

# Microsystèmes intégrés en niobate de lithium

Nadège COURJAL<sup>1,\*</sup>, Florent BEHAGUE<sup>1</sup>, Vincent Pêcheur<sup>1</sup>, Mathieu CHAUVET<sup>1</sup>, Maria-Pilar BERNAL<sup>1</sup>, Jérôme HAUDEN<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Institut FEMTO-ST, Université de Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

<sup>2</sup>iXBlue, Besançon, France

\*nadege.courjal@femto-st.fr

*Depuis des décennies, le niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) stimule un vif intérêt en photonique en raison de ses fortes propriétés électro-optiques et non-linéaires. L'opportunité récente de l'usiner en couches minces a élargi le spectre des applications déjà nombreuses du matériau. Les enjeux actuels concernent la miniaturisation des composants tout en préservant de faibles pertes optiques.*

## 1. Introduction

Découvert par Zachariasen dès 1928, puis étudié à partir de 1949 comme matériau ferroélectrique par les laboratoires Bell, le niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) est devenu un incontournable de la photonique, particulièrement apprécié pour des applications exigeantes telles que la modulation à haut débit pour télécommunications longues distances, l'astronomie, la gyroskopie de précision, ou la conversion de fréquence [1-3]. Son succès est tout d'abord lié à sa très forte susceptibilité non-linéaire du second ordre  $\chi^{(2)}$ , qui permet la réalisation de composants et systèmes optiques contrôlables par des champs électriques, et mène à des fonctionnalités aussi bien électro-optiques (EO) que tout optiques. A cela, s'ajoute une très grande maturité technologique et un approvisionnement favorisé par des applications très nombreuses, non exclusivement photoniques (il est exploité par exemple comme piézoélectrique dans les téléphones cellulaires), et concrétisé par une production qui dépasse les 40 tonnes par an. Sa gamme de transparence de [300 – 5000] nm est une caractéristique clef favorisant aussi bien le développement de composants dans l'infra-rouge moyen que les conversions de fréquences sur de larges bandes spectrales. Initialement réalisés dans des substrats épais de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ , les composants LiNbO<sub>3</sub> connaissent depuis une dizaine d'année un renouveau complet grâce au développement de couches minces de quelques centaines de nm, développement initié en 1998 par M. Levy et al, puis boosté à partir de 2010 par la société NanoLN<sup>®</sup>, première à les commercialiser. En favorisant des forts confinements optiques, les couches minces permettent une réduction des longueurs d'interactions et ouvrent des perspectives vastes en photonique et en quantique [3,4]. Les enjeux actuels sont de combiner des faibles pertes d'insertion à de forts confinements [4-6].

## 2. Circuits et composants électro-optiques LiNbO<sub>3</sub>

### 2.a. La modulation électro-optique (EO)

L'une des principales applications de LiNbO<sub>3</sub> en optique intégrée repose sur la modulation EO effectuée par effet Pockels, propriété directement liée à la susceptibilité  $\chi^{(2)}$  et qui se concrétise par une variation linéaire de l'indice de réfraction optique du cristal en présence d'un champ électrique externe. Dans la pratique, cet effet est exploité en canalisant la lumière -souvent une onde monochromatique issue d'un laser- dans des guides optiques monomodes entourés d'électrodes. Les électrodes induisent un champ électrique moyen sur le guide, proportionnel à  $V/g$ , où  $V$  est la tension appliquée,  $g$  est la distance entre les deux électrodes. La modulation de l'indice de réfraction ainsi obtenue conduit directement à une modulation de phase, fonction de base des composants EO LiNbO<sub>3</sub> (*Figure 1a*) [5].

