



HAL
open science

Dispositif de réalité augmentée basé sur des concepts de couplage guide d'onde/hologramme

Basile Meynard

► To cite this version:

Basile Meynard. Dispositif de réalité augmentée basé sur des concepts de couplage guide d'onde/hologramme. Optique / photonique. Université Grenoble Alpes, 2021. Français. NNT : . tel-03223425v1

HAL Id: tel-03223425

<https://hal.science/tel-03223425v1>

Submitted on 10 May 2021 (v1), last revised 19 Nov 2022 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Optique et Radiofréquence (OR)**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Basile Meynard

Thèse dirigée par **Engin Molva, ingénieur HDR, CEA-LETI**

préparée au sein du **CEA-LETI, Laboratoire des architectures et systèmes photoniques**
dans l'**École Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal (EEATS)**

Dispositif de réalité augmentée basé sur des concepts de couplage guide d'onde/hologramme

Thèse soutenue publiquement le **2 mars 2021**,
devant le jury composé de :

Dr François Royer

Professeur, Université de Saint-Étienne – Jean Monnet, rapporteur et président du jury

Dr Taha Benyattou

Directeur de recherche, CNRS Délégation Rhône Auvergne, rapporteur

Dr Élise Ghibaudo

Maître de conférence, Université Grenoble Alpes, examinatrice

Dr Christelle Monat

Maître de conférence, École Centrale Lyon, examinatrice

Dr Olivier Haeberle

Professeur, Université de Mulhouse – Haute-Alsace, examinateur

Dr Engin Molva

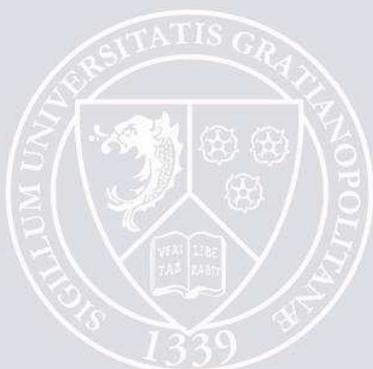
Ingénieur HDR, CEA-LETI, directeur de thèse

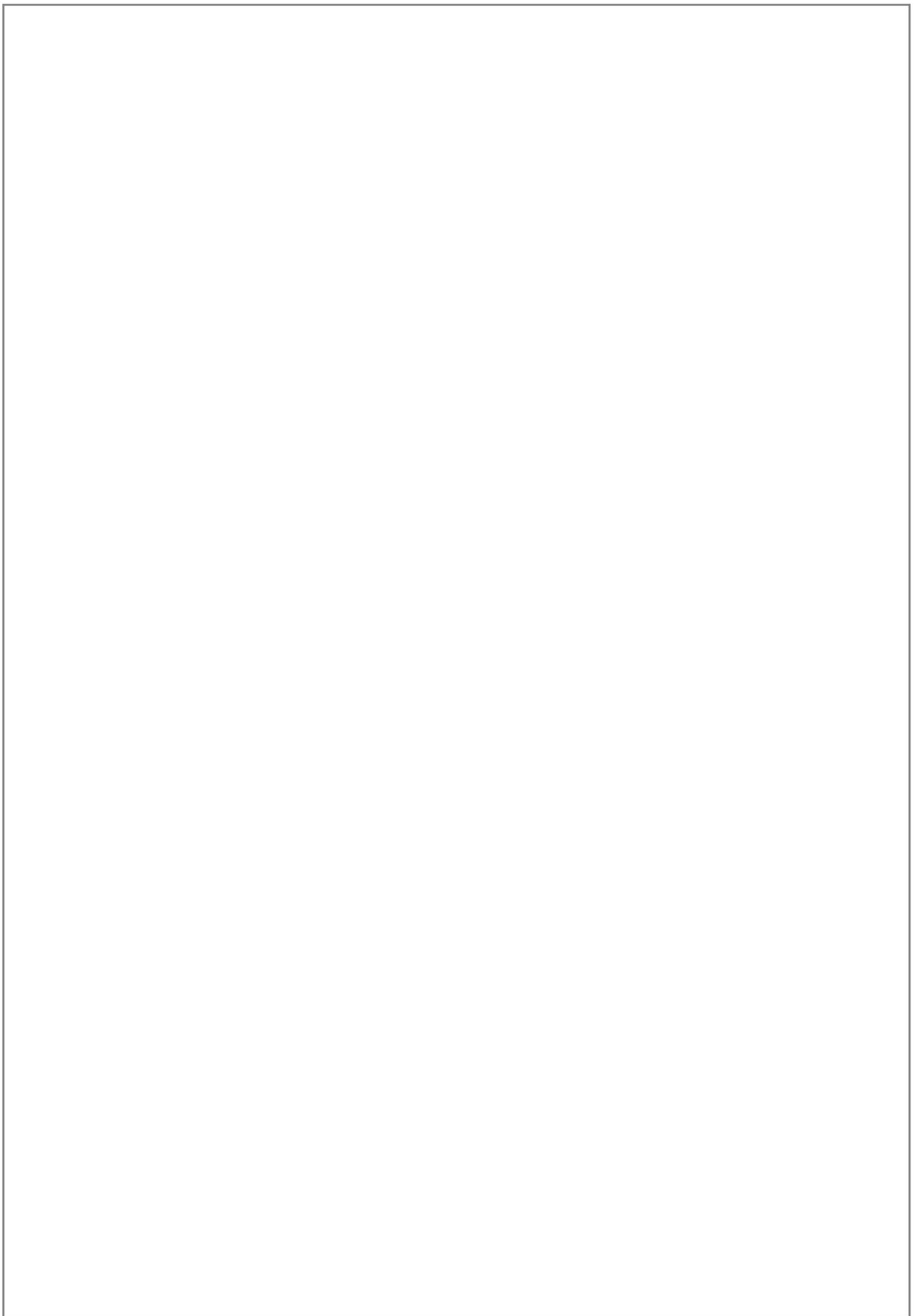
Dr Christophe Martinez

Ingénieur de recherche, CEA-LETI, encadrant, invité

Dr Daivid Fowler

Ingénieur de recherche, CEA-LETI, co-encadrant, invité





Titre en français : *Dispositif de réalité augmentée basé sur des concepts de couplage guide d'onde/hologramme*

Résumé en français :

L'institut de recherche du CEA-LETI a récemment développé un nouveau concept de projection rétinienne. Ce système de projection est embarqué sur un verre de lunette transparent et vise des applications pour la réalité augmentée (RA). Le concept du CEA-LETI est en rupture par rapport au fonctionnement d'autres lunettes RA déjà disponibles sur le marché. Notamment, il doit permettre de générer et de focaliser des images directement sur la rétine de l'observateur (effet d'auto-focalisation) sans utiliser d'éléments d'optique qui peuvent s'avérer complexes et volumineux (ex : combineurs optiques, lentilles etc.). Cela permet d'obtenir un dispositif complètement intégré qui se veut facile à porter et à accepter socialement.

Le concept est composé de deux parties principales : un circuit photonique intégré et un hologramme analogique. Cette thèse se concentre sur le développement du circuit photonique. La partie holographique est développée en parallèle de la thèse par d'autres membres de l'équipe de recherche.

Les travaux de thèse ont permis de concevoir, de fabriquer et de caractériser expérimentalement une bibliothèque de blocs photoniques de base (ex : guides d'onde monomodes, coupleurs, commutateurs actifs etc.). Ceux-ci pourront être assemblés pour former le circuit photonique applicatif final du projet à court terme. Les composants sont formés de Si_3N_4 et ont été optimisés pour fonctionner à $\lambda = 532$ nm (vert). Leur fabrication s'est déroulée en salle blanche sur des plaques 200 mm à l'aide des plateformes du CEA-LETI et de STMicroélectronique. La caractérisation expérimentale des composants photoniques a été complétée à l'aide d'un *prober* optique automatisé et d'un goniomètre. Ce dernier est un outil de caractérisation entièrement conçu pendant la thèse et qui répond aux besoins spécifiques en caractérisation du projet. Enfin, un circuit applicatif simple a été conçu pour étudier l'interaction entre les circuits photoniques et les hologrammes analogiques.

Mots clés en français :

Optique intégrée, nitrure de silicium, SiN, spectre visible, réalité augmentée, hologramme

English title : *Augmented reality devices based on waveguide/hologram coupling*

English summary :

The CEA-LETI research institute recently developed a novel retinal projection concept. The projection system is embedded on transparent glasses for augmented reality (AR) applications. The CEA-LETI concept aims to overcome current limitations of already commercialized AR glasses, such as complex and bulky optics. It uses a self-focusing effect to generate images directly on the retina of a user without any artificial optical components, allowing the creation of a fully integrated and portable device.

The concept is separated into two main parts : an integrated photonic circuit and an analog hologram. This thesis focuses on the first part, i.e. the photonic circuit. The hologram is developed in parallel of the thesis by other team members.

The thesis allowed to design, fabricate and experimentally characterize a design kit made of basic photonic components (ex : singlemode waveguide, various couplers, active optical switches...). They can be assembled in order to design the complex photonic circuit of the final retinal projection device. The photonic components are made of Si_3N_4 and were optimized to work specifically at $\lambda = 532$ nm (green). They were fabricated in clean rooms on 200 mm wafer platforms at the CEA-LETI and STMicroelectronics fabrication facilities. The characterization of the components was carried out with an automated optical prober and a goniometer. The goniometer was entirely designed and fabricated during the thesis for the purpose and the specific needs of this project. Finally, a simple applicative photonic circuit was designed to study the interaction between our photonic circuits and the analog hologram.

English keywords :

Integrated optics, silicon nitride, SiN, visible spectrum, augmented reality, hologram

Résumé de thèse vulgarisé en français :

L'institut de recherche du CEA-LETI a récemment développé un nouveau concept servant à afficher des images dans l'œil d'un observateur. Ce concept consiste en un projecteur compact à la surface d'un verre de lunette. Le projecteur en lui-même est un assemblage complexe de circuits optiques miniatures et de résine photosensible (hologramme). Cet assemblage est transparent, permettant à l'utilisateur de voir son environnement extérieur tout en percevant simultanément les images artificielles générées dans son champ de vision par le projecteur. Ce système de projection représente une lunette de réalité augmentée ayant divers domaines d'application : l'éducation, la santé, l'industrie, le divertissement etc.

Cette thèse se concentre sur la conception des composants optiques (blocs de base) servant à la création du circuit optique miniature du projecteur. La thèse a également permis la conception d'un outil permettant d'étudier le fonctionnement de ces composants optiques miniatures.

Public-readable English summary :

The CEA-LETI research institute recently developed a novel concept used to display images in the eye of an observer. The concept is represented by a compact projector at the surface of a glass. The projector itself is a complex assembly of miniaturized optical circuits and photosensitive resin (hologram). This assembly is transparent, allowing the user of the glasses to observe his external environment while seeing artificial images generated in his field-of-view by the projector. This system represents augmented reality glasses which have several application fields: education, healthcare, manufacturing industry, entertainment and more. This thesis focuses on the design of the optical components (basic building blocks) to create the miniaturized optical circuit of the projector. This thesis also allowed to design a machine used to study the proper functioning of the miniaturized optical components.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Christophe Martinez qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ma thèse au CEA-LETI. Il a fourni un encadrement rigoureux et effectué un grand nombre de propositions intéressantes durant l'exercice de mes travaux de recherche.

Je tiens aussi à souligner le support de Daivid Fowler qui m'a co-encadré pendant la thèse et qui a contribué à me faire découvrir le domaine de la photonique intégrée.

Pendant ma thèse, j'ai également eu l'occasion d'encadrer Kyllian Millard en stage de fin d'études à l'INSA de Toulouse. Il a fourni un support important aux caractérisations, notamment à l'aide du système d'imagerie du goniomètre. Cela a permis de respecter le calendrier chargé durant ma fin de thèse. Je suis fier qu'il ait ensuite entamé sa thèse dans notre équipe pour prendre la suite de mes travaux.

Également, j'ai apprécié le regard extérieur apporté par mon directeur de thèse, Engin Molva, ce qui a assurément permis d'ajuster certaines orientations de mes travaux.

Le travail de thèse s'est également effectué avec un grand nombre de collaborateurs qui, par leur support, ont permis à la thèse d'avoir un impact encore beaucoup plus important.

À ce titre, j'aimerais remercier Yann Lee pour les conseils et le suivi sur la fabrication en salle blanche. Merci aussi à Frédéric Sermet et à Anis Daami pour les conseils et le support sur les aspects mécaniques du banc de caractérisation que j'ai conçu.

Également, la fabrication des lots aurait été autrement plus ardue sans le soutien de Stéphanie Garcia, de Jonathan Faugier-Tovar et de Bertrand Szelag que je tiens à remercier.

Je tiens aussi à remercier Karen Ribaud, Philippe Grosse et André Myko pour le support durant les caractérisations au *prober*.

Merci également à Mathieu Dupoy et Quentin Wilmart pour leur support et leurs conseils sur la caractérisation et la fabrication des circuits photoniques intégrés.

De plus, ce travail n'aurait pas été possible sans l'aval financier de ma cheffe de laboratoire, Stéphanie Le Calvez, et de mon chef de service, Stéphane Fanget. Je les remercie d'avoir eu confiance dans mes travaux tout le long de la thèse.

Merci également à toutes les personnes impliquées dans mon travail de thèse mais que je n'ai pas rencontrées, tels que les personnels spécialisés en salle blanche et en charge de la fabrication des échantillons.

Enfin, merci pour le support à mes amis du laboratoire, ainsi qu'à ma famille et à ma femme qui m'ont supporté de maintes façons durant cette période.



