique, etcétera. Même s'il n'y a pas un complet accord sur leur usage nous pouvons approfondir leur signification. Dans certains cristaux particuliers l'interaction entre les radiations électromagnétiques (optique) et la matière est modifiée par ses propriétés (électroniques, thermiques, acoustiques) et on a de nouveaux effets qui peuvent être utilisés dans les applications. En particulier, avec le terme optoélectronique nous nous référons aux dispositifs à semi-conducteur qui sont essentiellement électroniques en nature mais impliquent la lumière, mais quand ces interactions sont micro-nanoscopiques, nous devons utiliser le terme optique quantique qui comprend l'étude des propriétés quantiques. Enfin le terme optronique est principalement lié aux équipements utilisés dans le domaine militaire.

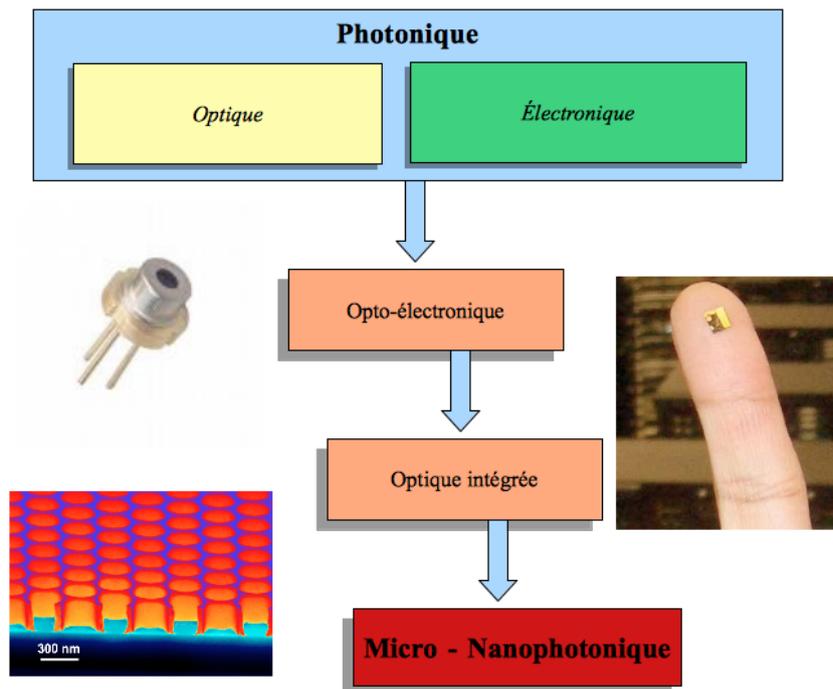


FIGURE 2 – En haut : une photodiode utilisée comme un détecteur de lumière ; un PIC (photonic integrated circuit) avec 10-canaux d'un système de télécommunications opérant à 10 Gbit/s ; un cristal photonique fait avec des trous de 300 nm sur une couche mince semi-conducteur.

Dans cette confusion dûe au développement rapide de la technologie, le terme photonique a été créé récemment et ses contours sont encore mal définis. Il est formé sur le même modèle que le terme électronique, on peut par conséquent mettre en parallèle les couples optique-photonique et électricité-électronique :

- L'électronique implique le contrôle des charges électriques.
- La photonique implique le contrôle des photons.

Les deux disciplines se chevauchent car les électrons contrôlent souvent le flux des photons et inversement les photons contrôlent le flux des électrons, mais enfin nous pouvons dire que la photonique est l'union du monde électronique avec celui optique, elle comprend les composants optoélectroniques et aussi les propriétés quantiques dans de nouveaux matériaux. Par conséquent la photonique est généralement associée à l'étude des composants permettant la génération, la transmission, le traitement ou la conversion des signaux optiques. Après la définition, nous pouvons faire un petit raisonnement. L'optoélectronique se trouve à la frontière entre la photonique et l'électronique mais la photonique est aujourd'hui plus associée à l'optique intégrée qui concerne la réalisation de très petites puces avec beaucoup de composants optoélectroniques. Donc la miniaturisation incessante des composants microélectroniques conduit vers un développement naturel de la photonique à la micro-photonique. Malheureusement, il n'existe pas de loi de Moore¹ de l'optoélectronique et la limite la plus habituelle que l'on imagine naïvement pour l'optique est celle de la longueur d'onde, c'est-à-dire une dimension voisine du micron pour les ondes du visible et du proche infrarouge. Mais, comme on l'a déjà dit, le monde de la photonique est plus grand que celui de l'électronique en profitant des propriétés du monde quantique, fait d'atomes et de molécules, aujourd'hui nous allons effectivement vers la nano-photonique (on cherche à maîtriser et façonner les champs optiques à des échelles d'une fraction de longueur d'onde et même largement sub-longueur d'onde), voyons comment...

3 L'évolution des dispositifs photoniques

Ce paragraphe est dédié au plus simple dispositif photonique qui existe : la jonction PN. Pour illustrer son fonctionnement peu de lignes sont nécessaires, mais la technologie qui en découle a beaucoup d'applications. Dès les plus communs DELs qui se trouvent sur les sapins de Noël, aujourd'hui nous bâtissons des écrans flexibles et de nouvelles cellules solaires en profitant des propriétés des molécules individuelles. Essayons donc de comprendre les principes fondamentaux qui se dissimulent derrière ces magies de la technologie.