Autre composant phare de l'optique intégrée LiNbO<sub>3</sub>, le modulateur d'intensité est obtenu par une modulation de phase convertie en modulation d'amplitude par un interféromètre de Mach-Zehnder intégré (*Figure 1b*). Plus précisément, un signal optique incident se propageant initialement dans un guide droit se sépare par une jonction Y en deux guides entourés d'électrodes. Un déphasage différentiel  $\Delta\varphi = \pi V/V_\pi$  est ainsi appliqué entre les deux signaux,

où  $V_\pi$  correspond à la tension  $V$  à appliquer pour que  $\Delta\varphi=\pi$ . Ainsi, la puissance optique  $P$  à la sortie d'un modulateur de type interféromètre de Mach-Zehnder (MZM) dépend de la tension  $V$  selon la relation :  $P(V)=I+\cos(\Delta\varphi)$ . En appliquant un signal électrique autour d'une tension continue qui définit le point de fonctionnement, on peut transférer une modulation analogique ou numérique électrique en signal lumineux modulé (*figure 2*). On rencontre couramment aujourd'hui des architectures plus complexes combinant des modulateurs de phase et d'amplitude, plusieurs modulateurs d'amplitude en parallèle, ou des combinaisons avec diversité de polarisation (*figure 1c*) [3].

Une propriété attractive des modulateurs EO LiNbO<sub>3</sub> est leur très large bande passante qui peut aller jusqu'à 100 GHz ou plus [1], obtenue par des électrodes à ondes progressives générant un signal électrique se propageant le long du guide optique. Lorsque signal optique et signal électrique se propagent à la même vitesse (=accord de phase), les conditions sont optimales pour atteindre des très hauts débits de modulation.

### 2.b. Applications commerciales

Les modulateurs EO LiNbO<sub>3</sub> se positionnent sur des marchés très divers, connus et exploités depuis plus de 30 ans.

Dès le début des années 1990, les modulateurs de phase LiNbO<sub>3</sub> sont utilisés dans les **gyroscopes à fibres optiques** (FOG), pour analyser les déphasages induits par effet Sagnac lors des rotations des axes gyroscopiques. Ces FOG intégrés dans les centrales inertielles de navigation civiles et militaires permettent des mesures de vitesses de rotation d'extrêmement haute précision ( $10^{-3}$  °/heure) [2]. Depuis 1990 environ 500 000 axes gyroscopiques ont été fabriqués. Plusieurs centaines sont en orbite dans des satellites autour de la terre.

LiNbO<sub>3</sub> est plus généralement très apprécié pour les **applications spatiales**, grâce notamment à son immunité aux rayonnements. Ainsi, la mission Grace Follow embarque plusieurs modulateurs de phase LiNbO<sub>3</sub> pour stabiliser des lasers de métrologie à 1060 nm, et la plupart des futurs satellites embarqueront des **Télescopes Lasers de Communication** (LCT) avec modulateurs LiNbO<sub>3</sub> pour assurer des communications ciel-terre à plusieurs dizaines de Gb/s.

Le début des années 2000 a vu l'avènement des **télécommunications optiques** sur fibres optiques : les modulateurs large bande LiNbO<sub>3</sub> y ont joué un rôle clé en permettant la propagation de signaux à très hauts-débits (>10 GB/s) sur des distances supérieures à 100000 km [1]. Les formats de codage, initialement basés sur la modulation d'amplitude, ont évolué ensuite pour combiner à la fois des codages en amplitude et en phase et des multiplexages en polarisation pour atteindre 100Gb/s par longueur d'onde. Ce marché des Télécoms longues distances représente de loin le principal marché pour les modulateurs LiNbO<sub>3</sub>. Près de 130 000 modulateurs sont fabriqués par an pour les télécoms soit environ 75% du volume annuel produit.

Les modulateurs large bande LiNbO<sub>3</sub> fonctionnant à 1053 nm et 1064 nm sont également couramment utilisés dans les **lasers à fibres** puissants, pour la mise en forme temporelle des impulsions lumineuses. Des modulateurs à très fort contrastes (> 55 dB) équipent toutes les lignes des lasers Megajoules du monde comme le LMJ du CEA à Bordeaux ou le NIF au Livermore USA.