Table des matières

Introduction	2
Lexique	3
Chapitre 1 Contexte et objectifs	4
1.1 Contexte	5
1.1.1 Introduction à la Réalité Augmentée	5
1.1.2 Systèmes de Réalité Augmentée	10
1.1.3 Projection rétinienne au CEA-LETI	17
1.1.4 Photonique intégrée visible	24
1.2 Objectifs de thèse	33
1.2.1 Objectifs généraux	33
1.2.2 Objectifs des masques de photolithographie	35
Chapitre 2 Moyens	45
2.1 Outils numériques	46
2.1.1 Méthodes de simulation	46
2.1.2 Evaluation de RSoft	47
2.1.3 Outils de dessin des masques de photolithographie	49
2.2 Instruments de caractérisation	49
2.2.1 Goniomètre	50
2.2.2 Prober	58
2.2.3 Autres outils de caractérisation	60
2.3 Conception des circuits	61
2.3.1 Fabrication du lot 1	61
2.3.2 Fabrication du lot 2	77
2.3.3 Autres moyens de conception	84
2.4 Fonctionnement de l'hologramme	84
Chapitre 3 Résultats	90
3.3 Etude des briques de base (lot 1*)	91
3.3.1 Guide d'onde monomode	93
3.3.2 Guide courbe	102
3.3.3 Couplage entre guides	107
3.3.4 Coupleur MMI	113
3.3.5 Coupleur directionnel 3dB	119
3.3.6 Réseaux de diffraction	121
3.3.7 Interféromètre de Mach-Zehnder	128
3.3.8 Réseaux de guides d'onde	134
3.3.9 Croisements	141
3.3.10 Edge-coupler (coupleur par la tranche)	144
3.4 Etude de l'interaction « guide d'onde – hologramme » (lot 2)	148
Chapitre 4 Conclusion et perspectives	156
4.1 Bilan	157
4.1.1 Réalisation des objectifs initiaux	157
4.1.2 Conclusion	160
4.2 Perspectives	160
4.2.1 Points d'amélioration des travaux effectués	160
4.2.2 Interaction « guide d'onde – hologramme »	161
4.2.3 Proposition d'architecture pour le circuit d'adressage	162
Annexe	165

Introduction

Le CEA-LETI a récemment développé un nouveau concept de projection rétinienne pour la réalité augmentée. Ce système de projection est embarqué sur un verre de lunette transparent et doit permettre de projeter des images sur la rétine de son utilisateur. Il est composé de deux parties principales : un circuit photonique intégré et des hologrammes analogiques. Cette thèse se concentre sur le développement du circuit photonique. Ce dernier doit permettre de distribuer des signaux de lumière à la surface du verre de lunette. Le circuit extrait ensuite ces signaux en vue de leur projection sur la rétine de l'observateur. D'autres membres de l'équipe se sont consacrés à la seconde partie du concept – l'hologramme – en parallèle des travaux de thèse. L'hologramme se superpose au circuit photonique et doit contrôler les propriétés d'émission des faisceaux extraits par celui-ci (angle, phase). Le fonctionnement du projecteur permet de focaliser des images directement sur la rétine de l'observateur sans avoir recours à des éléments d'optique qui peuvent s'avérer complexes et volumineux (ex : combineurs optiques, lentilles etc.).

Cette thèse a notamment permis de concevoir, de fabriquer et de caractériser expérimentalement un grand nombre de blocs photoniques de base (ex : guides d'onde monomodes, coupleurs, commutateurs actifs etc.). L'ensemble des blocs de base forment une bibliothèque de composants qui pourront être assemblés et utilisés pour former le circuit photonique applicatif final du projet à court terme. Les composants sont formés de Si_3N_4 et ont été optimisés pour fonctionner à $\lambda = 532 \text{ nm}$ (vert). La conception des composants s'est effectuée analytiquement et à l'aide de simulations numériques. La fabrication s'est déroulée en salle blanche sur des plaques 200 mm à l'aide des plateformes du CEA-LETI et de STMicroélectronique. La caractérisation a été effectuée à l'aide d'un *prober* optique automatisé et d'un goniomètre. Ce dernier est un outil de caractérisation conçu entièrement pendant la thèse et qui répond aux besoins spécifiques en caractérisation du projet. Enfin, un circuit applicatif simple a été conçu pour étudier l'interaction entre les circuits photoniques et les hologrammes analogiques.

La thèse se divise en 4 chapitres.

Dans le premier chapitre, le contexte du projet est détaillé ainsi que les objectifs de thèse. On y introduit notamment les concepts de réalité augmentée et de photonique intégrée dans le spectre visible. Le concept de projecteur rétinien du CEA-LETI est décrit en détail. Enfin, les objectifs de thèse sont séparés entre les objectifs principaux et les objectifs spécifiques à chaque lot de fabrication en salle blanche. Le lot 1 est dédié à l'élaboration de la bibliothèque de composants photoniques. Le lot 2 vise à étudier l'interaction entre le circuit photonique et les hologrammes analogiques. Un troisième lot visait à concevoir un premier prototype applicatif mais n'a finalement pas vu le jour. Des orientations pour ce troisième lot sont données dans les perspectives du chapitre de conclusion.

Au chapitre 2, les moyens utilisés dans la thèse sont décrits. D'abord, on y introduit les outils de simulation numérique utilisés et les outils de dessin pour concevoir les circuits photoniques. Les instruments de caractérisation sont ensuite décrits : le *prober* optique et le goniomètre. Le goniomètre fait l'objet d'une description détaillée car c'est un outil que j'ai conçu en très grande partie durant la thèse. Les procédés de fabrication de chacun des lots sont ensuite détaillés, suivi de la méthode d'enregistrement et de lecture des hologrammes analogiques du projet.

Au chapitre 3, les résultats de thèse sont détaillés. Dans une première partie, les résultats des simulations et des caractérisations expérimentales sont donnés pour chaque composant formant notre bibliothèque de briques photoniques (lot 1). L'efficacité des composants est comparée à la littérature. Dans une seconde partie, la conception finale du deuxième lot est détaillée. La fabrication du lot 2 n'aura pas été complétée avant la fin de la thèse, notamment à cause de contraintes de temps (délais de fabrication en salle blanche, Covid-19).

Au chapitre 4, un bilan des résultats est présenté comme conclusion et des perspectives sont données afin de proposer une orientation pour la suite des travaux de cette thèse.

Lexique

BARC : *Bottom Anti-Reflective Coating*
BOX : *Buried Oxide*
BPM : *Beam Propagation Method*
CCP : *Capacitively Coupled Plasma*
CD : Coupleur Directionnel
CDmin : minimum Critical Dimension
CDSEM : *Critical-Dimension Scanning Electron Microscope*
CGH : *Computer-Generated Hologram*, hologrammes synthétiques
CIF : *Caltech Intermediate Form*
CIT : Coupleurs Inversés par la Tranche
CMOS : *Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor*
CMP : Planarisation Mécano-Chimique
CPI : Composant de Photonique Intégrée
DPE : Distribution de Points d'Emission
DRC : *Design Rule Checking*
EBL : *Electron Beam Lithography*, *ebeam*
FDTD : *Finite-Difference Time-Domain*
FEM : *Finite-Element Method*
FIB : *Focused Ion Beam*, sonde ionique focalisée
FOV : *Field-Of-View*
FWHM : *Full Width at Half Maximum*
HDP : Plasma Haute-Densité
HMD : *Head-Mounted Display*
HOE : *Holographic Optical Element*, hologrammes optiques / analogiques
HPDLC : *Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal*
ICP : *Inductively Coupled Plasma*
IR : InfraRouge
LCOS : *Liquid Crystal On Silicon*
LIDAR : *Light Detection And Ranging*
LMDK : Laboratoire Masques et Design Kits
LPCVD : *Low-Pressure Chemical Vapor Deposition*
MEB : Microscope Electronique à Balayage
MEMS : Micro-Systèmes ElectroMécaniques
MMI : *MultiMode Interference*
MZI : Interféromètre de Mach-Zehnder
NIR : *Near-InfraRed*, proche infrarouge
OBFM : *Optical Beam-Forming Networks*, réseaux optiques à filtrage spatial
OCT : *Optical Coherence Tomography*
OPA : *Optical Phased Array*, antenne à réseau de phase optique
OWGH : *Outcoupling WaveGuide Hologram*
PE : Point d'Emission
PECVD : *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*
PIC : *Photonic Integrated Circuit*, circuits photoniques intégrés
RA : Réalité Augmentée
RIE : *Reactive-Ion Etching*
RM : Réalité Mixte
RTI : Réflexion Totale Interne
RV : Réalité Virtuelle
SLM : *Spatial Light Modulator*, modulateur de lumière spatial
SOI : *Silicon On Insulator*
TE : *Transverse Electric*
TEOS : *TetraEthylOrthoSilicate*
TM : *Transverse Magnetic*
VLC : *Visible Light Communication*

Chapitre 1

Contexte et objectifs

Introduction du chapitre 1	5
1.1 Contexte	5
1.1.1 Introduction à la Réalité Augmentée	5
1.1.2 Systèmes de Réalité Augmentée	10
1.1.2.1 Systèmes de projection classiques	10
1.1.2.2 Système de projecteur rétinien par balayage de faisceau laser	12
1.1.2.3 Projecteurs pinhole	13
1.1.2.4 Hologrammes synthétiques	14
1.1.3 Projection rétinienne au CEA-LETI	17
1.1.3.1 Principes de base du concept de projection rétinienne du CEA-LETI	18
1.1.3.2 Effet d'auto-focalisation	19
1.1.3.3 Hologramme	22
1.1.3.4 Circuit photonique intégré	23
1.1.4 Photonique intégrée visible	24
1.1.4.1 Photonique intégrée	24
1.1.4.2 Propriétés du Si ₃ N ₄	25
1.1.4.3 Géométrie transversale des guides d'onde	29
1.1.4.4 Applications de la photonique intégrée visible	31
1.2 Objectifs de thèse	33
1.2.1 Objectifs généraux	33
1.2.2 Objectifs des masques de photolithographie	35
1.2.2.1 Étude des briques de base (lot 1)	35
1.2.2.2 Étude de l'interaction « guide d'onde – hologramme » (lot 2)	38
1.2.2.3 Architecture d'adressage de DPEs aléatoires	39
Conclusion du chapitre 1	40
Références	41

Introduction du chapitre 1

Ce premier chapitre présente le contexte et les objectifs de la thèse. Celle-ci est rattachée à un projet au CEA-LETI pour le développement d'un système de projection rétinienne embarqué sur un verre de lunette. Ce projecteur a pour but de générer des images dans l'œil d'un observateur pour des applications de réalité augmentée (RA). Le concept de cette « lunette RA » nécessite la combinaison de deux blocs technologiques majeurs : l'holographie analogique et la photonique intégrée. La thèse se concentre sur le bloc de photonique intégrée.

Ce chapitre introduit d'abord les notions générales autour de la réalité augmentée et des concepts associés tels que la réalité mixte et virtuelle. Les concepts de fonctionnement de plusieurs prototypes concurrents de lunettes RA sont détaillés. Le concept et le fonctionnement de base des lunettes RA au CEA-LETI sont ensuite décrits.

Ce chapitre introduit également des notions en photonique intégrée spécifiques au contexte du projet. Dans notre cas, ce bloc technologique nécessite le développement de guides d'onde monomodes pouvant guider la lumière visible. Pour ce faire, le matériau de guidage formant le circuit photonique est du nitrure de silicium (Si_3N_4), dont les propriétés sont décrites dans ce chapitre. Ensuite, une description comparative de la géométrie des guides d'onde est effectuée. Nous verrons que la géométrie sélectionnée est conditionnée par une forte compacité du circuit. Plus le circuit de guides d'onde est compact et plus il devrait être en mesure de projeter des images de grande qualité sur la rétine de l'observateur. Enfin, les circuits photoniques détaillés dans cette thèse peuvent avoir des applications autres que celles du projet de lunettes RA. Ces applications sont succinctement décrites. Les solutions ou les architectures photoniques décrites par des équipes travaillant sur ces autres applications peuvent parfois être réutilisées pour ce projet. Des exemples sont donnés notamment pour le développement de circuits compacts.

Enfin, les objectifs et les contraintes de cette thèse sont détaillés. La réalisation de ces objectifs passe notamment par la fabrication de circuits photoniques à l'aide de deux masques de photolithographie principaux (lots 1 et 2). Les objectifs spécifiques de ces masques sont décrits à la fin du chapitre.

1.1 Contexte

1.1.1 Introduction à la Réalité Augmentée

Les appareils de télécommunication ont traditionnellement effectué une transition à partir d'appareils fixes et à faible débit vers des appareils mobiles et à grande capacité de transfert de données. Avec l'avènement d'internet et des appareils portatifs intelligents (ex : téléphones et montres intelligents), nous pouvons désormais conserver notre outil de communication sur nous tout en ayant une grande mobilité physique. Ces appareils nous permettent d'avoir accès rapidement à l'information en tout temps. La mobilité de ces appareils et leurs nombreux capteurs (GPS, accéléromètre, caméra, capteur de fréquence cardiaque...) permettent également de nous livrer des informations contextuelles. Toutefois, l'information délivrée est déportée : il faut tourner le regard ou sortir l'appareil de sa poche pour observer l'écran nous fournissant la majorité de l'information. Au-delà de la mobilité et de la capacité de transfert de données, une nouvelle transition s'est entamée dans les appareils de télécommunications : leur intégration avec l'individu. Ainsi, afin que l'information soit délivrée plus directement et avec une meilleure contextualisation, des solutions ont été développées pour l'incorporer naturellement dans notre champ de vision : les lunettes de réalité augmentée (RA) et les lunettes de réalité mixte (RM) ^{[1][2]}. Ces lunettes peuvent contextualiser l'information qu'elles nous fournissent en « voyant ce que l'on voit » grâce à des capteurs appropriés. Le principe de ces lunettes est d'afficher une information virtuelle dans notre champ de vision tout en nous

permettant de continuer à observer notre environnement extérieur. L'ajout d'un affichage virtuel superposé à la vue du monde réel permet d'expliquer le terme « réalité augmentée ». Les premiers exemples connus de systèmes de réalité augmentée sont apparus sur des supports fixes, dont les affichages tête haute des cockpits d'avions ^[3] (*Head-Up Display*, HUD, en anglais). Les concepts de RA et RM portatifs se sont récemment popularisés notamment avec les lunettes Google Glass ^[4] et le jeu mobile Pokémon Go¹.

Dans le cas des lunettes de réalité augmentée, l'information est affichée indistinctement de la spatialité de l'environnement, i.e. sans tenir compte du positionnement et de la forme des objets environnants. Par exemple, une bulle textuelle pourrait apparaître dans les lunettes RA pour nous indiquer que l'on doit tourner à droite à la prochaine intersection lorsqu'on est au volant d'un véhicule. Les lunettes RA visent une longue durée d'utilisation quotidienne. Elles ont un rôle davantage informatif. Leur rôle requiert une conception compacte avec une forte luminosité ^[5]. Elles doivent également être compatibles avec des lunettes de vue.

La réalité mixte, au contraire, modélise en 3D l'environnement que l'on observe afin que les informations virtuelles affichées s'adaptent à sa spatialité. Par exemple, la flèche virtuelle nous indiquant que l'on doit tourner à droite en conduisant pourrait suivre la route, donnant l'impression qu'il s'agit d'une réelle peinture au sol qui nous guide. Ce mélange de la réalité et de l'information virtuelle permet d'expliquer le terme « réalité mixte », où les deux deviennent indistinguables. Les lunettes RM visent une expérience plutôt interactive, à l'opposé des lunettes RA. La complexité de la génération d'images 3D exerce une forte pression sur la capacité de calcul du dispositif, et donc sur la latence d'affichage. Cette complexité se retrouve aussi dans les grandes dimensions et le poids élevé des dispositifs MR actuels. Cela limite leur utilisation pour une durée moyenne (quelques heures) de façon périodique. Les lunettes RM doivent aussi généralement obscurcir la scène réelle observée afin d'afficher clairement des éléments virtuels sombres.