3.1 La jonction PN

À la base des principaux composants électroniques (et donc de la photonique aussi) se trouve la jonction PN. Le fait d'introduire des impuretés (opération appelée dopage)

1. Loi prédictive selon laquelle la longueur de grille des transistors se réduit d'un facteur deux tous les dix-huit mois environ.

dans un cristal de semi-conducteur améliore fortement la conductivité du cristal. Si un cristal a reçu des impuretés pentavalentes (arsenic, phosphore, antimoine) il devient un semi-conducteur à conductivité N parce qu'il a beaucoup d'électrons. Un cristal dopé par des impuretés trivalentes (indium, gallium, bore) devient un semi-conducteur P parce qu'il a beaucoup de trous. Un trou est simplement un défaut d'un électron et peut être pensé comme une charge positive. En juxtaposant une zone dopée P et une zone dopée N à l'intérieur d'un cristal de semi-conducteur, on obtient une jonction PN. L'utilisation de cette jonction se fait en lui appliquant une polarisation. Il y a deux possibilités :

- Une polarisation directe : le potentiel de la zone P est supérieur à celui de la zone N, les porteurs de charge traversent la jonction et un courant élevé parcourt le circuit.
- Une polarisation en inverse : le potentiel de la zone N est supérieur à celui de la zone P, le courant qui la parcourt est très faible.

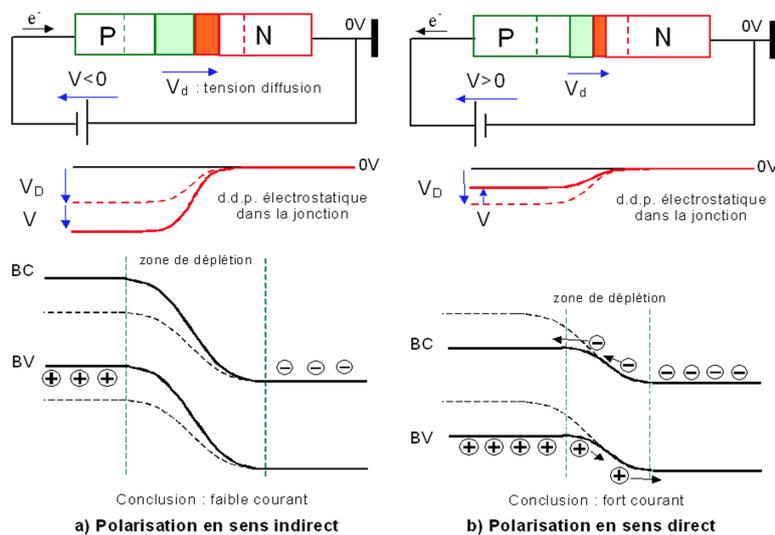


FIGURE 3 – Polarisation d'une diode : circuit et structure de bande (BV- bande de valence, BC- bande de conduction) avec le déplacement des porteurs de charge. Dans la figure, il est clair que la zone P représente une barrière de potentiel pour les électrons. En polarisation en sens direct cette barrière baisse et beaucoup d'électrons dépassent pour former il courant. En polarisation en sens indirect, la barrière augmente et presque aucun électron ne peut dépasser.

C'est le comportement d'une diode dont l'anode correspond à la zone P (au + de la pile) et la cathode à la zone N (au - de la pile). Pour commencer à faire un exemple, une diode électroluminescente (abrégiée sur le sigle DEL ou en anglais LED, light-emitting diode) est une jonction PN qui doit être polarisée en sens direct lorsqu'on veut émettre de la lumière. Pour expliquer dans une phrase comment la lumière est engendrée, nous pouvons dire : le champ électrique pourvoit assez d'énergie pour créer beaucoup de paires

électron-trou, elles se recombinent de façon radiative et produisent la lumière.

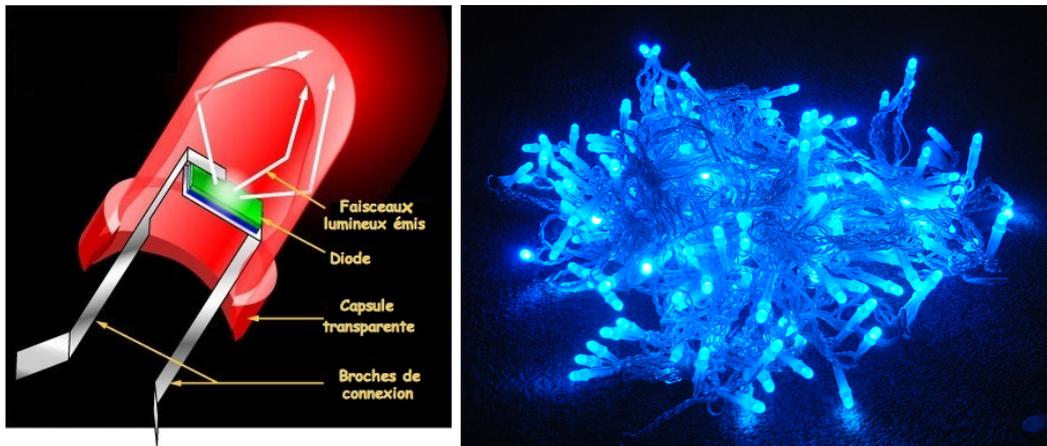


FIGURE 4 – DEL : (a) Structure (b) Application dans l'éclairage pour le sapin de Noël

Pour comprendre le sens de cette affirmation, il faut expliquer les mécanismes de génération et recombinaison des électrons et trous. Dans un cristal semi-conducteur normal, il existe des niveaux interdits d'énergie donc énergétiquement, il n'existent que deux régions disponibles qui sont appelées bande de conduction et bande de valence. Généralement les électrons sont disposés dans les niveaux énergétiques inférieurs, mais quand nous pourvoyons assez d'énergie, ils peuvent sauter dans la bande de conduction (et laissent un vide dans la bande de valence) : on a la génération d'une paire électron-trou.