### 3. Composants LiNbO<sub>3</sub> non-linéaires (NL), ou « tout-optiques »

La forte non-linéarité du second ordre du LiNbO<sub>3</sub> le place également en position avantageuse pour le développement de dispositifs de conversion de fréquences optiques faisant interagir trois ondes, dont quelques processus courants sont illustrés en *figure 3*. En d'autres termes, LiNbO<sub>3</sub> ne répond pas de façon linéaire lorsqu'il est soumis à un champ optique harmonique intense : des fréquences différentes de l'onde excitatrice peuvent être générées.

L'exemple le plus emblématique des processus de conversion de fréquence est le doublage de fréquence (SHG : Second Harmonic Generation) où deux photons de fréquence  $f_p$  donnent naissance à un photon de fréquence double ( $f_{SHG}$ ). Les faisceaux lasers verts émettant à 532 nm, sont ainsi générés à partir de lasers Nd :YAG émettant initialement à 1064 nm.

Le processus « somme de fréquences » (SFG), génère quant à lui une onde dont la fréquence correspond à la somme des fréquences de deux faisceaux incidents (*figure 3b*). Cela permet par exemple de transposer les fréquences de signaux vers des gammes spectrales où les détecteurs sont moins chers ou plus sensibles.

Enfin, le processus « différence de fréquence » (DFG) sert, par exemple, à produire une source émettant dans le moyen infra-rouge (MIR) à partir de deux sources visibles. L'ensemble de ces processus, dits paramétriques, sont notamment caractérisés par une conservation de l'énergie des photons mis en jeu.

Cependant, les conversions vers les fréquences désirées ne sont efficaces qu'à certaines conditions dont la plus contraignante est la condition d'accord de phase (voir *figure 3*). Dans le LiNbO<sub>3</sub>, la solution de choix est de la satisfaire par inversion périodique de la polarisation spontanée. Le choix de la période d'inversion donne une grande souplesse qui permet d'optimiser les différents processus NL et d'exploiter la large gamme spectrale de transparence du LiNbO<sub>3</sub> et le coefficient non-linéaire  $d_{eff}$  le plus fort du matériau.

L'optique guidée permet des processus de conversion NL améliorés. En effet, si on reprend l'exemple du doublage de fréquence, l'efficacité de conversion normalisée  $\eta$ , valide hors déplétion du faisceau pompe de puissance  $P_p$ , pour des faisceaux de section  $S$  qui se propagent en accord de phase sur une longueur  $l$  est donnée par :

$$\eta = \frac{P_{shg}}{P_p^2} \propto \frac{d_{eff}^2 l^2}{S} \quad (1)$$

Ce rendement, limité à quelques 1%/W en propagation libre en raison de la diffraction, devient beaucoup plus fort si les faisceaux sont confinés en guides (faible  $S$ ) et s'ils interagissent sur une grande longueur  $l$ . La littérature est riche de travaux avec des guides LiNbO<sub>3</sub> périodiquement inversés (PPLN).

#### 4. Enjeux actuels liés aux composants LiNbO<sub>3</sub>

Les composants optiques LiNbO<sub>3</sub> dits « classiques » sont à base de guides réalisés par diffusion titane ou échange protonique [3,5]. Ces guides faiblement confinés se caractérisent par de faibles pertes d'insertions (< 3 dB), grâce à un fort recouvrement avec les modes optiques des fibres. En revanche, ce faible confinement limite les interactions EO ou NL et nécessite de grandes longueurs actives (> 1 cm) en compensation.