Ces deux types de lunettes font partie de la catégorie des visiocasques (*Head-Mounted Display*, HMD en anglais). Un autre type de visiocasque existe : le casque de réalité virtuelle (RV). Contrairement aux 2 premiers, le casque RV affiche uniquement une information virtuelle, généralement décorrélée du monde réel (donc non-contextuelle). Plutôt que d'être une évolution des appareils mobiles intelligents (téléphones et montres), il vise plutôt à augmenter l'immersion visuelle par rapport aux appareils d'affichage électronique fixes (écrans larges de télévision ou d'ordinateurs) et ne vise donc pas les mêmes applications que les lunettes RA et RM. L'immersion visuelle est notamment obtenue par un large champ de vision (*Field-of-View*, FOV, en anglais), une gestion du conflit entre vergence et accommodation de l'œil ^[6] et par une haute résolution de l'image projetée.

La **Figure 1-1** compare les rendus visuels et les rôles des 3 types de visiocasques.

À gauche de la **Figure 1-1**, le casque RV permet une immersion totale dans le monde virtuel et cache le monde réel (visiocasque opaque). On peut par exemple observer une modélisation artificielle 3D du sphinx égyptien. Un exemple de casque RV commercialisé est l'Oculus Quest². Au centre de la **Figure 1-1**, les casque RM sont représentés. Ils sont sous-divisés entre la « vision numérique » (*video see-through*) et la « vision optique » (*optical see-through*). Le casque Lynx³ de vision numérique permet de projeter l'image de la scène réelle filmée à l'aide de caméras. Des éléments virtuels sont ajoutés à la scène sans occlusion. Les noirs (ex : les cheveux du scribe égyptien) sont donc bien visibles. Dans la vision optique, les vrais faisceaux de lumière éclairant la scène sont observés par l'œil. Une occlusion est nécessaire pour afficher les couleurs sombres. Par exemple, ici les cheveux noirs du scribe sont peu

¹ Référence : <https://www.pokemongo.com/fr-fr/>

² Référence : <https://www.oculus.com/quest/>

³ Référence : <https://lynx-r.com/>

visibles. Le noir correspond à une absence de lumière et ne peut donc pas être projeté. Un exemple de ce type de dispositif est le Hololens 2⁴. À droite de la **Figure 1-1**, un système d'affichage RA est présenté. Les lunettes RA de North⁵ sont montrées comme exemple.

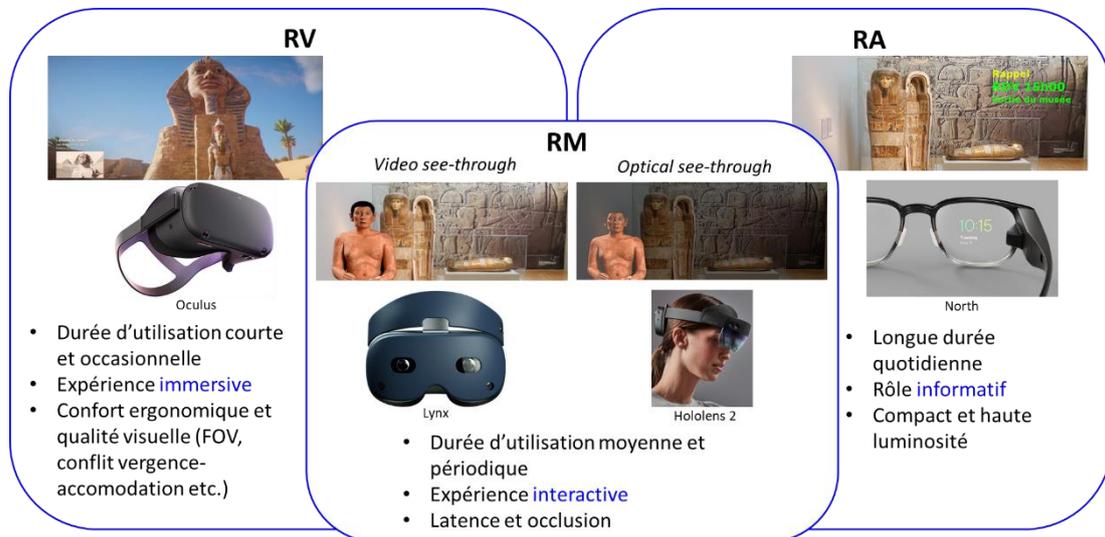


Figure 1-1 Rendus visuels et description des trois types de visiocasques. À gauche, le casque RV, au centre les casques MR et à droite les lunettes RA. La MR est sous-divisée entre les systèmes de vision numérique ou optique.

Les applications des lunettes RA et MR sont vastes dans divers domaines : l'éducation ^[7], la santé ^{[8][9]}, l'industrie manufacturière et l'ingénierie ^{[10][11]}, les applications militaires et beaucoup d'autres ^[12]. Par exemple, à l'aide de lunettes RA ou MR, un chirurgien pourrait obtenir des informations vitales sur le patient qu'il opère sans avoir à détourner les yeux vers un écran extérieur (rythme cardiaque etc.). Il pourrait aussi avoir des informations en temps réel pour l'aider à savoir où opérer (ex : marquage des zones cancéreuses ou des zones saines). Cela pourrait réduire le risque d'erreur lors d'actes chirurgicaux et à terme améliorer l'efficacité des soins de santé. La **Figure 1-2** montre en vue d'artiste des applications à ce type de lunettes.

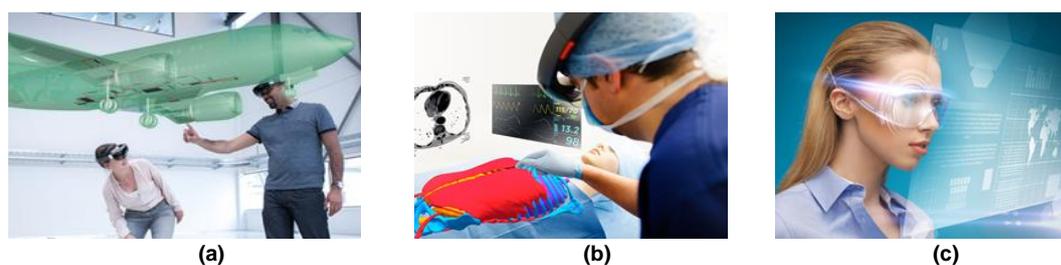


Figure 1-2 Vue d'artiste de lunettes RA et MR, a) application à la conception en ingénierie⁶, b) application en médecine⁷, c) application générale de lunettes RA⁸.

Plusieurs visiocasques ont déjà été développés en RV, MR et RA. Les casques de RV sont généralement les plus connus du public car plusieurs produits commerciaux aboutis sont déjà disponibles aux consommateurs. Les masques RV les plus connus sont actuellement l'Oculus de Facebook, le HTC Vive et le casque de Sony PlayStation VR montrés à la **Figure 1-3**.

⁴ Référence : <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/hardware>

⁵ Référence : <https://www.bynorth.com/>

⁶ Référence : <http://www.nlr.org/wp-content/uploads/2017/05/augmented-reality-mro.jpg>

⁷ Référence : https://img.elcomercio.pe/files/article_content_ec_fotos/uploads/2017/05/15/591a778e52997.jpeg

⁸ Référence : <https://i.pinimg.com/originals/82/29/da/8229daba0a6f97a3c4b560bfbfbc4536.jpg>

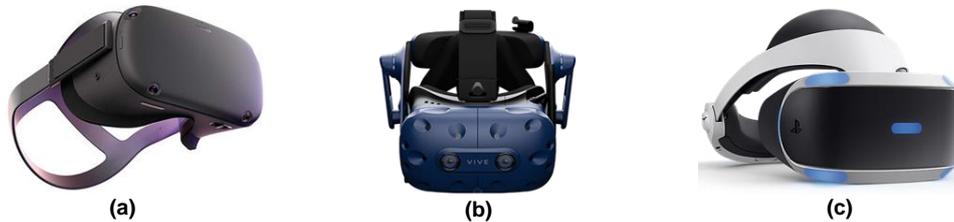


Figure 1-3 Principaux visiocasques RV actuellement commercialisés, a) Oculus Quest, b) HTC Vive Pro⁹, c) PlayStation VR¹⁰.

La qualité visuelle des images projetées par ces casques est pour le moment l'une des contraintes à leur adoption rapide par le public (notamment leur faible résolution). Cette limite pourrait être dépassée à l'aide de nouvelles approches de projection d'image. Par exemple l'entreprise Varjo¹¹ propose une solution de « rendu fovéal » tel que présenté à la **Figure 1-4**. Cette société utilise deux écrans : un de haute résolution et un de résolution standard. L'écran de haute résolution projette la partie de l'image où l'œil concentre son attention. L'écran de résolution standard projette le reste de l'image qui correspond au champ périphérique de la zone fovéale. L'optimisation des deux écrans minimise la charge de calcul du dispositif.



Figure 1-4 Rendu fovéal du visiocasque RV de l'entreprise Varjo (droite) en comparaison du HTC Vive Pro (gauche). Les écrans ne sont pas affichés en totalité afin de se concentrer sur la zone fovéale d'un œil dans l'exemple de Varjo.

Un autre problème majeur des visiocasques est la gestion du conflit entre vergence et accommodation des yeux. La vergence est liée à l'orientation des yeux afin qu'ils soient tous les deux dirigés vers le même point d'observation. Lorsque le point observé se rapproche, les yeux convergent l'un vers l'autre et inversement pour la divergence. L'accommodation des yeux est liée à leur distance de mise au point. La lentille d'un œil se déforme pour focaliser selon sa distance d'observation. Généralement, dans le monde réel, les distances de vergence et d'accommodation sont les mêmes. Toutefois, dans un affichage 3D virtuel, ces deux distances peuvent différer comme illustré à la **Figure 1-5** tirée de Hoffman *et al.* [6]. Cette différence n'empêche pas l'œil d'observer l'image. Toutefois, elle cause un inconfort visuel à l'utilisateur du visiocasque. C'est cet inconfort (conflit vergence-accommodation) que les visiocasques tentent de gérer au mieux afin de l'éviter.

⁹ Référence : <https://www.vive.com/fr/product/vive-pro/>

¹⁰ Référence : <https://www.playstation.com/fr-ca/explore/playstation-vr/>

¹¹ Référence : <https://varjo.com/>

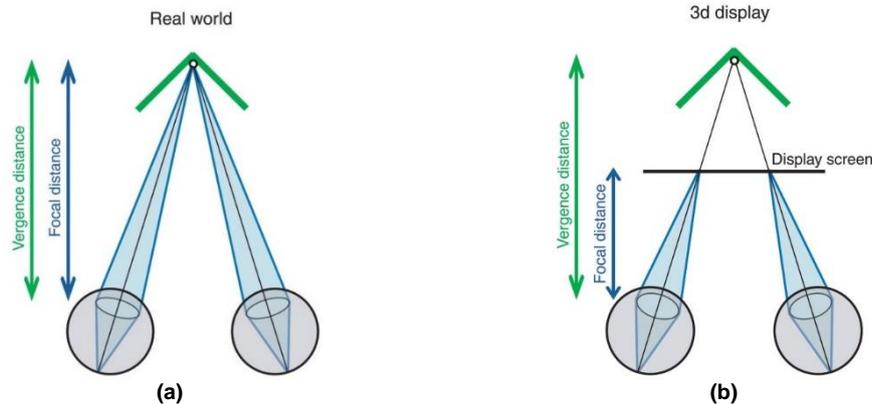


Figure 1-5 Description schématique des distances de vergence et d'accommodation de l'œil tirée de Hoffman *et al.*, a) dans le monde réel, les deux distances sont généralement identiques, b) lors de l'utilisation de visiocasques, ces distances peuvent différer en visionnant des images virtuelles, ce qui cause un inconfort oculaire à l'utilisateur.

Des dispositifs commercialisés ou en voie de l'être existent aussi pour la RA et la RM, dont : l'Hololens 2 de Microsoft, le MagicLeap, North, WaveOptics¹² ou le casque français Lynx.

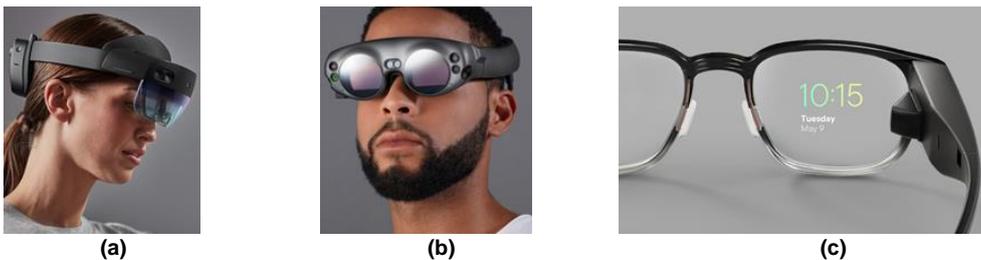


Figure 1-6 Visiocasques commercialisés de MR, a) Microsoft Hololens 2, b) MagicLeap¹³ et c) concept artistique des lunettes de RA de l'entreprise North.

Toutefois, les solutions actuellement commercialisées en RA et RM ont de nombreux inconvénients afin de pouvoir s'intégrer naturellement avec notre vue (qualité visuelle) tout en restant mobile (portabilité). En effet, la **Figure 1-6 (a) et (b)** démontre bien le volume et le poids conséquent que peut nécessiter un casque RM sur notre tête. Ces casques sont également peu transparents, altérant la clarté avec laquelle nous pouvons observer le monde réel. Les lunettes de North présentent en apparence une compacité et une intégration plus poussée par rapport aux casques RM de l'Hololens 2 et MagicLeap mais au détriment de la qualité de l'image et des capteurs embarqués.

Dans le cas de casques à vision numérique, l'image est généralement plus simple à projeter que dans les visiocasques à vision optique car elle est en environnement contrôlé. En effet, le fait que le casque soit opaque permet d'ignorer les variables de l'environnement extérieur (luminosité de jour ou de nuit, transparence du dispositif...). De plus, étant destiné à des applications requérant une moins grande mobilité que les visiocasques à vision optique, sa compacité semble moins critique que ces derniers. En se basant sur ces éléments, il semble a priori plus complexe de concevoir le système optique des visiocasques RA et RM. À ce jour, la qualité du rendu visuel des visiocasques à vision optique reste un élément clé de la recherche sur ces dispositifs ^[13].

¹² Référence : <https://enhancedworld.com/>

¹³ Référence : <https://www.magicleap.com/en-us/magic-leap-1>

Plusieurs solutions existent ou sont en cours de développement afin de concevoir les systèmes de projection d'image des futurs visiocasques RA et RM à vision optique. Dans notre cas, nous nous intéressons principalement aux systèmes RA :

- 1) Les systèmes « classiques » (combinaison d'un micro-écran, d'un ou plusieurs guides d'onde plans et d'un combineur optique).
- 2) Système de projecteur rétinien par balayage de faisceau laser.
- 3) Les solutions *pinhole* (points d'émission diffusants liés à un modulateur de lumière spatial ou *Spatial Light Modulator*, SLM en anglais).
- 4) La projection par des hologrammes synthétiques (*Computer-Generated Hologram*, CGH en anglais).
- 5) D'autres solutions originales ^[14], dont celle liée à ce projet de thèse du CEA-LETI ^[15] : la projection rétinienne par combinaison de guides d'onde monomodes (i.e. photonique intégrée) avec des hologrammes pixélisés « analogiques ».