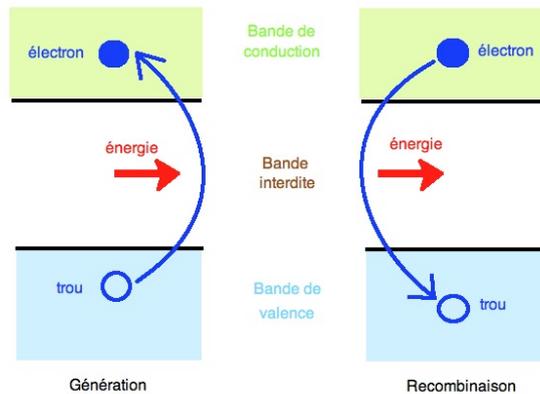


FIGURE 5 – Génération et recombinaison des paires électron-trou dans la structure de bande d'un semi-conducteur. L'énergie de la génération naturelle dans un cristal est thermique, ainsi au équilibre les taux génération et recombinaison sont identiques.

Avec le temps, le système veut retourner dans la position d'équilibre donc l'électron perd son énergie et retourne dans la bande de valence : on a la recombinaison d'une paire électron-trou. Cette perte d'énergie peut arriver de deux manières :

- Recombinaison thermique : l'énergie est transférée au cristal comme chaleur, c'est le monde de la microélectronique.
- Recombinaison radiative : l'énergie se dégage comme photons de lumière, c'est le monde de l'optoélectronique.

Si nous choisissons le bon matériau, tous les recombinaisons sont radiatives et nous pouvons produire la lumière! De plus, si nous changeons la bande interdite (band gap en anglais) il est possible d'obtenir des énergies différentes et donc des DELs de couleurs différentes qui sont partout, des sapins de Noël aux enseignes lumineuses. Aujourd'hui, avec la connaissance des molécules, on peut réaliser de nouvelles DELs très spéciales. Voyons-les dans le paragraphe prochain.

3.2 La OLED (diode électroluminescente organique)

La diode électroluminescente organique (en anglais : Organic Light-Emitting Diode, qui a formé l'acronyme OLED) est une technique d'affichage lumineux dont le premier brevet date de 1987 (société Kodak) et dont la première application commerciale est apparue vers 1997. Cette technique vise à remplacer les affichages à cristaux liquides (LCD). En 2009, ce sont principalement les écrans de petite taille tels que ceux des téléphones mobiles ou des appareils photos numériques qui utilisent la technique OLED.



FIGURE 6 – Applications actuelles de la OLED : (a) Écran flexible pour nouveaux télévisions à haute définition (b) Tee-shirt éclairé

Chaque diode, dont l'épaisseur ne dépasse pas le millimètre, est composée de trois couches : un semi-conducteur organique (des atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote) entouré par une cathode métallique (une source de charges électriques positives) et une anode transparente (une source de charges négatives). Chaque pixel d'un écran OLED est constitué de trois diodes électroluminescentes juxtaposées (une rouge,

une verte et une bleue), produisant leur propre lumière lorsqu'elles sont soumises à une tension électrique. L'ensemble repose sur un "substrat" transparent, en verre ou en matière plastique. Malgré la multiplicité des couches, l'épaisseur totale, sans considérer la couche transparente, est 300 nanomètres environ. Les luminophores (éléments de la couche lumineuse organique) utilisés dans une OLED sont principalement dérivés du PPV (poly[p-phénylène vinylène]), l'anode reste classique, composée d'oxyde d'indium-étain (ITO), tout comme la cathode, en aluminium ou en calcium. À l'interface entre le matériau luminescent et les électrodes, des matériaux spécifiques peuvent être intercalés, afin d'améliorer l'efficacité de la OLED.

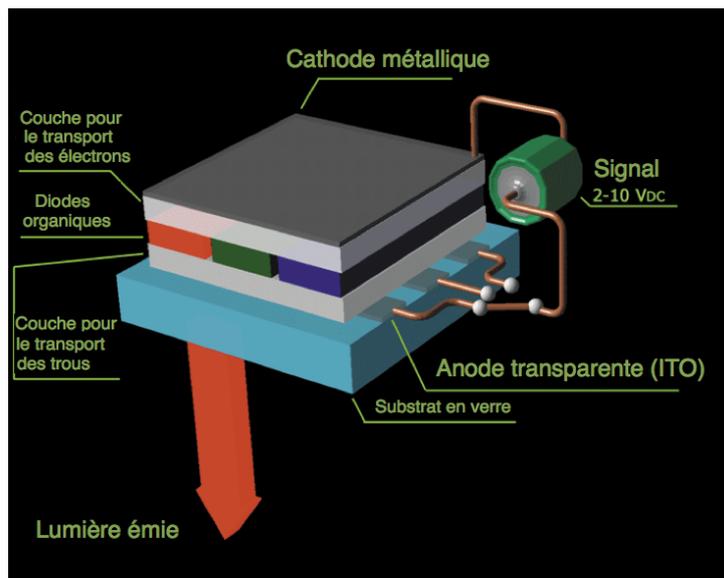


FIGURE 7 – Structure d'une OLED. L'Universal Display Corporation a annoncé d'avoir réalisé un écran différent où les trois microécrans de couleur sont superposés (pas côte à côte) et ça permet un essor de la résolution.

