

## Guides d'onde monocristallins pour les technologies quantiques

Cette thèse a pour objectif le **développement d'une plateforme innovante de photonique intégrée** fonctionnant à la longueur d'onde des télécommunications, à base **d'ions de terre rare** distribués dans des matrices oxydes pour des **dispositifs de technologie quantique avancés**. Ce projet inclura la conception des structures photoniques, leur optimisation, et l'étude des mécanismes influençant les propriétés spectroscopiques des ions, en particulier la cohérence optique et de spin.

En plus de permettre une exaltation de l'interaction lumière-matière, ces dispositifs permettront une compatibilité avec d'autres composants de photonique intégrée (sources, détecteurs, réseaux de fibres) et faciliteront le multiplexage spatial. L'impact attendu est donc significatif et dual car cette technologie permettra d'améliorer à la fois l'efficacité des **mémoires quantiques** indispensables aux communications quantiques terrestres ou spatiales [Zhou2023], mais aussi les performances des **analyseurs spectraux de signaux RF** développés par Thales Research & Technology [Berger2016].

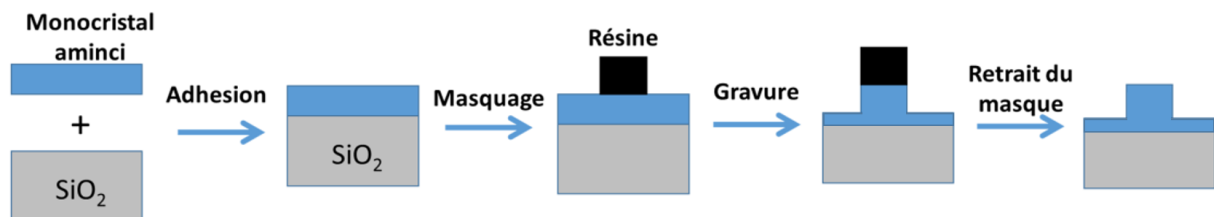


Figure 1 : Schéma de concept du procédé : adhésion, masquage et gravure par ICP-RIE des guides.

### Programme de la thèse

Ce doctorat s'appuiera sur les avancées réalisées durant la thèse de Mickael Chan (fin prévue en février 2026). Jusqu'à présent, des démonstrations théoriques (simulations) et expérimentales ont permis d'identifier les géométries de guides d'onde les plus prometteuses et d'évaluer leur faisabilité. A l'issue de ce travail, les guides de type *shallow ridge* semblent un bon compromis pour avoir un confinement significatif du champ dans un mode compatible avec celui des fibres optiques, tout en conservant une certaine flexibilité au niveau du procédé de fabrication. Certaines étapes technologiques telles que la gravure de l'oxyde ou bien un polissage très fin des surfaces avant adhésion ont pu être démontrées [Talneau2024, Talneau2025 under review]. Bien que des adhésions sur SiO<sub>2</sub> aient été réalisées, avec une bonne tenue aux cycles de refroidissement cryogénique, d'autres étapes telles que l'aplanissement des surfaces sont à améliorer afin de permettre une meilleure reproductivité et contrôle de l'épaisseur des membranes. De plus l'investigation de structures plus complexes telles que des guides courbes ou bien des transferts de modes adiabatiques en vue d'une adaptation optimale avec le mode de la fibre seront réalisées. Enfin, un très bon

contrôle de la rugosité des surfaces sera nécessaire afin de minimiser les pertes de propagations.

Une part significative de la thèse sera consacrée à la caractérisation spectroscopique et la démonstration des performances de ces dispositifs. Le ou la doctorant·e optimisera dans un premier temps la fabrication des guides d'onde de type "shallow ridge" dans  $Y_2SiO_5$  dopé aux ions  $Er^{3+}$ . Un effort particulier sera consacré au développement expérimental permettant la caractérisation des pertes optiques (injection, propagation) et de dépolarisation, en particulier à basse température. Ces mesures permettront une amélioration itérative continue de notre procédé et une estimation du gain apporté par d'éventuels post-traitements après la gravure (thermique ou chimique avec le dépôt d'une couche de passivation).