Les 4 premières solutions et les technologies associées sont détaillées succinctement dans la sous-section suivante. Le concept de projection rétinienne du CEA-LETI est ensuite présenté.

1.1.2 Systèmes de Réalité Augmentée

1.1.2.1 Systèmes de projection classiques

Les systèmes de projection d'image « classiques » en réalité augmentée ont généralement recours à une combinaison d'un micro-écran ^[16], d'une optique de mise en forme, d'un ou plusieurs guides d'onde plans et d'un combineur optique souvent fait à partir d'un réseau de diffraction.

Dans un premier temps, le micro-écran émet l'image à projeter en bordure du dispositif (i.e. souvent sur les bords de la monture des lunettes RA). L'image est collimatée par un système optique généralement composé de lentilles macroscopiques. L'image collimatée est couplée à un guide d'onde plan à l'aide d'un composant d'insertion. Ce composant peut être conçu de plusieurs façons, dont à l'aide d'un ou plusieurs hologrammes. Le guide d'onde plan guide l'image à la surface du verre de lunette par réflexion totale interne (RTI) jusqu'à ce qu'elle arrive devant les yeux de l'observateur. L'image est alors extraite du guide par un combineur optique. Ce composant peut également être conçu à l'aide d'un hologramme. Un combineur holographique a l'avantage d'être compact (couche mince déposée sur le verre de lunette) et très sélectif en longueur d'onde. L'hologramme est donc transparent à la majorité du spectre visible, hormis à la longueur d'onde à laquelle il réagit. Ce principe est décrit en détail dans la littérature ^{[17][18][19]}. Plusieurs équipes proposent des systèmes en couleur ^{[20][21]}, dont Mukawa *et al.* ^[22], dont le schéma de principe est présenté à la **Figure 1-7**.

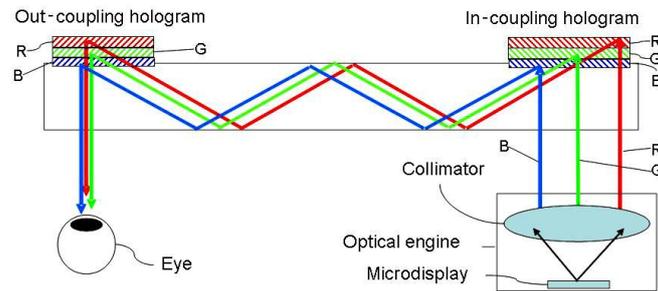


Figure 1-7 Principe de la lunette RA classique composée d'un micro-écran, de lentilles macroscopiques, d'un composant d'insertion (hologramme), d'un guide d'onde plan et d'un combineur optique (hologramme) tiré de Mukawa *et al.*

L'article de Mukawa *et al.* propose une solution combinant trois hologrammes afin d'afficher des images couleur (RGB). La sélectivité spectrale de leur hologramme est présentée à la **Figure 1-8** :

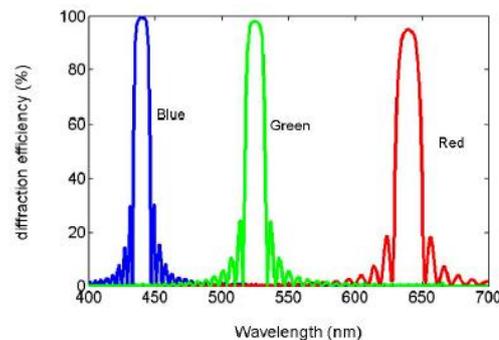


Figure 1-8 Sélectivité spectrale et efficacité de diffraction en réflexion des hologrammes de Mukawa *et al.*

Les propriétés et fonctions optiques pouvant être générées par des hologrammes sont variées [23] : réflexion, diffraction, focalisation et collimation, mise en phase de plusieurs faisceaux etc. Ils sont regroupés sous le terme « éléments optiques holographiques », ou *holographic optical element* (HOE) en anglais.

Ces propriétés doivent d'abord être enregistrées dans le volume de la couche holographique en faisant interférer 2 ondes électromagnétiques (une onde référence et une onde objet). L'interférence destructive ou constructive de ces 2 ondes mène à des pics ou des creux locaux d'intensité lumineuse dans le volume de la couche holographique. Les variations d'intensité sont enregistrées par une variation locale de l'indice de réfraction dans le matériau holographique. Cela permet à l'hologramme d'enregistrer de façon permanente le motif d'interférence entre les 2 ondes. Durant la lecture de l'hologramme, seule l'onde référence est envoyée dans la couche holographique. Cette couche modifie alors l'onde référence afin qu'elle réplique les propriétés optiques de l'onde objet initiale.

Bruder *et al.* [24] présentent des simulations d'un tel enregistrement sur une résine holographique Bayfol HX de l'entreprise Covestro. Cela permet de mieux percevoir le changement local d'indice du matériau selon son temps d'exposition à la lumière :

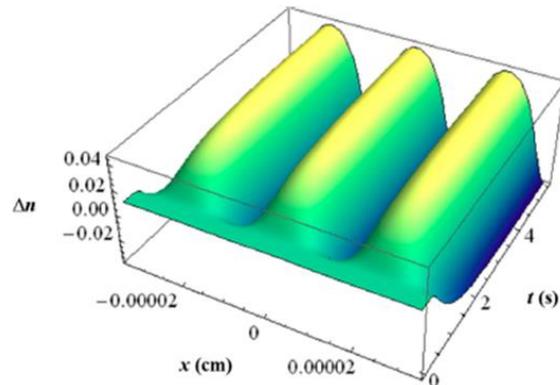


Figure 1-9 Profil de l'indice de réfraction simulé en fonction du temps d'exposition et de la position x dans une résine holographique Bayfol HX ($\lambda = 633 \text{ nm}$, $I = 9.12 \text{ mW/cm}^2$).

Un exemple de comportement optique des HOEs est décrit dans la **Figure 1-10** tirée de Jang. *et al.* [25]. La figure montre que les HOEs peuvent focaliser des faisceaux en répliquant le comportement de micro-lentilles.

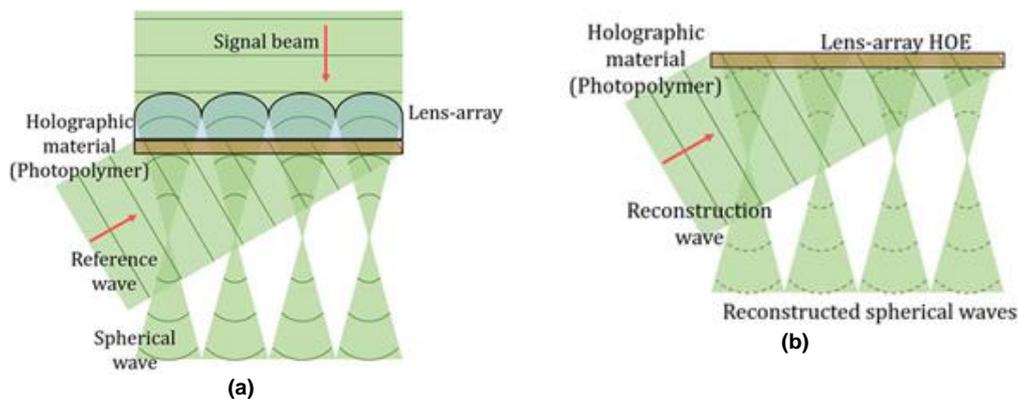


Figure 1-10 Enregistrement et lecture d'un HOE permettant de répliquer la fonction optique de focalisation de micro-lentilles, a) enregistrement, b) lecture de l'hologramme.

Il est également possible d'utiliser des hologrammes actifs à l'aide de cristaux liquides dispersés dans un polymère holographique (*Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal*, HPDLC, en anglais). Il a notamment été démontré que l'efficacité de diffraction d'un réseau d'extraction holographique peut être modulée en fonction du courant électrique dans ce type de mélange [26].

1.1.2.2 Système de projecteur rétinien par balayage de faisceau laser

Les dispositifs de scans rétiniens sont une variante au système de projection classique de la sous-section précédente. Précédemment, l'image est générée par un micro-écran puis transportée vers l'œil par un système optique composé d'un guide plan et de combineurs optiques (ex : HOE). Dans un scanner rétinien, l'image est formée ligne par ligne à l'aide d'une série de lasers [27]. Les faisceaux de ces lasers sont dirigés vers l'œil à l'aide d'une série de systèmes optiques. Ceux-ci comprennent généralement des micro-systèmes électromécaniques (MEMS) à base de miroirs orientables activement. Ils permettent d'orienter la réflexion des faisceaux laser pour scanner une surface 2D sur la rétine de l'œil. Ce scan permet de projeter une image sur la rétine à l'aide de la persistance rétinienne. La faible divergence du faisceau laser lui permet d'être directement focalisé dans l'œil.

Jang *et al.* [28] ont présenté un prototype fonctionnel de scanner rétinien, tel que présenté à la **Figure 1-11**.

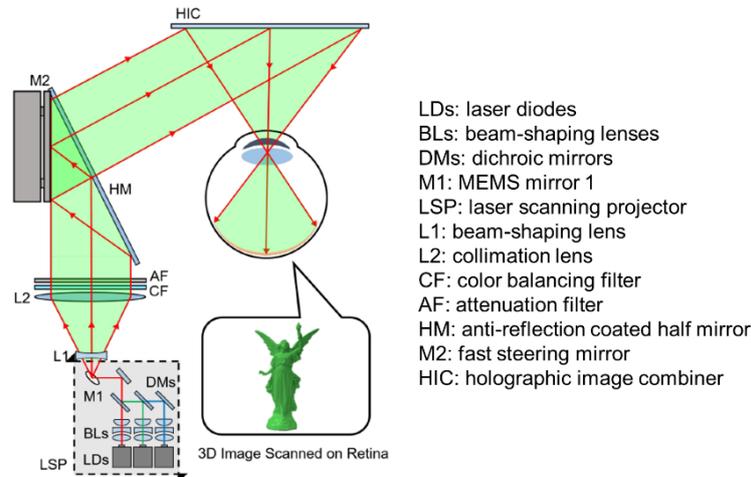


Figure 1-11 Système de projection rétinien par scan laser tel que proposé par Jang *et al.* Des diodes lasers sont orientées par une série de miroirs, dont des MEMS (M1, M2). Les faisceaux sont également collimatés et filtrés par des lentilles et filtres de couleur. Un hologramme est utilisé comme combineur optique.

Ce prototype a la particularité de suivre la position de l'œil en temps réel. Cela permet de corriger l'angle de réflexion des lasers afin que l'image continue d'être projetée dans l'œil lorsque ce dernier se déplace. Ce suivi en temps réel permet de gérer la région oculaire (*eye-box*) de façon dynamique, comme illustré à la **Figure 1-12**. La région oculaire est la zone où l'œil peut se déplacer tout en conservant la capacité à observer l'image projetée.

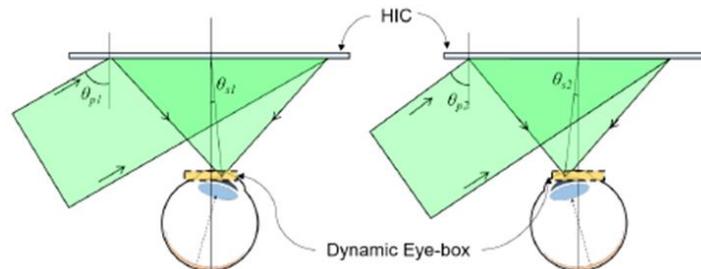


Figure 1-12 L'orientation des faisceaux laser du scanner laser suit la position de l'œil pour créer un *eye-box* dynamique.

1.1.2.3 Projecteurs *pinhole*

Les projecteurs de type *pinhole* permettent de projeter une image avec moins de composants optiques que dans les 2 architectures de lunettes RA précédentes. De plus, aucune lentille ou hologramme n'est nécessaire à la projection d'image. Un projecteur *pinhole* bientôt commercialisé par la firme sud-coréenne LetinAR¹⁴ permet d'afficher des images couleur.

Le principe général des projecteurs *pinhole* est schématisé à la **Figure 1-13** tirée de Maimone *et al.* [29]. Une image est générée par un micro-écran puis guidée dans un guide d'onde plan, comme dans le cas des systèmes de projection « classiques ». Toutefois, ici l'image est extraite du guide à l'aide de sources de points de lumière, ou *pinlight sources* en anglais. Chacun des points extrait une petite partie de la lumière constituant l'image guidée dans le verre. L'ensemble de ces points permet d'extraire l'entièreté de la lumière de l'image. Le faisceau émit de chaque point a une faible divergence. Cela leur permet d'être directement focalisés par l'œil, peu importe l'état de focalisation de ce dernier (i.e. observation d'une scène proche ou loin), à l'image d'un sténopé. La faible divergence des faisceaux les limite à un faible

¹⁴ Référence : <https://letin.com/>

diamètre lorsqu'ils atteignent l'œil. Le faible diamètre de chaque faisceau ne leur permet que de projeter une petite portion d'image individuellement (**Figure 1-13 (a)**). En combinant plusieurs sources, l'image totale initialement émise du micro-écran peut être projetée dans l'œil (**Figure 1-13 (b)**). Le champ de vision de l'observateur peut donc être couvert. Les faisceaux sont modulés par un *Spatial Light Modulator* (SLM). La faible taille des points de lumière sur le verre leur permet d'être imperceptibles lorsqu'ils sont défocalisés de l'œil (i.e. ils sont trop proches de l'œil pour être observés). Cette caractéristique permet d'obtenir un système de projection transparent pour la réalité augmentée.

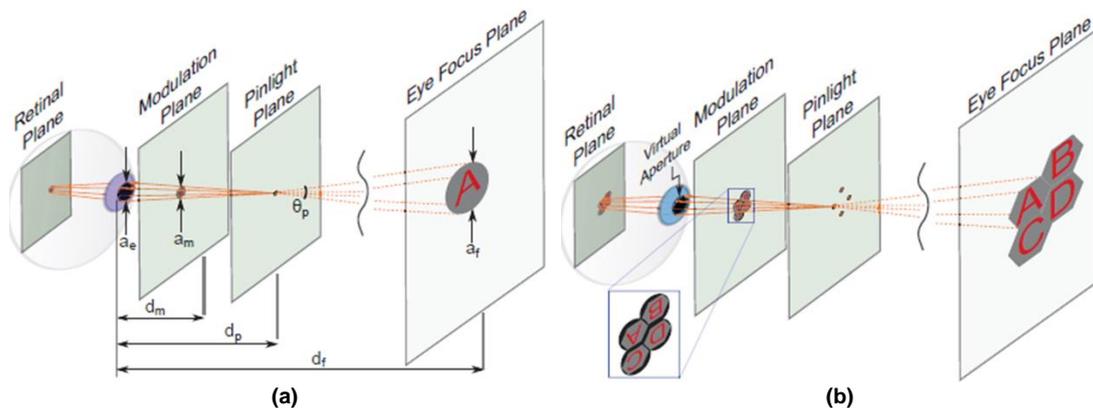


Figure 1-13 Fonctionnement du système de projection *pinhole* selon Maimone *et al.*, a) un seul point d'émission, b) une matrice de points d'émission sont utilisés pour augmenter le champ de vision (FOV). La taille des *pinholes* utilisés est $\leq 100 \mu\text{m}$.