Mais comment est-ce qu'il fonctionne? Le principe de fonctionnement des OLEDs est basé sur l'électroluminescence. Les matériaux organiques utilisés ont une structure énergétique comme celle des semi-conducteurs mais plutôt que les bandes, ils ont des niveaux énergétiques appelés "orbitales frontières". Ils sont deux types d'orbitales moléculaires (OM) particulières : l'orbitale HOMO (acronyme de highest occupied molecular orbital), en français HO (pour Haute Occupée) qui est l'orbitale moléculaire la plus haute en énergie occupée par au moins un électron, et l'orbitale LUMO (acronyme de lowest unoccupied molecular orbital), en français BV (pour Basse Vacante) qui est l'orbitale la plus basse en énergie non occupée par un électron. La source de lumière est en fait due à la recombinaison d'une paire électron-trou à l'intérieur de la couche émettrice dans la structure HO-BV avec une polarisation directe. Lors de cette recombinaison, un photon est émis parce qu'elle est radiative donc c'est de nouveau une jonction PN!

3.3 Autres nouveaux dispositifs

Une jonction PN peut être utilisée aussi pour créer des photodiodes. En polarisant en inverse la jonction, aucun courant ne passe. Cependant si la lumière frappe la diode, se créent des paires électron-trou qui sont entraînées par le champ électrique et font passer un courant : nous avons construit le plus simple dispositif photorivêlateur.

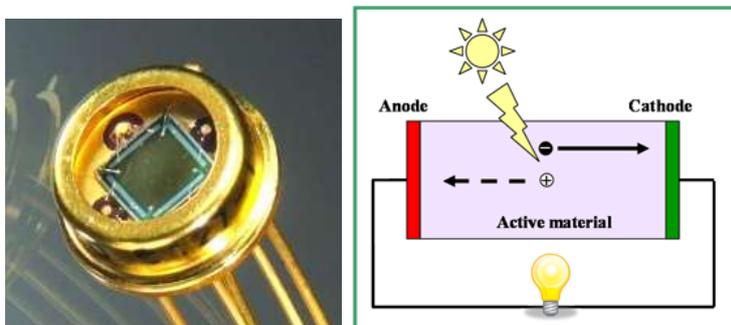


FIGURE 8 – (a) Une photodiode (b) Fonctionnement d'un photorivêlateur

Il est intéressant de remarquer que le même principe peut être utilisé pour faire des cellules solaires ! Aujourd'hui effectivement les cellules photovoltaïques sont constituées avec des matériaux semi-conducteurs et avec des jonctions PN. Mais aussi dans cette situation, la technologie est en train d'avancer rapidement vers l'utilisation de molécules individuelles. La recherche actuelle est concentrée sur les cellules solaires organiques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques avec les orbitales HO et BV à la place des bandes d'un semi-conducteur.

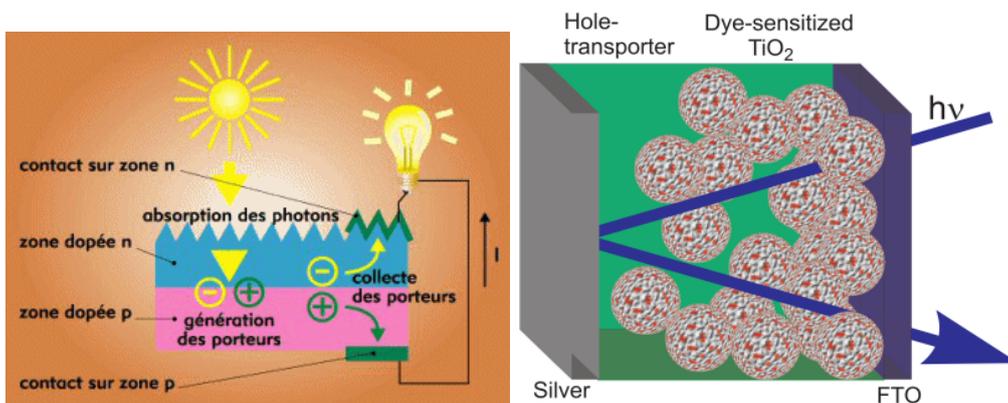


FIGURE 9 – (a) Fonctionnement d'une cellule solaire (b) Structure d'une cellule photovoltaïque organique également appelée cellule Grätzel en référence à leur concepteur de l'EPFL. Son fonctionnement est très compliqué, en effet il s'agit d'un système photoélectrochimique inspiré de la photosynthèse végétale avec l'oxyde de titane TiO_2 pulvérulent.

Encore au stade de recherche expérimentale, le record de rendement est compris entre 4 et 5% en laboratoire (record mondial de 5,9% en juillet 2008 à l'Institut de photovoltaïque appliquée de l'Université technique de Dresde). Ces sont des applications, mais il en existe beaucoup d'autres, nous ne pouvons pas en parler en détail. Pour exemple, il existe les diodes laser qui sont toujours plus efficaces grâce aux phénomènes de confinement quantique. Électrons et trous sont pratiquement piégés dans un espace très petit et ainsi on peut contrôler leur comportement et l'émission des photons. Le même principe est utilisé pour confiner des électrons et créer des mémoires optiques ou les boîtes quantiques (en anglais quantum dots) largement utilisées dans les analyses biochimiques.