L'enjeu des très forts confinements a motivé le développement de couches minces LiNbO<sub>3</sub> -appelées « LNOI » (LN On Insulator) [3,4], obtenues par une technique de type smart-cut® (initialement développée en 1995 par le LETI-CEA pour des couches SOI). La technique, basée sur l'implantation ionique, permet la réalisation de couches de quelques centaines de nm d'épaisseur, dans lesquelles des guides de 1 μm<sup>2</sup> de section peuvent être inscrits par plasma ionique. On peut illustrer l'intérêt de cette approche par les travaux de l'équipe de M. Lončar à Harvard (*figures 4a et 4b*) : les rayons de courbures micrométriques et les électrodes rapprochées autour des guides confinés permettent de gagner un ordre de grandeur en compacité par rapport aux composants classiques, et de démontrer une nouvelle fonctionnalité pour la génération EO large bande de peignes de fréquence à faible tension de commande.

L'intégration de cristaux photoniques (CPs) permet d'améliorer encore de deux ordres de grandeur la compacité. La *figure 4c* montre par exemple un CP bi-périodique de 12 x 12 μm<sup>2</sup> intégré dans une couche LiNbO<sub>3</sub> de 700 nm d'épaisseur. Ce composant ultra-compact présente une résonance Fano dont la position spectrale dépend de l'indice et varie donc en présence de champs électriques appliqués : il s'agit du plus petit capteur de champ électrique au monde, avec une résolution spatiale record, une bande passante qui dépasse le THz et qui ouvre par ailleurs la voie à une nouvelle génération de μcomposants EO ou NL intégrés en bouts de fibres.

Si les couches minces permettent des compacités ultimes, elles ne permettent en revanche pas des faibles pertes d'insertion -les plus faibles reportées à ce jour étant de 8 dB, obtenues par la société Partow Technologies®. Une approche alternative à faible coût consiste à réaliser des structures de type « ridge » à la scie circulaire de précision. Ainsi, le guide PPLN de la *figure 5* permet un fort confinement apporté par le saut d'indice, tout en assurant des pertes d'insertions inférieures à 3 dB, et il génère des faisceaux SHG de plusieurs centaines de mW sans problème d'instabilité. La fabrication commence par l'inversion périodique des domaines, suivie d'un report sur un autre substrat (silicium par exemple). Un amincissement mécano-chimique s'ensuit, et finalement une découpe-polissage, pour former des guides carrés de 3 à 10 μm de côté. Les rendements de conversion normalisés dépassent 200%/W

(figure 5b). Des puces similaires mais adaptées pour de la SFG appliquée à la détection de signaux MIR dans le domaine de l'astronomie ont également été mises en œuvre [7].

En combinant des techniques standards de guidage et un usinage à la scie circulaire de précision, il est également possible de réaliser des configurations EO compactes à faibles pertes : des micromodulateurs de 200  $\mu\text{m}$  de longueur active et 5 dB de pertes d'insertion ont ainsi été démontrés, faits à partir de guides membranaires à transitions adiabatiques et dans lesquels sont intégrés des résonateurs Fabry-Perot [6]. La technique, simple à mettre en œuvre, peut être déclinée pour de nombreuses fonctionnalités, incluant génération de peignes de fréquences, filtres dynamiques ou spectromètres.