Un exemple de résultat expérimental d'un prototype de Maimone *et al.* est présenté à la **Figure 1-14**.

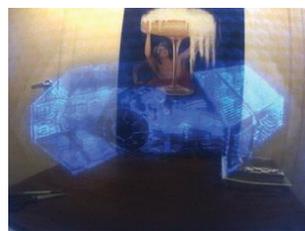


Figure 1-14 Exemple d'image projetée par le prototype de Maimone *et al.*

1.1.2.4 Hologrammes synthétiques

Une autre technique utilisée pour la réalité augmentée se base sur les hologrammes synthétiques, ou *computer-generated holograms* (CGH) en anglais. Comme décrit précédemment, les hologrammes HOE sont créés par l'enregistrement d'une figure d'interférence entre deux ondes. On qualifie ce type d'hologramme par le terme hologrammes « analogique ». Dans le cas de CGH, la figure d'interférence est synthétisée numériquement à l'aide d'algorithmes informatiques [30]. Ensuite, elle est fabriquée par nano-fabrication. Cela permet de la reproduire rapidement et avec une grande précision. Cela évite également d'avoir recours à des systèmes d'alignement optiques complexes pour créer l'hologramme, comme dans le cas des hologrammes analogiques.

Dans un système projetant un faisceau lumineux de manière contrôlée (ex : lunettes RA), on peut combiner un guide d'onde et un CGH. La lumière est guidée dans le guide d'onde puis extraite de celui-ci à l'aide du CGH. Le CGH permet de contrôler la position de focalisation de la lumière dans l'espace 3D. Elle peut être focalisée à différents endroits en même temps. Cela permet de générer artificiellement une image dans l'espace.

Selon Backlund *et al.* [31], le CGH permet de moduler spatialement la phase du faisceau qu'il extrait d'un guide d'onde. C'est ce qui permet de focaliser le faisceau à un endroit donné dans l'espace 3D. Pour ce faire, l'hologramme CGH est décomposé en une matrice de carrés. Chaque carré – qu'on appelle « cellule » – contient un réseau de diffraction de pas identique. La position du réseau dans chaque cellule est variée, de manière à créer un décalage du réseau d'une cellule à l'autre. Le décalage cause un délai du front d'onde émit entre les cellules. Ce délai génère une variation de phase entre les émissions de chaque carré (**Figure 1-15**).

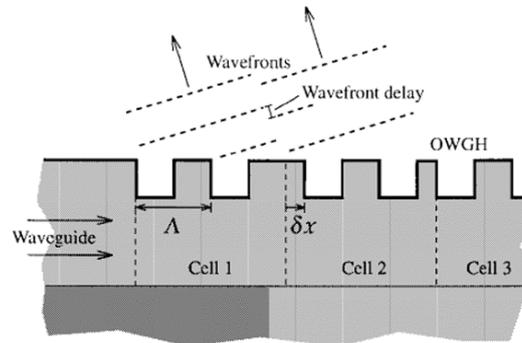


Figure 1-15 Structure des cellules de réseaux de diffraction déphasés afin de générer un hologramme d'extraction, ou Outcoupling Waveguide Hologram (OWGH) en anglais. Le même principe est utilisé pour les CGH.

La modulation de la phase de chaque cellule est calculée par un algorithme afin de pré-déterminer les positions de focalisation de la lumière. Aucune lentille n'est donc nécessaire pour focaliser l'équivalent d'une image. Backlund *et al.* réussissent ainsi à focaliser plusieurs points d'émission simultanément (**Figure 1-16**), sans avoir recours à des lentilles.

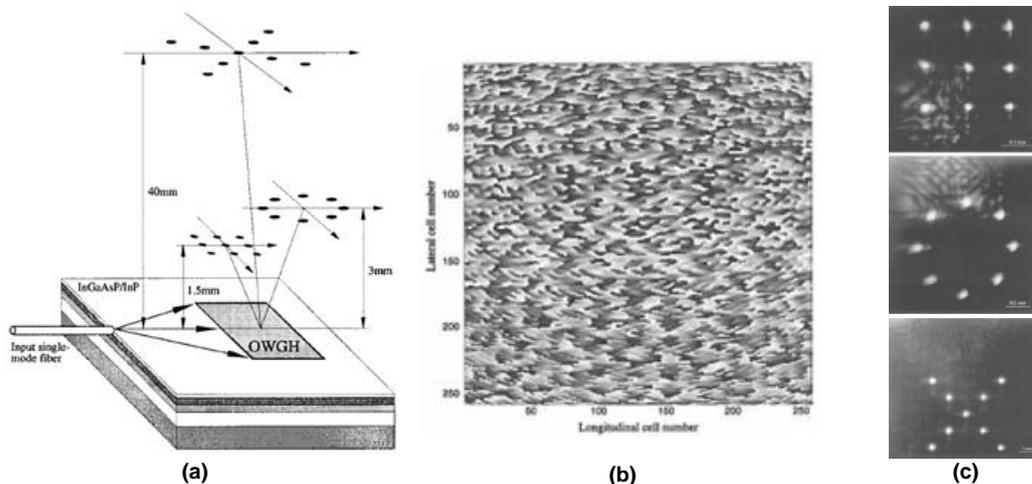


Figure 1-16 Principe du CGH à l'aide d'un OWGH de Backlund *et al.*, a) schéma de principe de l'extraction de signal par l'OWGH, b) matrice de déphasage ($0-2\pi$) de l'OWGH en tons de gris, c) résultat expérimental des points d'émission 3D à différents plans de focalisation.

Depuis les travaux de Backlund *et al.*, d'autres équipes ont travaillé sur le sujet, dont Huang *et al.* [30] qui ont réussi à afficher des images multicolores à l'aide de CGH. Leur résultat est présenté à la **Figure 1-17**.

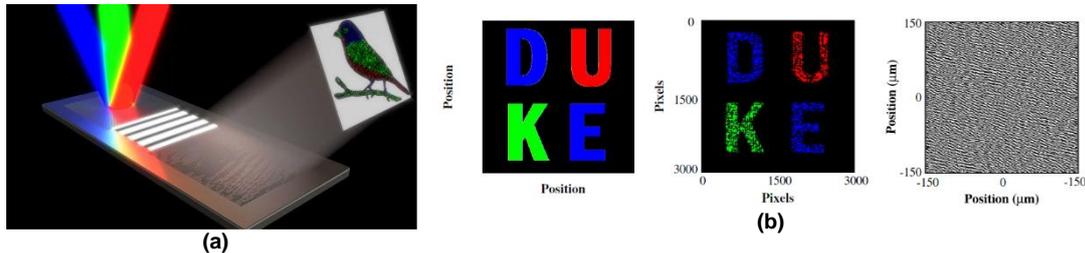


Figure 1-17 OWGH multicolores de Huang *et al.*, a) Principe de leur système de guide et CGH, b) de gauche à droite : rendu visé, rendu obtenu expérimentalement et matrice de déphasage de l'hologramme.

Une fois l'hologramme CGH fabriqué, il ne peut plus être changé. C'est donc un CGH passif. L'image projetée est fixe.

Des équipes ont développé des hologrammes CGH actifs [32][33][34]. La phase de chaque réseau de diffraction émissif de l'hologramme (i.e. les « cellules » de l'hologramme) peut être modifiée et contrôlée. Cela permet de modifier les conditions de focalisation du CGH, et donc l'image qu'il projette. Pour ce faire, au lieu d'amener la lumière vers le CGH par un guide d'onde plan, la lumière est plutôt transportée dans plusieurs guides d'onde monomodes. Le nombre de guides d'onde peut aller jusqu'à plusieurs milliers, voire dizaines de milliers. À chaque guide d'onde est associé un déphaseur et un émetteur. Le déphaseur fait varier la phase du faisceau guidé dans un guide d'onde. Ce changement peut se faire thermo-optiquement ou électro-optiquement. L'émetteur est constitué d'un réseau de diffraction. Dans ce type de circuit photonique intégré, le guide d'onde et le CGH sont donc davantage combinés que dans les OWGH passifs de Backlund *et al.* et de Huang *et al.* où les deux composants sont séparés. Sun *et al.* [35] proposent ainsi un circuit photonique intégré actif, tel que présenté à la **Figure 1-18**.

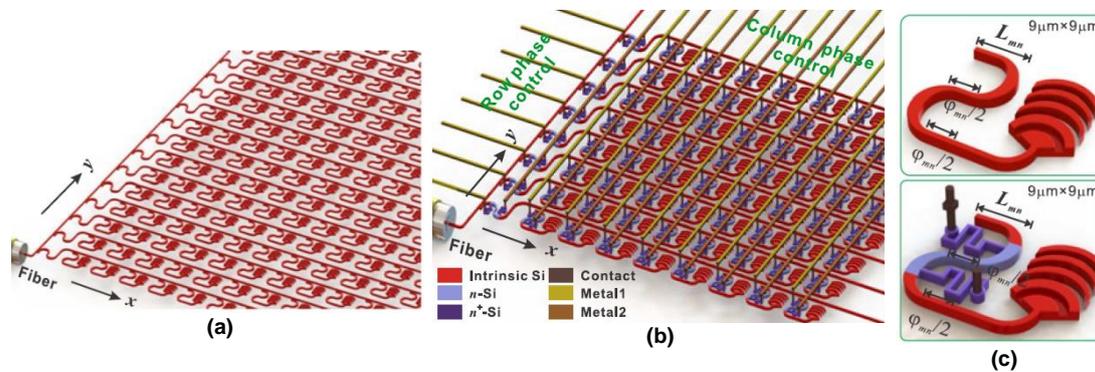


Figure 1-18 Circuit photonique intégré de Sun *et al.* recréant une matrice de réseaux de diffraction d'un CGH traditionnel avec 4096 émetteurs (64 x 64), a) circuit d'émetteur passif, b) circuit actif avec le contrôle de phase des émetteurs à l'aide d'électrodes, c) réseau de diffraction passif (haut) et réseau de diffraction actif dont la phase est modulée thermo-optiquement par des électrodes (bas).

Le circuit de Sun *et al.* est une antenne à réseau de phase optique, ou *Optical Phased Array* (OPA) en anglais. Leur équipe l'utilise pour des applications LIDAR (*Light Detection And Ranging* en anglais) et pour l'imagerie. Cette dernière est présentée à la **Figure 1-19**.

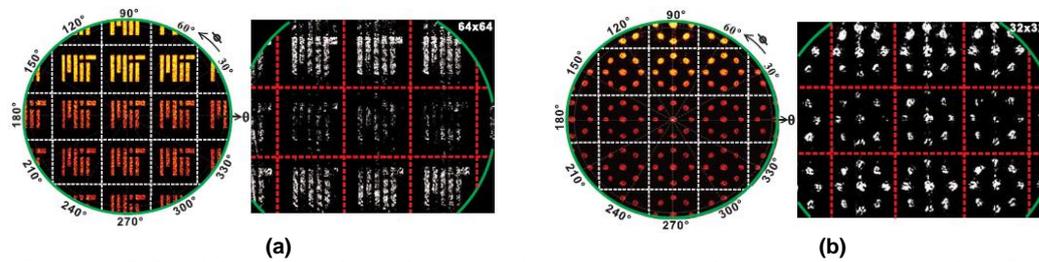


Figure 1-19 Résultats de simulations et expérimentaux pour la génération d'image par le circuit de Sun *et al.* Plusieurs ordres d'interférence apparaissent pour chaque image projetée, a) logo du MIT simulé (gauche) et obtenu expérimentalement (droite), b) figure de points multiples simulée (gauche) et obtenue expérimentalement (droite).

Le travail de Sun *et al.* possède plusieurs parallèles avec notre projet de lunettes RA par projection rétinienne au CEA-LETI. Il aborde les thèmes des hologrammes pour la projection d'image (CGH dans son cas vs HOE dans notre projet). De plus, le système de projection est composé de circuits de photonique intégrée fonctionnant dans le spectre visible et comprenant une très grande compacité (i.e. grande densité de points d'émission). Ces deux derniers points forment les bases du projet de cette thèse.

1.1.3 Projection rétinienne au CEA-LETI

Notre équipe au CEA-LETI a récemment proposé un nouveau concept de système de projection d'image pour les futurs visiocasques RA à vision optique. Celui-ci est un système de projection rétinienne combinant la photonique intégrée et l'holographie analogique. Il a fait l'objet de plusieurs publications dans des journaux ^{[15],[36]-[42]} et un brevet décrivant le concept a été publié ^[43].

Le concept de lunettes RA par projection rétinienne du CEA-LETI espère pouvoir surmonter les limitations des systèmes RA existants : encombrement, poids, complexité des systèmes optiques, rendus visuels (ex : image bruitée dans les circuits utilisant les CGH) et FOV limitée.

En effet, la combinaison « photonique intégrée – hologramme analogique » devrait permettre la conception de lunettes RA qui soient minces, sans système optique (lentilles, combineurs ...) ni micro-écran. Ces conditions sont nécessaires pour une compacité et une intégration complète du système de lunettes RA.

La gestion optique de la projection de l'image devrait être simplifiée à l'aide d'un concept d'auto-focalisation unique au projet.

Des concepts de lunettes RA utilisant des guides d'onde planaires ou des guides d'onde micrométriques pour les CGH ont été présentés précédemment. Ces concepts visaient déjà à l'intégration plus poussée de systèmes RA actuels.

Dans notre cas, nous nous intéressons aux guides d'onde micrométriques hors du contexte des CGH et de la projection 3D. L'utilisation de guides d'onde micrométriques associés à un hologramme pixélisé doit permettre de contrôler individuellement les propriétés optiques de chaque point d'émission du projecteur (angle, phase, intensité) contribuant à former une image sur la rétine. De plus, notre concept devrait éliminer le besoin de l'utilisation de micro-écrans tel qu'on le retrouve dans les lunettes RA utilisant des guides d'onde planaires.

Les guides d'onde du projet sont faits en Si_3N_4 , dont les propriétés sont décrites par après. C'est notamment la transparence de ce matériau et de son encapsulant qui permettent de voir à travers les circuits photoniques, une propriété essentielle aux lunettes RA. De plus, la compacité des composants de circuits en Si_3N_4 permet également une forte intégration du système.