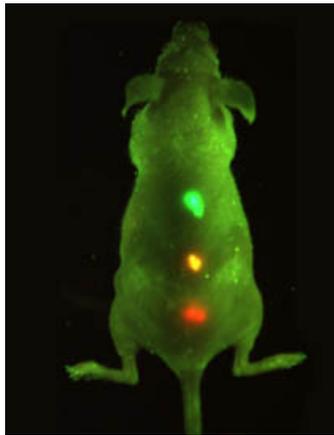


FIGURE 10 – Les boîtes quantiques : leur propriété de fluorescence est employée dans la médecine et la biologie pour visualiser les tumeurs. Dans la figure il y a une expérimentation de l'ingénieur biomédical Shuming Nie (Georgia Institute of technology) pour révéler le cancer de la prostate dans une souris.

4 La photonique et les télécommunications

Lorsque l'on utilise le web, la plupart des informations transite par des fibres optiques. Ces fibres sont habituellement constituées d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection. Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée. Clairement avec ce principe, il est possible de transmettre signaux grâce à la lumière donc développer des réseaux en fibre optique. Mais

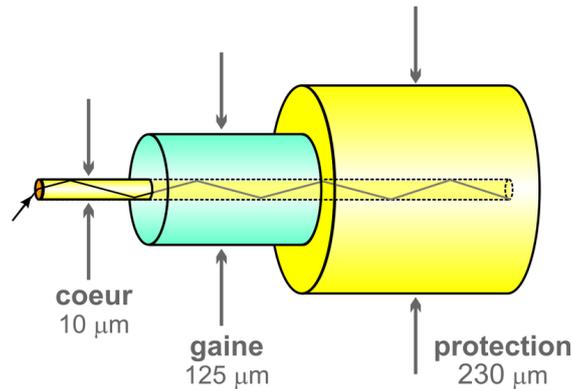


FIGURE 11 – Structure d’une fibre optique avec le phénomène de réflexion totale interne.

pour gérer le grand nombre des informations qui circulent sur ces réseaux (vous pouvez penser à Internet ou aux transmissions téléphoniques), sont nécessaires des dispositifs capables de modifier de manière correcte ces informations.

4.1 Les MOEMS et les PICS

Pour gérer beaucoup de signaux sur un réseau optique, sont nés les microsystèmes opto-électro-mécaniques (en anglais Micro-Electro-Mechanical Systemes). Comme le nom le suggère, ces systèmes ménagent les effets mécaniques et électriques à petite échelle (taille du micron ou jusqu’au nano) pour agir l’un sur l’autre avec des signaux optiques transportés par les fibres. Les interrupteurs optiques en sont un exemple élémentaire : très souvent on voudrait renvoyer un signal optique d’un côté à l’autre, pour satisfaire tous les utilisateurs ou pour mettre en communication divers composants électroniques. Mais, comment peut-on réaliser un système de ce genre ?

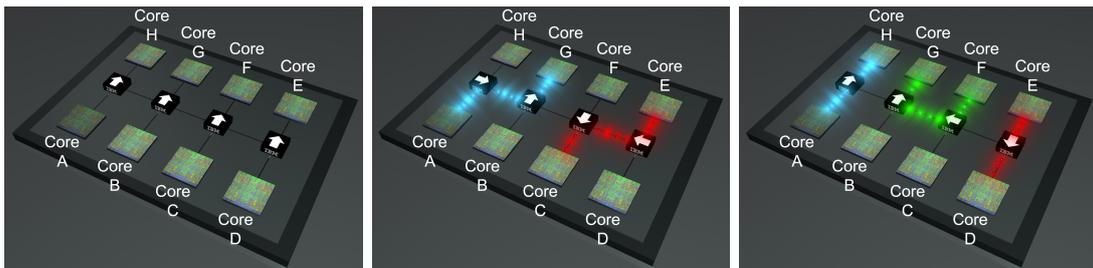


FIGURE 12 – Les interrupteurs d’IBM pour transférer des signaux optiques dans des puces différentes.

Pour répondre, allons à l’intérieur du dispositif : un microsystème mécanique, actionné par une tension électrique, déplace un petit miroir entre les fibres optiques en renvoyant le signal. C’est une idée simple et géniale !