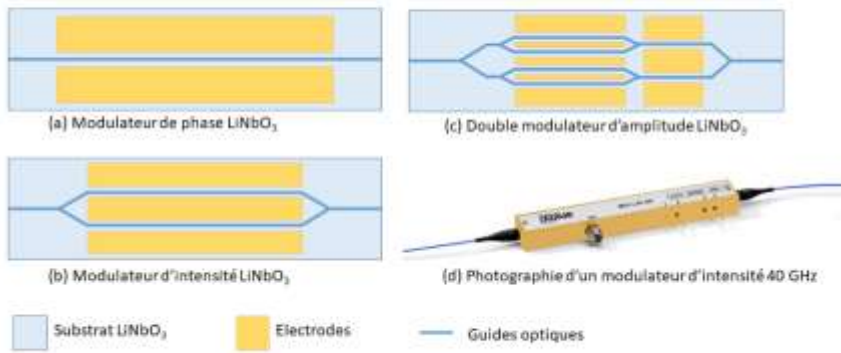
## 5. Conclusion

Le niobate de lithium, par ses propriétés optiques attractives et par sa très grande maturité technologique, s'est imposé dans plusieurs secteurs commerciaux, des télécommunications à l'aérospatial. Les composants classiques sont réalisés dans des substrats massifs et se caractérisent par de faibles pertes d'insertion mais aussi par des encombrements centimétriques. Une nouvelle génération de composants compacts voit le jour, à base de couches minces, à cristaux photoniques ou à guides confinés, et ouvre la voie à de nouvelles fonctionnalités, qu'elles soient EO ou NL. En parallèle, des configurations intermédiaires à faibles coûts permettent de combiner des forts confinements à de faibles pertes d'insertion, en exploitant une technique de découpe-polissage à la scie circulaire de précision. Malgré sa très grande ancienneté dans le domaine de la photonique,  $\text{LiNbO}_3$  connaît ainsi un très fort regain d'intérêt, caractérisé par une explosion du nombre d'articles et de projets sur ce sujet. Les évolutions vers les assemblages photoniques hybrides pourraient encore booster cet engouement dans les prochaines années.

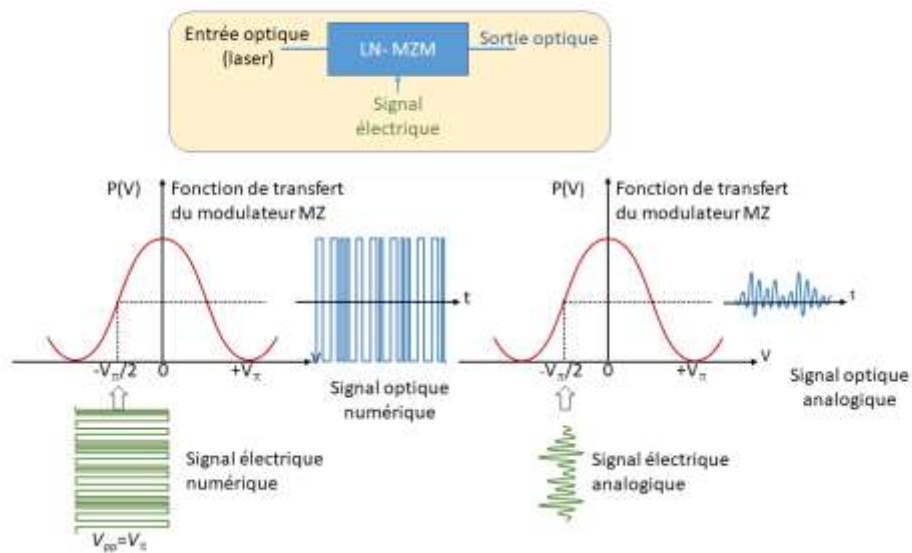
**Remerciements** : Il est impossible d'écrire un article sur  $\text{LiNbO}_3$  sans penser à Marc de Micheli : les auteurs tiennent à saluer sa mémoire et à exprimer leur reconnaissance pour ses contributions en optique intégrée  $\text{LiNbO}_3$ . Ils remercient par ailleurs l'ANR dans le cadre du financement ANR-16-CE24-0024, et l'EUR-EIPHI.