Le projet se limite à la projection monochromatique. La longueur d'onde utilisée est $\lambda = 532$ nm (vert) pour plusieurs raisons. D'abord, c'est autour de cette longueur d'onde où les hologrammes analogiques auxquels nous avons accès sont les plus sensibles (i.e. meilleure efficacité de réflexion). On retrouve également facilement des lasers commerciaux puissants et de grande longueur de cohérence dans cette gamme spectrale. La puissance des lasers est un critère essentiel pour enregistrer rapidement et efficacement des hologrammes. Enfin, la longueur d'onde utilisée se rapproche du pic de sensibilité de l'œil ^[44] ($\lambda = 550$ nm). On espère ainsi développer un dispositif à forte luminosité (ex : en extérieur sous l'éclairage direct du soleil). La forte directivité du projecteur rétinien devrait également contribuer à une luminosité maximale du dispositif en plein jour.

1.1.3.1 *Principes de base du concept de projection rétinienne du CEA-LETI*

Dans le concept de projection rétinienne du CEA-LETI, plusieurs champs lumineux (*light fields*) sont projetés vers l'œil à partir d'un circuit photonique intégré composé de milliers de guides d'onde. Ce circuit transparent est placé à la surface d'un verre de lunette. Une vue d'artiste du concept est présentée à la **Figure 1-20**.

Le rôle des guides d'onde est de distribuer la lumière depuis des sources laser vers plusieurs distributions de points d'émission (DPEs) à la surface du verre de lunette. L'extraction de lumière à un point d'émission (PE) est réglée activement à l'aide d'une électrode et d'un composant thermo-optique ou électro-optique.

Le champ émis des PEs est dirigé vers une matrice d'hologrammes analogiques « pixelisés » (i.e. HOEs en réseaux matriciels). Celle-ci est superposée à la surface du circuit. L'orientation et la phase de la lumière émise de chaque PE est modifiée individuellement par la portion d'hologramme recouvrant ce point, d'où le terme « pixel holographique ».

Les champs de lumière d'une DPE se propagent dans l'espace libre sans former d'image définie. L'interférence entre ces champs provoque la création d'un pixel image seulement à leur arrivée sur la rétine de l'observateur. La combinaison de plusieurs DPEs permet la projection d'une image 2D complète. La formation d'image ne nécessite donc pas de système optique ou de combineur optique sur la lunette. La formation d'image s'effectue naturellement avec le système optique de l'œil (cornée et cristallin). C'est ce qu'on appelle l'effet d'auto-focalisation. Ce concept permettrait de radicalement augmenter la compacité de la lunette RA. Le contrôle précis des propriétés de la matrice d'hologrammes pixelisés permettrait éventuellement de faire varier le FOV. Contrairement aux systèmes d'affichage actuels, l'image n'existe donc pas dans l'environnement extérieur à l'œil.

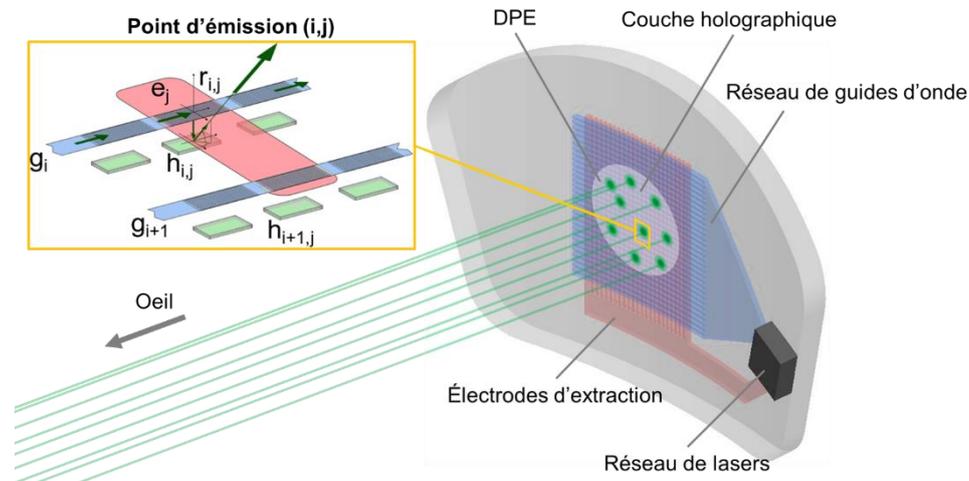


Figure 1-20 Vue d'artiste du concept de projection rétinienne au CEA-LETI. Un réseau de lasers (boîte noire) injecte la lumière dans un circuit photonique de guides d'onde (bleu). Ce circuit comprend des lignes de guides d'onde g_i le long desquels des électrodes e_j (rouge) et des réseaux de diffraction $r_{i,j}$ sont utilisés pour extraire localement la lumière du circuit (distribution de points d'émission à la surface du verre de lunette). L'orientation et la phase des points d'émission est modifiée à l'aide d'un hologramme pixelisé $h_{i,j}$ déposé sur le circuit (vert, i.e. de même couleur que la lumière). Les faisceaux lumineux sont projetés dans l'œil où ils vont interférer sur la rétine pour former une image.

1.1.3.2 Effet d'auto-focalisation

Une image provenant d'une distance infinie de l'observateur se propage comme une somme d'ondes planes. L'œil transforme ces ondes planes en ondes sphériques afin de pouvoir les focaliser sur la rétine (**Figure 1-21 (a)**).

Dans une lunette RA, l'image est généralement formée par un micro-écran installé sur la lunette. L'image est donc émise très proche de l'œil. Sans système optique correcteur, l'image se propage selon un ensemble d'ondes sphériques. À l'entrée de l'œil, sa capacité d'accommodation n'est pas suffisante pour focaliser nettement ces ondes, tel que montré à la **Figure 1-21 (b)**. En effet, leur émission proche de l'œil leur confère un rayon de courbure plus petit que celui correspondant à la limite d'accommodation de l'œil. Les systèmes optiques embarqués sur les lunettes RA permettent de collimater ces ondes avant leur entrée dans l'œil. Cela permet de compenser la limite d'accommodation de ce dernier en répliquant l'émission d'ondes émises depuis l'infini (i.e. ondes planes). L'image peut alors être focalisée sur la rétine (**Figure 1-21 (c)**).

Dans le concept de projection rétinienne du CEA-LETI, l'effet d'auto-focalisation permet d'éviter le recours à ces systèmes optiques qui sont souvent volumineux et complexes.

L'effet d'auto-focalisation utilise l'interférence de plusieurs points d'émission proches de l'œil. La combinaison des fronts d'onde sphériques de plusieurs points forme alors un front plan qui peut être directement focalisé naturellement sur la rétine telle une image à l'infini. Ce fonctionnement est comparable à la formation de fronts d'onde par les OPAs qui utilisent le principe de Huygens-Fresnel.

La phase des fronts d'onde circulaires doit être précisément réglée pour former correctement le front d'onde plan (**Figure 1-21 (d)**). Autrement, l'effet d'auto-focalisation est perturbé par des interférences sans cohérence de phase et ne permet pas une focalisation bien définie (**Figure 1-21 (e)**).

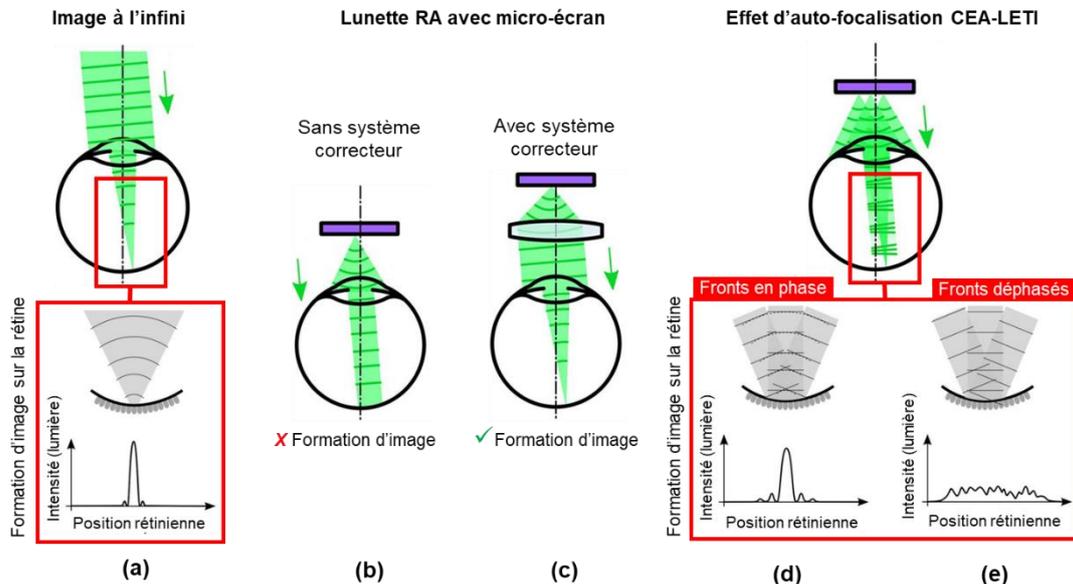


Figure 1-21 Focalisation de plusieurs fronts d'onde sur la rétine, a) focus net d'un pixel image provenant d'un front à une distance infinie de l'œil, b) capacité d'accommodation de l'œil insuffisante pour une lunette RA avec un micro-écran proche de l'œil sans système correcteur, c) un système correcteur est ajouté à la lunette RA pour bien focaliser l'image sur la rétine, d) focus net d'un pixel image créé par la superposition de fronts d'onde plans en phase imitant la forme d'une onde sphérique dans la rétine, e) pixel image bruité par l'interférence de fronts d'onde plans déphasés aléatoirement. Dans ce cas, le pixel image n'est pas observé.

La figure d'interférence générant l'effet d'auto-focalisation est obtenue en utilisant plusieurs points d'émission (PEs) distribués à la surface du verre de lunette. Les PEs d'une même distribution partagent la même intensité et sont accordés en phase.

La distribution des points (DPE) peut prendre plusieurs formes comme présenté à la **Figure 1-22**. Dans le cas d'une distribution périodique, un point lumineux est focalisé au fond de la rétine suite à l'interférence des faisceaux d'une DPE. Toutefois, ce point également répliqué par les ordres d'interférence supérieurs. Pour éliminer cet effet indésirable, la distribution de points doit être aléatoire, afin que seul l'ordre d'interférence central subsiste.

Si on utilisait un seul point par DPE, il n'y aurait pas d'interférence et on obtiendrait une tâche diffuse au fond de l'œil.

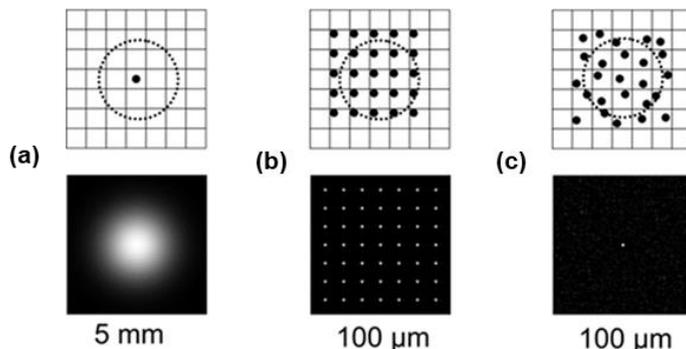


Figure 1-22 Distributions des points d'émission (DPE) sur le verre RA (haut) et le résultat de simulations MATLAB pour la focalisation d'un pixel sur la rétine (bas), a) point d'émission unique non-focalisé, b) points d'émission périodiques focalisant un pixel répliqué par des ordres d'interférence supérieurs, c) points d'émission aléatoires formant un seul pixel net sur la rétine.

Une distribution de points d'émission forme donc un « pixel rétinien » ou « spel » (spot élémentaire) unique sur la rétine. Plusieurs DPEs peuvent être utilisés pour focaliser des spels à plusieurs endroits de la rétine, formant une image 2D.

La résolution du projecteur rétinien et le bruit de l'image dépendent directement du nombre de points d'émission dans chaque DPE. Une DPE avec un faible nombre de points d'émission va projeter un spel bruité. Toutefois, davantage de DPEs pourront être insérés sur une surface de circuit photonique donnée, augmentant la résolution de l'image. À l'opposé, l'utilisation de DPEs avec davantage de points d'émission permettra d'obtenir des spels mieux définis (moins de bruit). En contrepartie, la résolution de l'image va diminuer car moins de DPEs pourront être insérés sur la lunette RA. Le ratio résolution-bruit doit être optimisé selon l'application d'affichage visée. Ces concepts ont été démontrés expérimentalement par notre équipe de recherche ^{[15][42]}.

Un avantage du concept de projection rétinienne au CEA-LETI est que la formation d'images peut se faire sur plusieurs zones différentes de la rétine. Un écran de faible résolution (ex : 300 x 150 pixels) dans notre concept pourrait donc couvrir un champ aussi grand que des lunettes RA standards de meilleure résolution (ex : 800 x 600 pixels). Ce concept de formation d'images en plusieurs zones est représenté à la **Figure 1-23**.

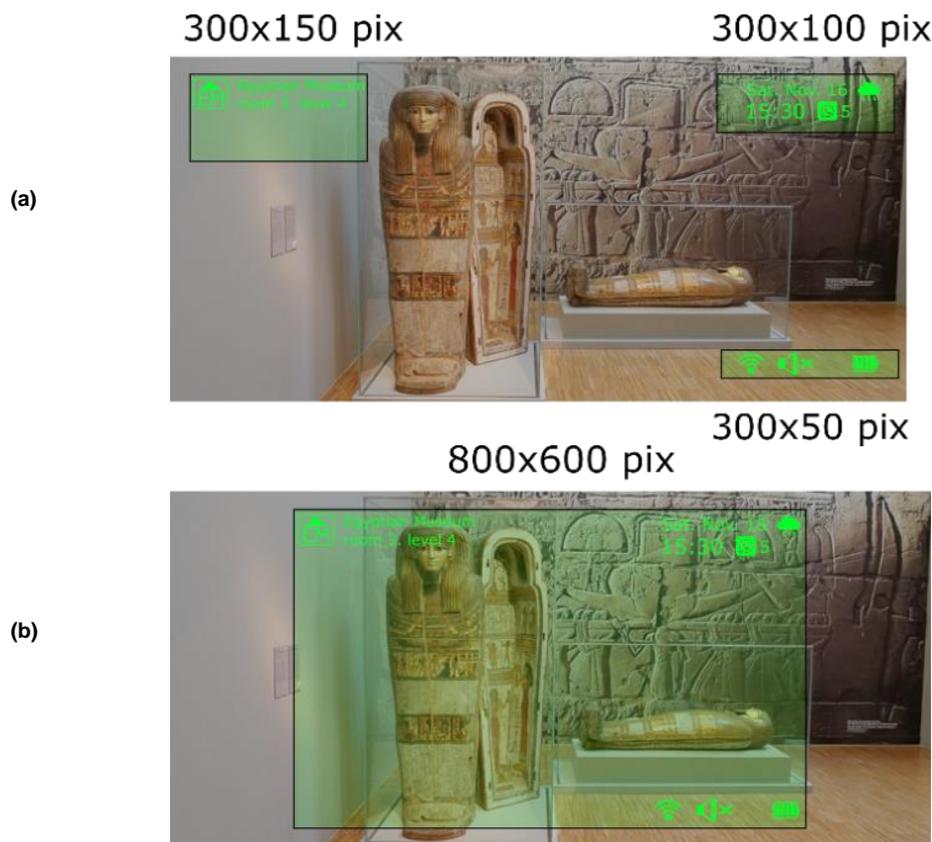


Figure 1-23 Les lunettes RA de projection rétinienne du CEA-LETI pourraient permettre de créer une image sur plusieurs zones de la rétine (a), permettant de couvrir un champ aussi grand que des lunettes RA standards de plus haute résolution comme en (b).