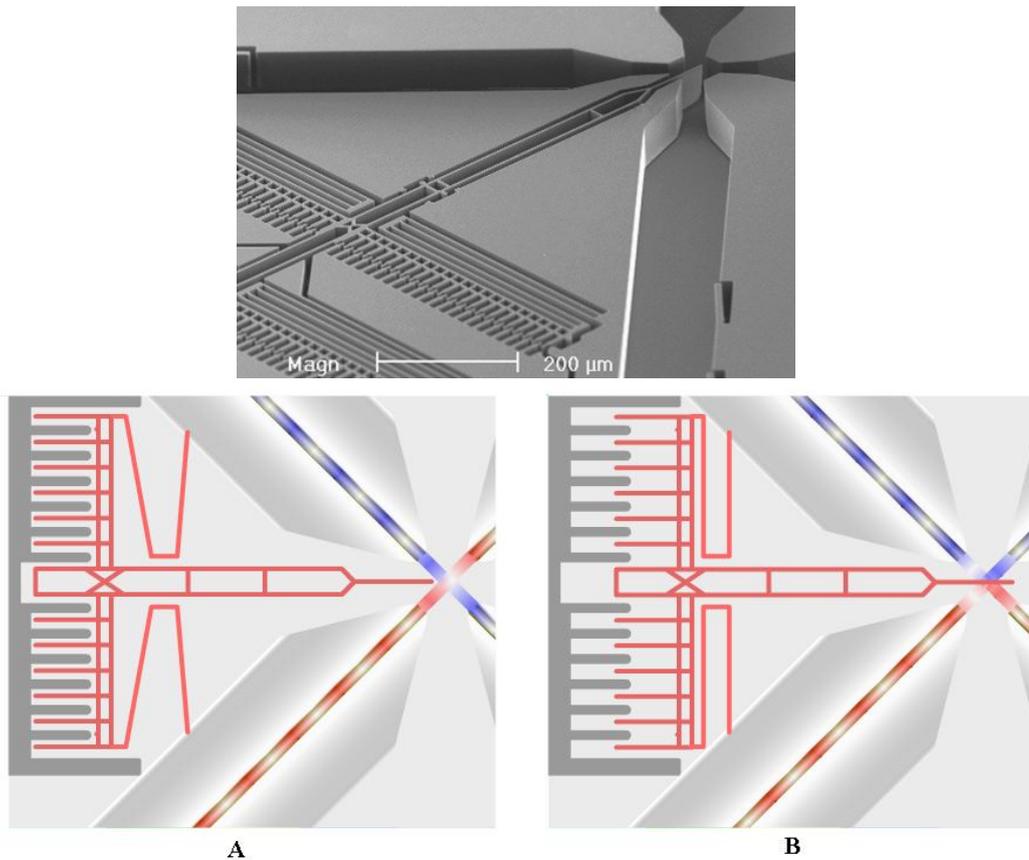


FIGURE 13 – Structure et fonctionnement d'un interrupteur optique : (a) état ON (b) état OFF

Certainement ces MOEMS ne se trouvent pas uniquement dans les réseaux télécom, il suffit de penser que, dans les projecteurs, il y a une série de petits miroirs mobiles qui, ça dépend des signaux électriques, reflètent la lumière pour faire apparaître l'image. En retournant au monde des télécom, des appareils toujours plus grand (MEMS et optoélectronique) peut être intégrés dans le prétendu PIC, circuits photoniques intégrés. Avançons deux exemples :

- En 2008 les scientifiques d'IBM ont élaboré une manière pour réussir à envoyer les informations dans une puce grâce à l'usage des impulsions lumineuses, plutôt que des électrons. Ils ont en effet réalisé l'interrupteur nanophotonique le plus petit au monde : environ 100 fois plus petits que la section transversale d'un cheveu. Cet interrupteur est un composant important pour contrôler le flux des informations dans les puces futures et il est capable d'en accélérer significativement les performances, avec une consommation d'énergie extrêmement basse. Une fois que les signaux électriques sont convertis en impulsions lumineuses, ce dispositif de commutation exerce un rôle important pour la "direction du trafic" dans le réseau,

en assurant que les messages optiques envoyés d'un cœur peuvent être remis, de manière efficace, à tous les autres cœurs présents sur la puce.

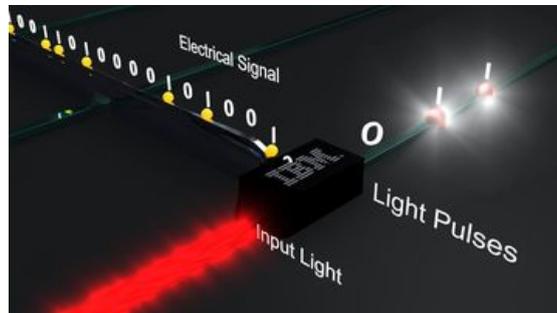


FIGURE 14 – Principe de fonctionnement du PIC d'IBM

- Un PIC, construit par Infinera, a 60 dispositifs à l'intérieur avec beaucoup de puces, lasers, photorécepteurs et composants télécom avancés, pour offrir une vitesse totale de 100 Gigabits/seconde. Tous les signaux électriques sont transformés en même temps en signaux optiques pour tous les canaux. Ces signaux sont ensuite réélaborés, mixés et transférés sur une seule fibre optique.

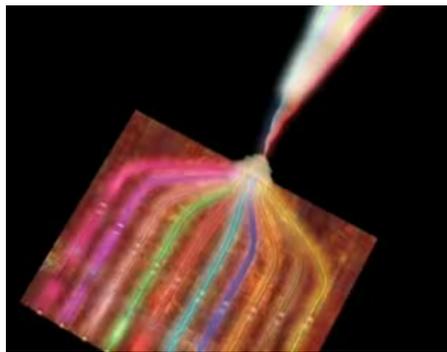


FIGURE 15 – Structure interne du PIC d'Infinera

Comme nous pouvons le voir, le rêve des ingénieurs photoniques est de réaliser dans un seul dispositif un réseau optique entier capable de gérer beaucoup d'informations pour beaucoup d'utilisateurs (...un pas vers nouveaux de super-ordinateurs?).

4.2 Les cristaux photoniques

L'optique traditionnelle ne sait pas manipuler des faisceaux de lumière plus petits que la longueur d'onde. Aujourd'hui on a développé des structures qui permettent de guider la lumière dans des volumes 10 à 100 fois plus petits : les cristaux photoniques. Ceux-ci sont des structures périodiques de matériaux diélectriques ou métalliques conçues pour modifier la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur affecte le déplacement des électrons

en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites. Les études sur les structures périodiques capables de modifier la lumière sont initiées avec les études des papillons Morpho. Si nous touchons les ailes d'une Morpho, sur nos doigts, il y a une poudre de couleur. En agrandissant cette poudre au niveau nanométrique, nous découvrons qu'elle est formée d'une série des structures similaires aux sapins de Noël. Nous nous apercevons également que le papillon est bleu phosphorescent, pas pour la substance de couleur, mais parce qu'il y a une interaction entre la lumière et les "branches" des "structures-arbre" de la poudre. Avec le même principe, on peut construire une série de