En parallèle de l'avancée de ces structures, une étude spectroscopique approfondie des ions erbium dans le guide sera menée, afin de sélectionner la concentration et l'isotope le plus favorable pour les deux applications de technologies quantiques identifiées (mémoire quantique et analyse spectrale). Notons qu'à ce jour aucune étude ne reporte l'influence d'une gravure sèche sur les propriétés spectroscopiques des ions de terre rare. La grande sensibilité de ces méthodes de caractérisation spectroscopique sera mise à profit pour déterminer les contraintes résiduelles induites lors des différentes étapes du procédé. Ces résultats seront confrontés à une mesure directe de la déformation grâce à des mesures interférométriques grand champ permettant de cartographier les faibles déformations (30 nm) sur de grandes surfaces (C2N). Au-delà de l'optimisation du procédé, cette étude contribuera à une meilleure compréhension de la relation entre la structure fine électronique des ions de terres rares et les contraintes structurales. Notons que cette compréhension est particulièrement importante pour d'autres champs d'application comme l'optomécanique ou la stabilisation de lasers sur trous spectraux [[Galland2020](#)].

Une fois fabriqués, optimisés et caractérisés, les guides d'onde monocristallins seront testés sur des dispositifs de mémoire quantique et d'analyse spectrale. Dans le cas des mémoires, il s'agira de déterminer le protocole le plus favorable pour exploiter pleinement l'opportunité qu'offrent ces guides. En effet, les mémoires quantiques se déclinent selon une grande variété de protocoles, parmi lesquels l'« Atomic Frequency Comb » (AFC) [[Afzelius2009](#)] ainsi que le « Gradient Echo Memory » (GEM) [[Hetet2008](#)], qui reste à ce jour le plus efficace, ou encore le plus récent « Noise Less Photo Echo » (NLPE) [[Ma2021](#)]. L'utilisation d'une structure guidée pourrait améliorer significativement les performances de ces protocoles, notamment en augmentant le contraste des structures inscrites dans le profil d'absorption et en réduisant le bruit. Dans le cas de l'analyse spectrale, on s'intéressera à l'impact de l'approche guidée sur les performances en termes de sensibilité de détection, de dynamique, et de résolution fréquentielle.

Enfin, notre procédé technologique, très versatile, pourra être également testé sur d'autres matrices cristallines, telles que  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG, cristal cubique) et  $CaWO_4$

(cristal uniaxe), qui présentent des avantages potentiels en termes de bruit magnétique, de polarisation et de gravure sèche. Cette dernière partie, plus prospective, constituera un projet annexe pour le doctorant qui interviendra comme un support pour la caractérisation.

Année	Tache	IRCP	C2N	IL	TRT
1	- Elaboration des guides d'onde - Caractérisation des pertes et de la propagation en espace libre - Caractérisation spectroscopique des monocristaux massifs	30%	30%	20%	20%
2	- Etude des contraintes dans les structures - Caractérisation spectroscopique de l'Er dans les guides - Optimisation du couplage	20%	15%	35%	30%
3	- Fabrication du guide optimisé - Démonstration des performances pour les MQ et ASRF	10%	10%	35%	45%
	Répartition du temps sur les 3 ans	20%	18%	30%	32%

Ce projet associe trois laboratoires académiques franciliens (l'IRCP, le C2N et l'Institut Langevin) et Thales Research & Technology, habitués à travailler ensemble. Le·la doctorant·e sera accueilli·e au sein de chaque laboratoire, encadré à l'IRCP par Alban Ferrier, au C2N par Anne Talneau, à l'Institut Langevin par Anne Louchet-Chauvet, et à TRT par Sacha Welinski et Perrine Berger. Dans un premier temps l'effort principal sera consacré à la fabrication des dispositifs (C2N et IRCP) et leur caractérisation spectroscopique (IL). Les aspects technologiques d'intégration au sein du cryostat ainsi que les démonstrations de performances auront lieu dans la deuxième partie du projet (IL, TRT). Ce doctorat sera adossé au projet ASTRID GOMMETTE qui démarre en mars 2025. La direction de thèse sera assurée par Anne Louchet-Chauvet (HDR).