## Références

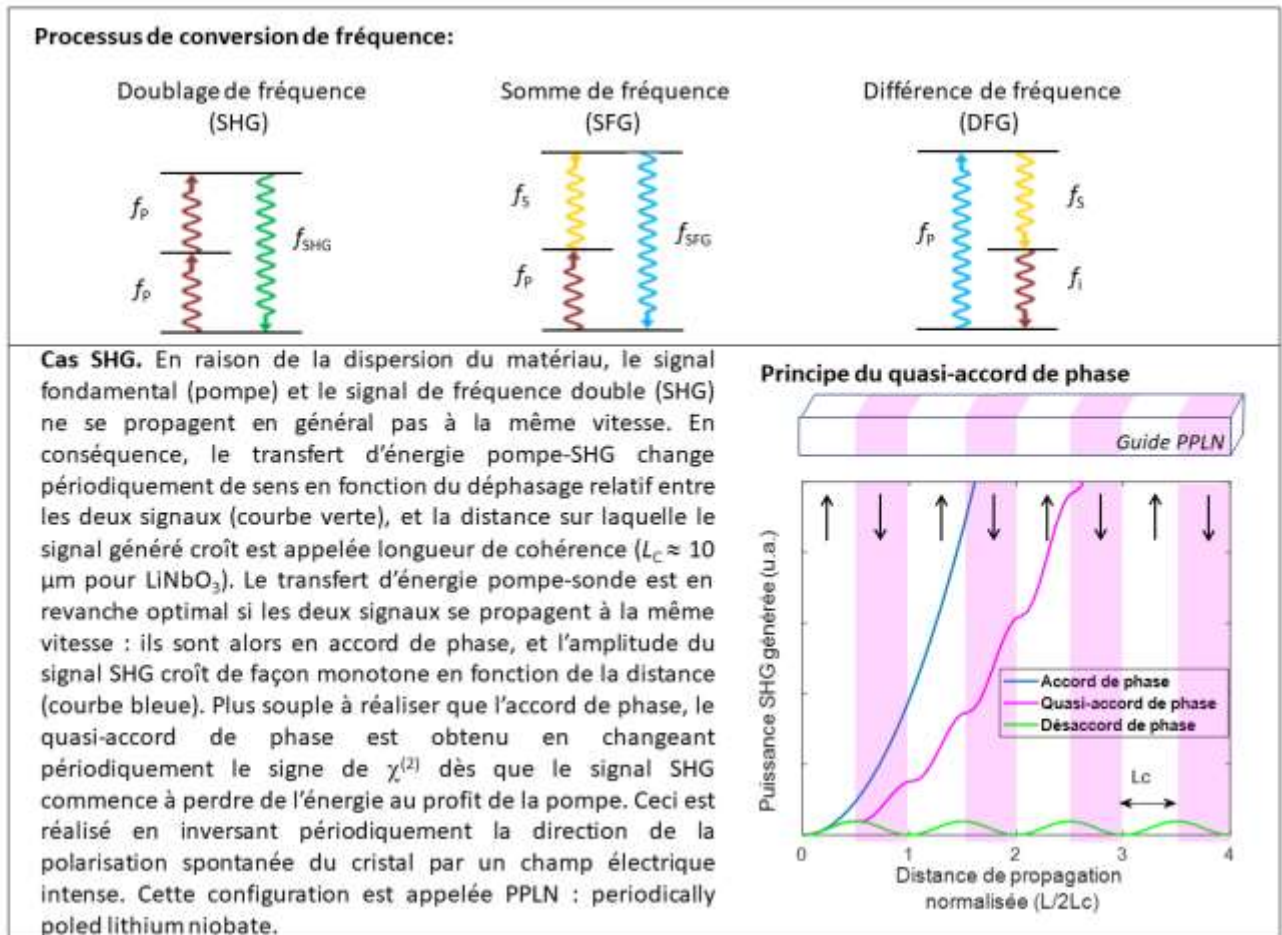
- [1] E. Wooten, K. M. Kissa, A. Yi-Yan, E. J. Murphy, D. A. Lafaw, P. F. Hallemeier, D. Maack, D. V. Attanasio, D. J. Fritz, G. J. McBrien and D. E. Bossi, "A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems", IEEE JQE, **6**, (2000)
- [2] H Lefèvre, The Fiber-Optic Gyroscope, Second Edition, Artech House (2014)
- [3] J.E. Toney, Lithium niobate photonics, Artech House (2015)
- [4] A. Boes, B. Corcoran, L. Chang, J. Bowers, and A. Mitchel, Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits, Laser & Photonics reviews (2018)
- [5] N. Courjal, M.-P. Bernal, A. Caspar, G. Ulliac, F. Bassignot, L. Gauthier-Manuel, M. Suarez, Lithium Niobate Optical Waveguides and Microwaveguides, Intechopen BoD–Books on Demand (2018).
- [6] N Courjal, A Caspar, V Calero, G Ulliac, M Suarez, C Guyot, MP Bernal, Simple production of membrane-based  $\text{LiNbO}_3$  micro-modulators with integrated tapers, Optics letters (2016)
- [7] L. Lehmann , L. Grossard, L. Delage, F. Reynaud, M. Chauvet, F. Bassignot, F. Martinache, F. Morand, J.-P. Rivet, F.-X. Schmider and D. Vernet, Towards a mid-infrared L band up-conversion interferometer: first on-sky sensitivity test on a single arm, MNRAS, **485**, 3595 (2019)