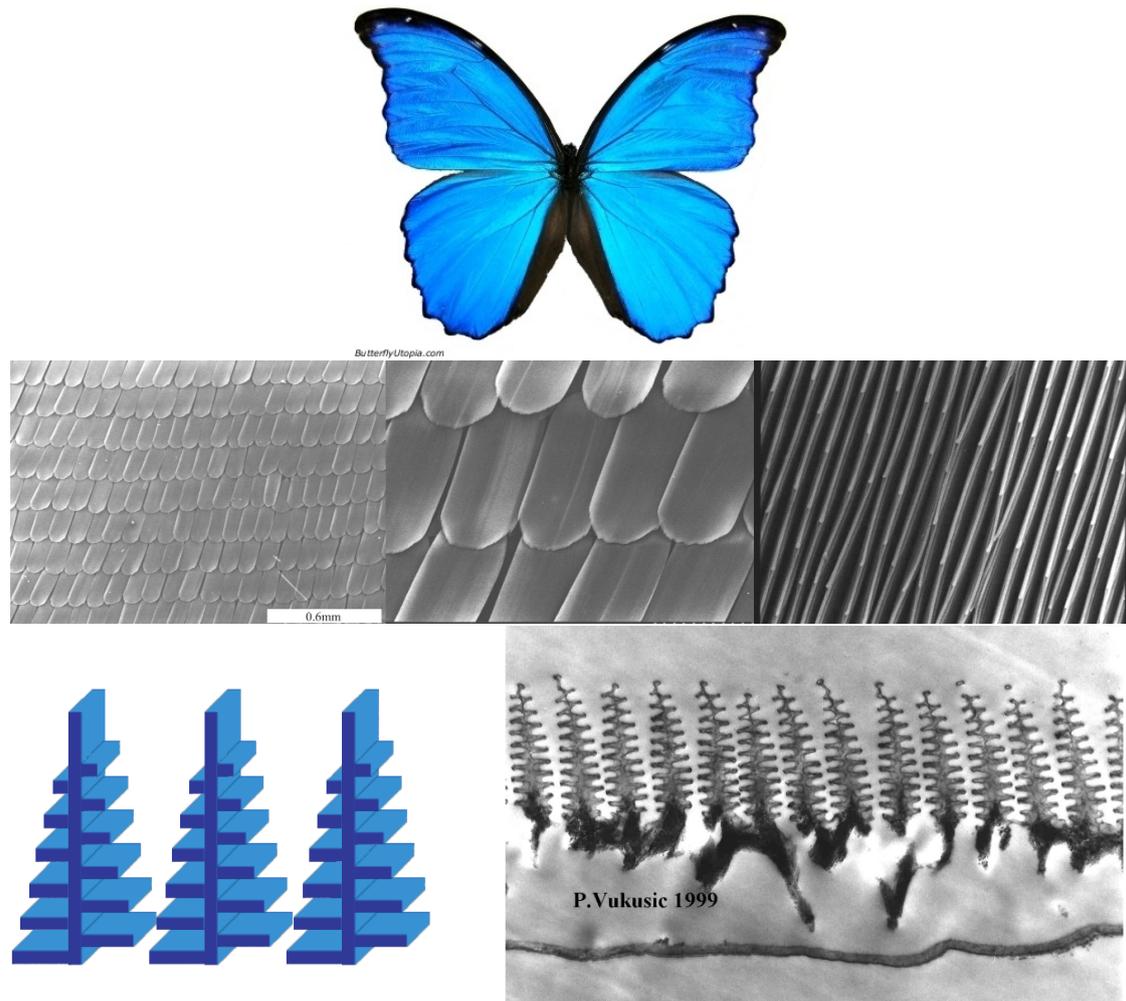


FIGURE 16 – Différents agrandissements de la poudre de la Morpho et la structure à arbre utilisée par Vukusic en 1999 pour simuler ce "système optique".

miroirs en micro échelle (appelés miroirs de Bragg) capable de changer les couleurs de la lumière, ou, techniquement, filtrer un signal optique. Plus généralement avec l'étude

de la propagation électromagnétique dans les nanostructures, nous pouvons créer des cristaux photoniques qui permettent le contrôle et la manipulation de la lumière en vue d'applications de type télécom. En particulier, les cristaux à deux dimensions ont atteint le niveau de maturité nécessaire pour le développement d'applications, comme on peut le voir dans les images suivantes.

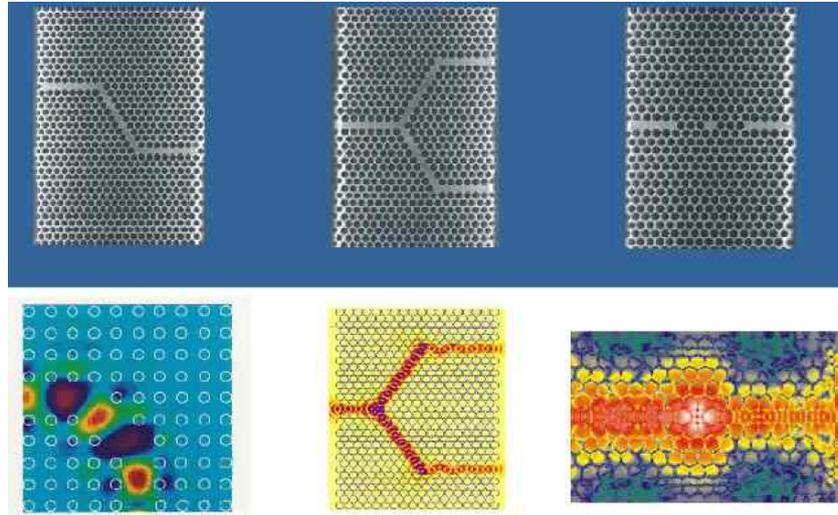


FIGURE 17 – Cristaux photoniques bidimensionnels employés comme guides d'onde.