1.1.3.3 Hologramme

Une distribution aléatoire des points d'émission pose un défi pour satisfaire la condition d'accord de phase afin de générer l'effet d'auto-focalisation.

Dans notre concept, la lumière d'une source laser unique est divisée en petites fractions pour alimenter optiquement chaque point d'émission d'une DPE. Cette lumière est transportée de la source vers les points d'émission par des guides d'onde. Toutefois, une fois que la lumière atteint chaque point d'émission, sa phase n'est pas accordée car la longueur du chemin optique pour atteindre chaque point est différente.

La phase peut être réglée individuellement à chaque point avec un composants photonique intégré additionnel ou par un hologramme. Dans notre projet, nous avons sélectionné la seconde option car l'hologramme permet en plus de contrôler l'angle d'émission de chaque point, nécessaire notamment pour contrôler le lieu de focalisation sur la rétine afin de former une image 2D. De plus, les composants photoniques intégrés permettant de régler la phase occupent une large surface, complexifiant la conception d'un PIC compact. Un hologramme quant à lui peut être déposé sur le point d'émission en occupant une surface égale à celui-ci. L'architecture et la compacité du PIC n'est donc pas perturbée par l'utilisation de l'hologramme. C'est la portion d'hologramme au-dessus de chaque point d'émission qui en gère la phase et l'angle d'émission qu'on appelle « pixel holographique ».

Un exemple des premiers pixels holographiques enregistrés sur une lame de verre dans notre équipe est présenté à la **Figure 1-24**.

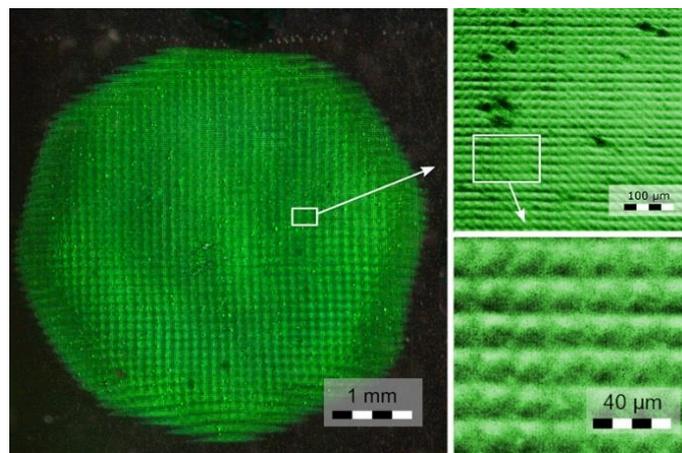


Figure 1-24 Premiers tests des enregistrements de pixels holographiques sur une lame de verre dans notre équipe de recherche au CEA-LETI.

En début de projet, on pose l'hypothèse que les réseaux de diffraction sont trop petits (quelques microns) pour que le pixel holographique puisse collimater son émission. Sans cette contrainte, la capacité de collimation de l'hologramme à si petite échelle permettrait de se passer de l'effet d'auto-focalisation pour projeter des points de lumière directement collimatés sur la rétine.

Les points d'émission sont distribués dans une matrice formée de lignes i (guides d'onde) et de colonnes j (électrodes d'activation). La **Figure 1-25** illustre la lumière guidée par le guide d'onde g_j (bleu) et un hologramme pixélisé h_{ij} (vert). Le guide d'onde transporte la lumière jusqu'à ce que le réseau de diffraction r_{ij} d'un point d'émission soit activé par une électrode e_j (rouge). L'émission est directement projetée sur l'hologramme qui la réfléchit selon des conditions préétablies (phase $\varphi_{i,j}$ et orientation $\psi_{i,j}$). Cette réflexion est effectuée en direction de l'œil.

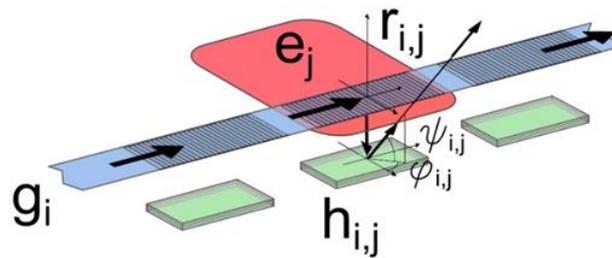


Figure 1-25 Assemblage entre le guide d'onde (bleu) dont l'émission de lumière est activée à l'aide d'une électrode (rouge). L'émission est réfléchiée par un hologramme (vert) qui en change les caractéristiques de phase et d'orientation.

1.1.3.4 Circuit photonique intégré

Le circuit photonique intégré est composé de milliers de guides d'onde transportant la lumière vers des réseaux de diffraction représentant, avec les hologrammes, les points d'émission.

Le réseau de guide d'onde doit être conçu afin que chaque DPE ait une distribution aléatoire pour l'effet d'auto-focalisation. Cela complexifie la conception du circuit. Pour positionner les points d'émission de façon aléatoire, les guides d'onde doivent pouvoir être alimentés ou distribués de façon aléatoire.

Une architecture de base pourrait être d'utiliser des guides droits et parallèles avec un espacement constant entre eux. Les PE pourraient être insérés à des positions aléatoires le long des guides d'onde, tel que présenté à la **Figure 1-26 (a)**. Toutefois, les points d'émission appartenant à un même guide d'onde (bleu) ou ligne d'électrode (rouge) sont dans ce cas parfaitement alignés. La DPE est donc limitée à une distribution quasi-aléatoire. Pour une DPE qui se rapproche d'une distribution complètement aléatoire, il faut courber les guides d'onde et les électrodes irrégulièrement (**Figure 1-26 (b)**). Ainsi, les points d'émission d'une DPE seront tous à des distances différentes les uns des autres. En pratique, ce type de distribution n'est pas parfaitement aléatoire car il se base sur un modèle de distribution où la position de chaque PE est générée aléatoirement dans une zone limitée (rectangles délimités par des pointillés sur la **Figure 1-26**). Toutefois, l'architecture avec des guides courbés irrégulièrement est plus complexe à concevoir que celle avec des guides droits.

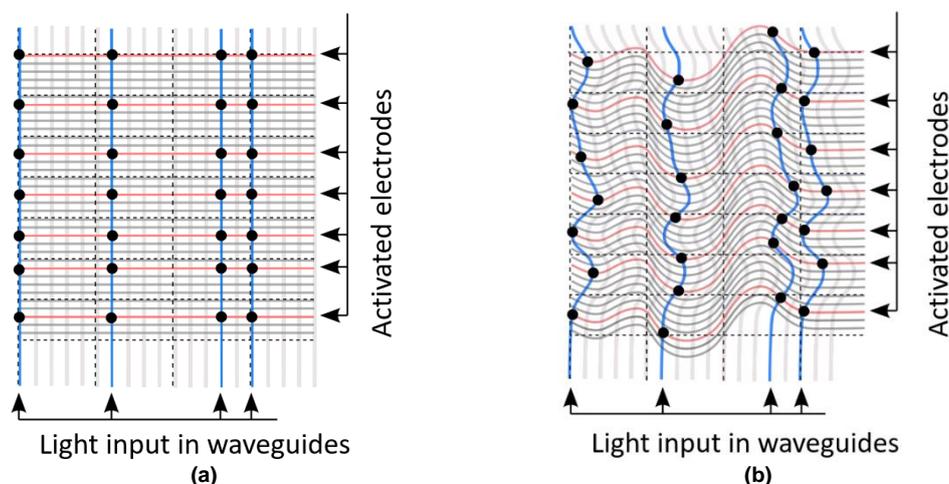


Figure 1-26 Architectures d'adressage des points aléatoires entre le circuit photonique (bleu) et les électrodes (rouge), a) guides d'onde et électrodes droits alimentés aléatoirement, b) guides et électrodes dont les courbures et l'alimentation sont tous les deux aléatoires.

Dans ce concept, les DPEs sont activées tour à tour et forment une image par persistance rétinienne. L'adressage ligne-colonne des PE simplifie le contrôle de l'activation des PE par rapport à un contrôle individuel de ceux-ci. De plus, les PE d'une même DPE sont activés simultanément pour générer l'effet d'auto-focalisation.

L'article de Martinez *et al.* [15] permet d'approfondir plus en détail la description du concept.

Les bases contextuelles du domaine de la photonique intégrée dans le spectre visible sont présentées à la sous-section suivante. Elles servent notamment à introduire le Si_3N_4 qui est le matériau au centre de la conception de nos circuits photoniques intégrés. La sous-section suivante permet également de présenter les champs d'applications de ce matériau qui vont au-delà de la RA.

1.1.4 Photonique intégrée visible

1.1.4.1 Photonique intégrée

L'électronique a bénéficié de la miniaturisation et de l'intégration sur puce pour se développer. Cela a notamment permis le développement des ordinateurs et téléphones intelligents modernes. En optique, la transition des composants macroscopiques à microscopiques s'est entamée beaucoup plus récemment. Cette transition alimente encore beaucoup de recherches actuelles [45][46].

L'industrie microélectronique utilise massivement le silicium dans ses circuits intégrés. Ce matériau a également des propriétés pouvant être utilisées en optique. Notamment, il peut guider des longueurs d'onde de l'IR. Le savoir-faire et les moyens technologiques de la microélectronique ont pu être récupérés afin de développer des circuits intégrés pour l'optique à base de silicium. Des composants optiques miniatures ont donc vu le jour. Ils permettent d'intégrer de nombreuses fonctions optiques sur une puce.

On s'intéresse à intégrer plusieurs fonctions optiques à l'échelle microscopiques sur des circuits intégrés « monolithiques ». Le terme monolithique se réfère à la fabrication en « un seul bloc », i.e. toutes les fonctions optiques étant connectées et fabriquées sur une même puce. La base de fabrication d'une puce est généralement un substrat de silicium (*wafers* en anglais).

Les circuits photoniques intégrés sont souvent référés par l'acronyme PIC (*Photonic Integrated Circuit*).

Les longueurs d'onde visées sont typiquement dans les régions autour de $1.55 \mu\text{m}$ et $1.31 \mu\text{m}$ [47] dans le spectre IR. La photonique intégrée IR a plusieurs applications en télécommunications dont les émetteurs-récepteurs à grande vitesse et les LIDAR [48].

L'un de avantages des communications optiques versus électriques est que la lumière ne subit pas de perturbations liées à une charge. Cela permet une transmission des données sur de plus longues distances avec une plus grande vitesse et une moins grande consommation d'énergie. Toutefois, les composants photoniques sont généralement plus larges que les composants électroniques, ce qui représente un défi à leur intégration sur une puce dense [49].

Plusieurs recherches tendent à l'intégration de micro-composants photoniques et électroniques sur une même puce pour la conception d'interconnexions entre les deux types de technologies. Cela vise des applications en télécommunications [50].

La fabrication des circuits photoniques intégrés à base de silicium suit généralement un empilement de couches appelé SOI (*Silicon On Insulator*) [51], comparable aux circuits en

microélectronique. Cet empilement est schématisé à la **Figure 1-27**. La base est le substrat de silicium (*wafer*). Il fait plusieurs centaines de microns d'épaisseur (725 μm typiquement). Une couche isolante de SiO_2 recouvre le substrat (BOX, *Buried Oxide*). Elle sert à séparer la couche de guidage de celle du substrat. Typiquement, l'épaisseur du BOX est voisine de 2 μm . Son indice de réfraction est faible (~ 1.45 à $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$). Une fine couche de Si recouvre le BOX (typiquement 220 nm) et représente la couche de guidage pour la conception du circuit photonique. Son indice de réfraction plus élevé que le BOX ($n_{\text{Si}} \approx 3.5$ à $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) lui permet de guider la lumière [48]. Des couches de guidage plus épaisses peuvent être déposées, notamment pour l'intégration hétérogène de lasers.

Parfois, une couche est ensuite déposée pour recouvrir la couche de guidage et l'encapsuler. Cela permet notamment de protéger le circuit et de réduire les pertes de propagation le long de celui-ci. La couche de guidage est donc entourée de matériaux d'indices inférieur.

D'autres matériaux peuvent remplacer la couche de guidage en Si, tel que le nitrure de silicium (Si_3N_4) [48]. La fabrication du premier film de Si_3N_4 sur une couche de SiO_2 date de 1977 par Stulius et Streifer pour une propagation à $\lambda = 632 \text{ nm}$ [52]. Toutefois, l'intérêt pour le matériau ne s'est développé qu'à partir de 2005 lorsque Sandia Labs et l'université de Trente ont démontré des applications dans le NIR [53].



Figure 1-27 Empilement des couches SOI ayant une couche de guidage en Si ou en Si_3N_4 . Les épaisseurs standards pour un SOI de Si sont indiquées sur la figure.

Le Si n'est pas transparent dans le visible. Son remplacement par du nitrure de silicium (Si_3N_4) permet d'obtenir un matériau diélectrique transparent et capable de guider la lumière dans le spectre visible – NIR. Le Si_3N_4 a été sélectionné comme matériau de guidage des circuits photoniques intégrés pour le projet de lunettes RA du CEA-LETI notamment pour ces propriétés.

1.1.4.2 Propriétés du Si_3N_4

Le Si_3N_4 possède plusieurs propriétés importantes à connaître par rapport aux autres matériaux de guidage généralement utilisés en photonique intégrée. Ces propriétés sont détaillées ci-dessous:

- Il est compatible CMOS (*Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor*). Les circuits Si_3N_4 peuvent donc être fabriqués dans les installations de microélectroniques préexistantes.

Cela lui permet d'être utilisé pour la fabrication de circuits photoniques intégrés visibles de grande qualité (i.e. haute résolution de fabrication, grande précision et reproductibilité de fabrication), à bas coûts et avec de grands volumes de production.

Sa compatibilité CMOS lui permet aussi une intégration monolithique avec des composants électroniques et des composants photoniques à base de Si [50].

- Contraste d'indice équilibré ($\Delta n \approx 0.55$) entre le Si_3N_4 et sa couche d'encapsulation (typiquement du SiO_2).