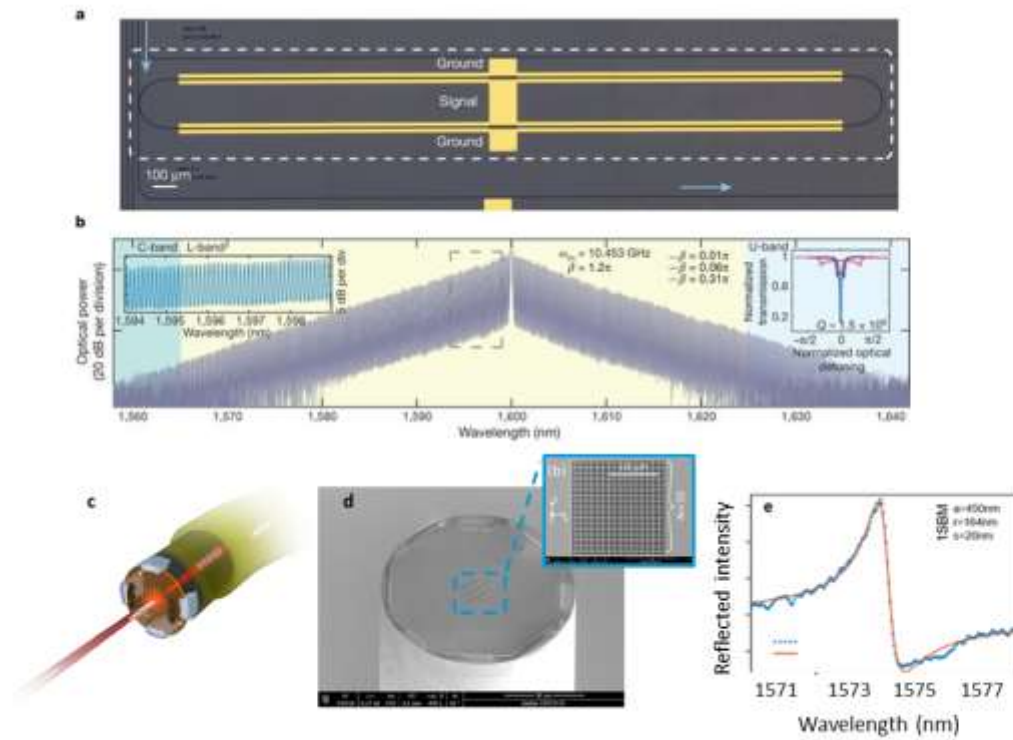
**Figure 1.** Différentes architectures de modulateurs intégrés LiNbO<sub>3</sub>. (a) Modulateur de phase. (b) Modulateur d'amplitude. (c) Double modulateur d'amplitude parallèle. (d) Photographie d'un modulateur d'intensité commercial 40 GHz. Une description plus complète de la fabrication et des caractéristiques est donnée en références [1,2].