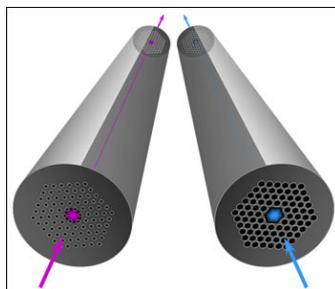


FIGURE 18 – Les fibres à cristal photonique ouvrent des perspectives sans précédent pour ce qui concerne le contrôle du mode de propagation en optique fibrée. Il est impressionnant de pouvoir ainsi "dérouler" la micronanophotonique sur des distances de plusieurs kilomètres!

Dans une vision simple, il suffit d'introduire des défauts de périodicité à des endroits convenablement choisis au sein du cristal pour réaliser les composants optiques que l'on désire, et les coupler entre eux en formant ainsi un véritable circuit photonique. Certes, la réalité est plus difficile qu'il n'y paraît, ne serait-ce que par la précision requise dans la fabrication des structures. Dans de nombreux cas, celle-ci est couramment estimée inférieure ou égale à la dizaine de nanomètres, nous sommes dans la nanophotonique!

5 Conclusions

Nous avons vu que la rapide évolution de la technologie fait qu'il est difficile de définir les contours nets de la photonique. Cependant celle-ci paraît entrer toujours plus dans la vie de tout le monde, de l'imagerie² aux télécommunications et jusqu'aux problèmes énergétiques. Ses capacités sont presque infinies et pour ça nous pourrions croire que dans les prochaines années son essor aura tendance à augmenter toujours plus. Ces impressions naïves se retrouvent même une confrontation dans le document "Nanophotonics- Advanced Technologies and Global Market (2009 - 2014)" rédigé par les analystes américains de MarketsandMarkets. D'ici 2014, le chiffre d'affaires de la nanophotonique pesèrent 3,6 milliards de dollars. Le taux annuel de hausse dès 2009 sera égal à 100%, et un rôle fondamental sera exercé par l'Asie, tant que, en 2014, 74% des centres d'affaires seront situés dans ce continent. Très marquée aussi sera la vitesse de hausse du chiffre d'affaires aux États-Unis et en Europe, régions qui auront un taux annuel de hausse de 161,1%. C'est positif parce que la grande demande de marché, fondée sur les grandes capacités de la photonique, permettra que la recherche dans ce secteur puisse continuer tranquillement. Nous avons vu que l'évolution naturelle est à l'heure qu'il est entre la microphotonique vers la nanophotonique, donc certainement les dispositifs du futur seront toujours plus petits et, on souhaite, avec de meilleures performances (vitesses de communication élevées, gaines énergétiques,...) . C'est pourquoi, le rôle des nanotechnologies étendues comme la coopération des chimistes, physiciens, ingénieurs électroniques et experts des matériaux est fondamental pour créer des dispositifs qui peuvent profiter des propriétés de la microéchelle, dont celles optiques pour le développement de la nanophotonique. Seulement en investissant sur ces technologies qu'on pourra transformer un papillon en un cristal photonique, de la même manière nous ne savons pas qu'est-ce que le futur nous réserve, mais sans doutes, il y aura de nouveaux dispositifs pour lesquels il faut travailler maintenant.

2. Outre l'imagerie macroscopique aussi celle microscopique a eu des développements. La microscopie optique a des limites physiques, donc il est impossible d'observer des échantillons trop petits. Aujourd'hui, avec la nanophotonique, a eu développé le microscope SNOM qui permet, avec la lumière, de voir les atomes aussi !

6 Bibliographie et sitographie

- **Wikipédia** (www.fr.wikipedia.org)
- **Centre de Compétence NanoSciences Ile-de-France**
(<http://www.cnanoidf.org/thematiques/nanophotonique-information-quantique>)
- **Centre de compétences en nanosciences de la région Rhône-Alpes**
(<http://www.cnano-rhone-alpes.org/spip.php?rubrique38&lang=fr>)
- **Le groupe Naphel de l'Institut d'Optique**
(http://lcfio.institutoptique.fr/naphel/FR/index_fr.html)
- **Institut des NanoSciences de Paris**
(<http://www.insp.upmc.fr/Nanophotonique-et-optique.html>)
- **Infinera** (<http://www.infinera.com/>)
- **IBM recherche en nanophotonique**
(http://domino.research.ibm.com/comm/research_projects.nsf/pages/photronics.index.html)
- **"Nanophotonics"**, H. Rigneault, J.M. Lourtioz, C. Delalande, A. Levenson
- **"Propagation électromagnétique dans les nanostructures"**
(<http://www.mapr.ucl.ac.be/cours/VIGNERON.PPT>)
- **"What a molecular transistor!"**, Giorgio Volpe - Optics & Photonics Focus
(<http://www.opfocus.org/index.php?topic=story&v=7&s=2>)
- **"Nanophotonics-Advanced Technologies and Global Market (2009-2014)"**
(<http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/nanophotonics-advanced-technologies-and-global-market-125.html>)
- **"Introduction à la Micro Optique"**, Allain trouillet, cours en ligne, 2008
(http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/PublisCours-OPI/OPI_fr_M09_C01/co/M5G1_web.html)
- **"Applications de la micro-optique"**, Allain trouillet, cours en ligne, 2008
(<http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/SiteOPI2/>)