**Figure 2.** Principe de la modulation d'intensité pour les transmissions numériques à gauche et la modulation analogique à droite



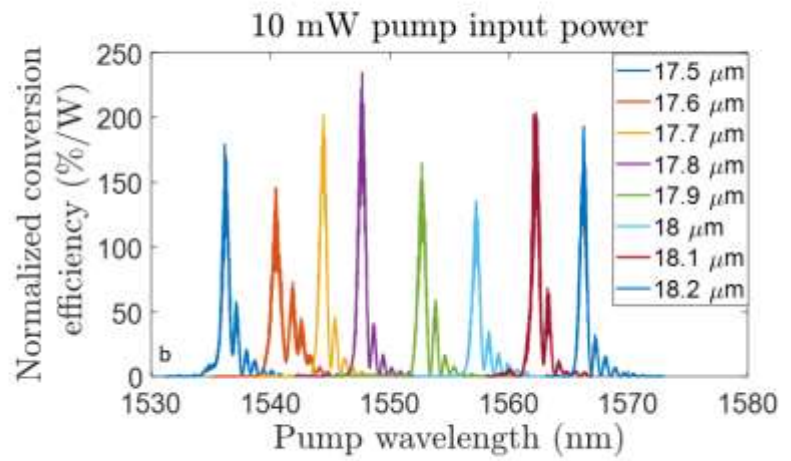
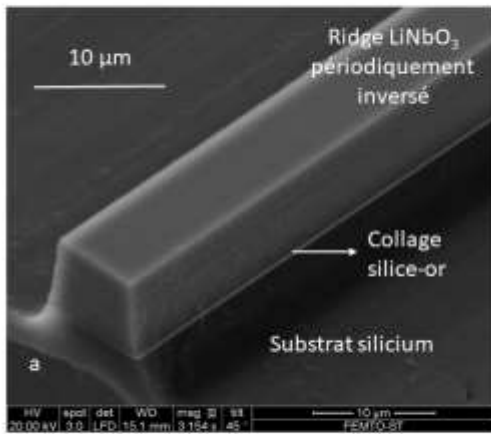
**Figure 3.** Illustration des transferts d'énergie non-linéaires à 3 ondes, et focus sur la configuration PPLN pour obtenir un quasi-accord de phase dans le cas de la génération de seconde harmonique (SHG)



**Figure 4.** Composants LiNbO<sub>3</sub> compacts sur couches minces. (a) Deux modulateurs de phase intégrés dans un résonateur à rayon de courbure micrométrique. (b) Réponse spectrale associée à (a) : 900 peignes de fréquences répartis sur 80 nm, un record pour une tension de commande aussi faible que 10 V. (c, d, e) Cristal photonique LiNbO<sub>3</sub> intégré sur fibre optique : (c) Schéma de principe, (d) Image au microscope à balayage électrique (MEB), (e) Spectres en réflexion expérimental (bleu) comparé au spectre théorique (rouge).

(a), (b) Reprinted with permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer Nature, M. Zhang et al, Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator, *Nature* **568**, 373-377 (2019), doi : 10.1038/s41586-019-1008-7, Copyright 2019.

(c), (d), (e) Adapted by permission from M.P. Bernal, An ultra wideband-high spatial resolution-compact electric field sensor based on Lab-on-Fiber technology, *Scientific reports*, 9:8058 (2019), doi : 10.1038/s41598-019-44644-y



**Figure 5.** Guides  $\text{LiNbO}_3$  PPLN réalisés à la scie circulaire de précision. (a) Image MEB d'un guide. (b) Rendement de conversion SHG pour différentes périodes d'inversion, pour des guides réalisés sur la même puce, de 2 cm de longueur.

(a) Adapted by permission from M. Chauvet, Single photon PIR upconversion detector at room temperature with a PPLN ridge waveguide, *Optics Express*, 27, 19233-19241 (2019), doi : 10.1364/OE.27.019233