- En effet, son indice de réfraction ($n \sim 2$) est plus élevé que ceux d'autres matériaux répandus pour la fabrication de guides d'onde dans le visible, tel que le verre ($n \sim 1.45-1.5$), le SU-8 ($n \sim 1.6$) et l'oxynitride de silicium ($n \sim 1.5$). Cela permet au Si_3N_4 d'avoir un meilleur confinement du champ électromagnétique dans le guide, et donc des circuits plus denses.
- L'absorption quasi-nulle du Si_3N_4 participe aux faibles pertes de propagation des guides d'onde [54].
- Faible sensibilité thermique du Si_3N_4 par rapport au silicium
 - En effet, le silicium a un coefficient thermo-optique de 1.86 E-4 K^{-1} à $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$. Un changement d'un degré cause un décalage de 70 pm dans les filtres SOI en longueur d'onde. Pour compenser cette sensibilité (i.e. conserver un fonctionnement à une longueur d'onde fixe), la capacité à régler activement les composants photoniques peut être ajoutée au coût d'une complexification des circuits.
La forte sensibilité thermique du Si est toutefois bénéfique pour l'implémentation de commutateurs thermo-optiques (*thermo-optic switches* en anglais), de filtres optiques, de coupleurs avec des ratios de couplage aléatoires et l'ajustement de phase dans des guides d'onde.
 - Le Si_3N_4 déposé par LPCVD (*Low-Pressure Chemical Vapor Deposition* en anglais) a un coefficient thermo-optique de 2.45 E-5 K^{-1} à $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$. C'est environ 8 fois moins que le Si.
Pour les applications sensibles en température, le coefficient thermo-optique largement plus faible du Si_3N_4 est avantageux par rapport au Si. Toutefois, pour les applications utilisant des commutateurs thermo-optiques, la plus faible sensibilité du matériau mène généralement à davantage de dissipation thermique [48].
- Peu supporter de fortes puissances optiques dans des guides d'onde (jusqu'à 20W), ce qui est particulièrement pratique pour les applications LIDAR [55].
- Son point de fusion est supérieur à 1000 °C et le matériau est suffisamment inerte chimiquement pour des applications en détection biochimique.
- Le Si_3N_4 n'a pas d'absorption à deux photons (surtout au-dessus de $\lambda = 600 \text{ nm}$), ce qui lui confère un grand potentiel pour les applications non-linéaires par rapport au Si [47].

Le comportement non-linéaire d'un matériau apparaît pour de fortes intensités optiques, comme dans le cas d'un guide d'onde très confiné. Dans cette condition de forte intensité, l'interaction entre la lumière et la matière n'est plus linéaire. Cela signifie que le champ en entrée n'est pas une superposition du champ en sortie après propagation dans le milieu non-linéaire. Par exemple, l'un des phénomènes non-linéaire connu est l'effet Kerr, où l'indice de réfraction du milieu varie selon l'intensité de la lumière [56].

Les propriétés non-linéaires avantageuses du Si_3N_4 pourraient être utilisées dans l'intégration compacte de réseaux de lasers. En effet, des sources de lumière non-classiques pourraient être réalisées à partir d'un supercontinuum ou de peignes de fréquence optiques.

À terme, cela pourrait éventuellement être utilisé dans notre projet de RA afin d'intégrer le circuit photonique et les sources lasers de façon monolithique [57].

- La gamme de transparence d'un matériau détermine ses domaines d'application potentiels en photonique. Les circuits photoniques à base de Si ont une transparence entre 1.1 μm and 4 μm . La limite inférieure est donnée par la bande interdite du Si. La limite supérieure est donnée par la couche du BOX (SiO_2) qui absorbe fortement dans les moyens-IR à partir de $\lambda = 4 \mu\text{m}$.
 La transparence des circuits Si_3N_4 est plus large, s'étalant de 400 nm à 4 μm . La limite supérieure est donnée par l'absorption du SiO_2 comme dans les circuits SOI [48].

La conception de composants photoniques dans le visible a toutefois des désavantages par rapport au spectre IR. D'abord, la diffusion par la rugosité de surface augmente proportionnellement à $1/\lambda^4$ [58]. Le facteur $1/\lambda^4$ provient de la diffusion Rayleigh [50] (i.e. lorsque la longueur d'onde diminue, celle-ci est plus sensible à la diffusion par les irrégularités des flancs des guides d'onde). Les circuits photoniques intégrés dans le visible ont donc généralement des pertes de propagation beaucoup plus élevées que dans l'IR.

Ensuite, les dimensionnements des guides d'onde monomodes du spectre visible se réduisent et s'approchent des limites de fabrication actuelles.

Plusieurs propriétés du Si_3N_4 – dont sa capacité à guider la lumière visible – lui permettent d'avoir des applications en biophotonique. Les domaines d'applications classés selon la longueur d'onde sont donnés pour divers matériaux tel que présenté à la figure **Figure 1-28**.

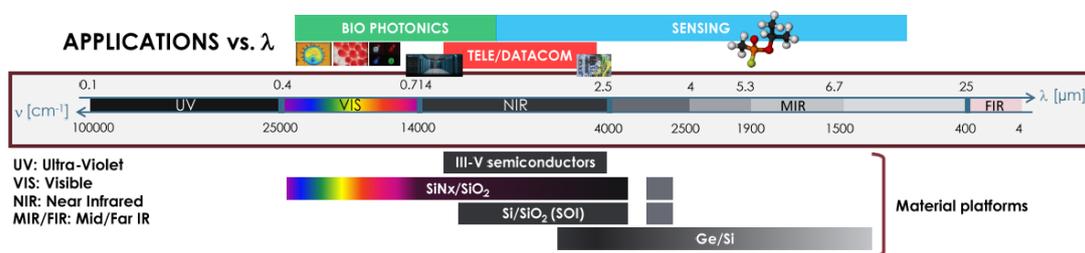


Figure 1-28 Domaines d'applications en photonique intégrée selon la longueur d'onde et les divers matériaux utilisés. Le schéma est tiré de P. Muñoz *et al.* [53]

La fabrication de circuits Si_3N_4 est suffisamment flexible pour fabriquer des circuits multicouches utiles pour la conception de circuits compacts [48]. En effet, en augmentant la compacité des circuits uniquement sur un seul niveau, les guides tendent à se rapprocher (effets de couplage indésirables) ou se croiser (pertes optiques additionnelles). Des coupleurs multicouches permettent notamment de croiser des guides d'onde tout en réduisant les pertes à leurs intersections, tel que présenté par A. M. Jones *et al.* [59] à la **Figure 1-29**.

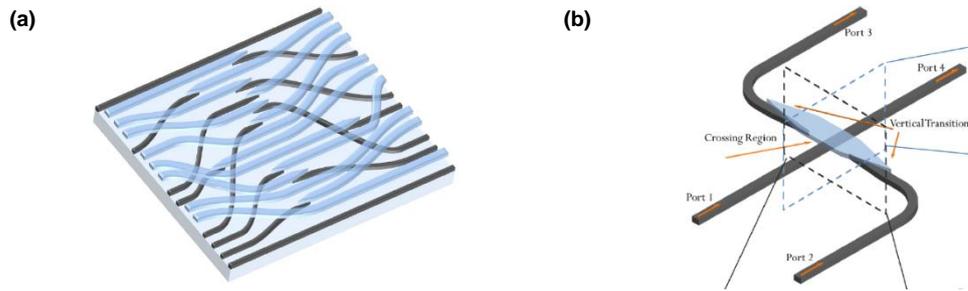


Figure 1-29 Utilisation de plusieurs niveaux de guidage pour des circuits photoniques compacts, a) exemple de superposition de deux couches de guidage pour éviter les croisements directs entre des guides d'onde, b) schéma détaillé d'un « pont » multicouche au croisement de guides d'onde.

D'autres exemples d'architectures multicouches sont détaillés dans des articles de Chiles *et al.* [49] et Heidemana *et al.* [60].

Généralement, le Si_3N_4 servant à la fabrication de circuits intégrés est déposé par PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*) ou LPCVD (*Low-Pressure Chemical Vapor Deposition*).

Les dépôts par LPCVD sont généralement préférés au PECVD car ils permettent un bon contrôle de l'homogénéité de l'indice de réfraction du matériau ainsi que sur les dimensionnements de l'épaisseur des guides. Toutefois, c'est un procédé de dépôt à haute température ($> 700\text{ °C}$), ce qui induit une contrainte sur des couches de dépôts épaisses ($> 300\text{ nm}$) [50]. Cela peut causer des fissures sur les couches de dépôt ou peut perturber le fonctionnement de certains composants photoniques tels que les anneaux de résonance [57]. Ces hautes températures peuvent aussi nuire à la co-intégration du circuit photonique avec l'électronique CMOS. Dans les télécommunications (spectre IR), les techniques LPCVD sont couramment utilisées car les hautes températures permettent de faire des recuits éliminant les liens N-H et Si-H [48]. Ceux-ci proviennent de l'usage de précurseurs tels que le SiH_4 et le N_2 lors de la création de la couche de dépôt de Si_3N_4 [61]. Ces liens sont responsables d'une forte absorption du matériau vers $\lambda \sim 1.52\text{ }\mu\text{m}$.

Les dépôts PECVD sont effectués à faible température (200-400 °C), leur permettant d'être utilisés pour des couches de Si_3N_4 plus importantes sans subir de contrainte du matériau. En contrepartie l'homogénéité des dépôts est moins bonne que dans le cas du LPCVD.

Les techniques de dépôts ont une incidence sur l'indice de réfraction de la couche de Si_3N_4 . De plus, les couches de Si_3N_4 peuvent être enrichies soit de silicium (Si) ou d'azote (N). Cet enrichissement peut également avoir un effet sur l'indice de réfraction de la couche. Par exemple, dans le cas d'un dépôt PECVD, la couche peut être enrichie en silicium (augmentation de l'indice de réfraction) ou enrichie en azote (réduction de l'indice de réfraction). L'enrichissement par l'un ou l'autre des éléments est une technique employée selon l'application. Par exemple, dans le cas d'applications non-linéaires, les fortes intensités optiques nécessitent des guides d'onde épais pour confiner davantage la lumière. Pour ce faire, des couches épaisses de nitrure de silicium peuvent être déposées en augmentant la proportion de silicium (matériau enrichi en Si, *Silicon rich SiN*) lors de dépôts LPCVD [48].

Dans notre cas, nous nous intéresserons au nitrure de silicium « stœchiométrique », i.e. dont les proportions de Si et N sont exactes (Si_3N_4), et donc sans enrichissement. Les indices de réfraction et les coefficients d'absorption du Si_3N_4 stœchiométrique déposé par LPCVD et PECVD sont montrés à la figure **Figure 1-30** pour le spectre visible-IR.

L'indice du Si_3N_4 peut affecter ses pertes de propagation. En effet, on peut estimer que les pertes de propagation augmentent proportionnellement selon Δn^2 (i.e. $n_{\text{guide}}^2 - n_{\text{encapsulation}}^2$) [48]. Les guides ayant un fort contraste d'indice sont donc plus sensibles à la rugosité de surface.

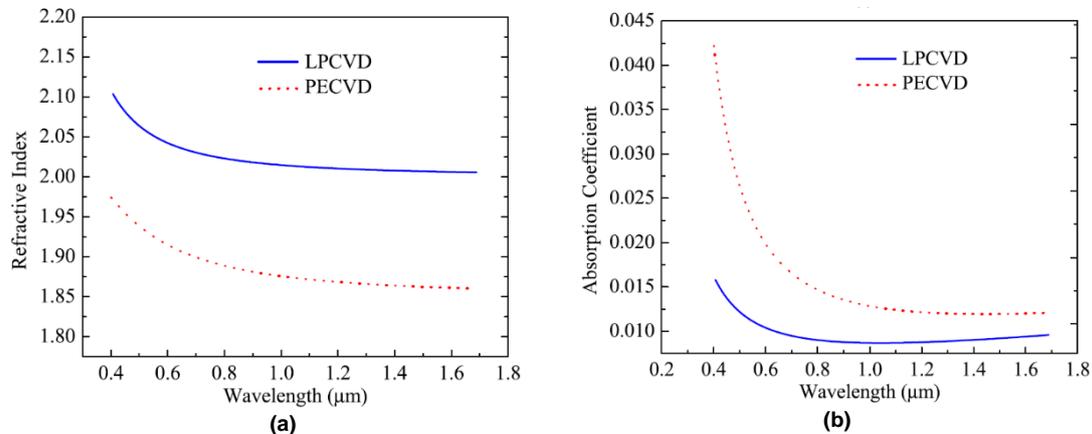


Figure 1-30 a) indices de réfraction et b) et coefficients d'absorption du Si_3N_4 stœchiométrique déposé par LPCVD et PECVD pour le spectre visible-IR. Tiré de A. Rahim *et al.* [48].

Le Si et le Si_3N_4 sont parfois combinés dans un même PIC pour tirer le meilleur parti des 2 matériaux (densité d'intégration pour le Si, faibles pertes de propagation / effets non-linéaires / capacité à guider de fortes puissances pour le Si_3N_4). Des coupleurs Si- Si_3N_4 ont été développés dans ce cas [55]. La combinaison des matériaux dépasse le cadre de la thèse qui se concentre sur le guidage à des longueurs d'onde visibles.

1.1.4.3 Géométrie transversale des guides d'onde

Un exemple classique de composant guidant la lumière est une fibre optique dont le cœur est circulaire. Toutefois, en photonique intégrée les guides d'onde ont généralement une coupe transversale rectangulaire plutôt que circulaire (ex : guides en échange d'ions [62]). Les guides rectangulaires permettent la conception de PICs compacts. De plus, cela correspond à une forme simple à fabriquer dans les procédés de photolithographie standards. Le guide d'onde représente le canal de base pour transporter la lumière dans le circuit.

Des architectures transversales classiques de guides d'onde sont présentées à la **Figure 1-31**. Les schémas sont tirés de M. A. G. Porcel *et al.* [47].

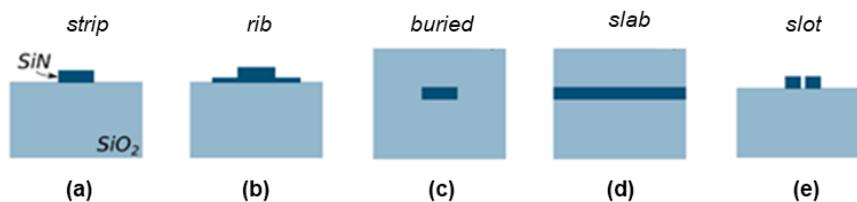


Figure 1-31 Architectures transversales classiques de guides d'onde, a) guide *strip*, b) guide *rib*, c) guide *buried*, d) guide *slab*, e) guide *slot*.

Les guides *strip* (rectangle, déposé sur le BOX) permettent de faibles rayons de courbure, surtout en polarisation TE (*Transverse Electric*, voir chapitre 2 **Moyens** pour la description des conventions en polarisation). Dans le cas de guides monomodes *strip*, les dimensions de la coupe transversale des guides sont généralement de l'ordre de quelques centaines de nanomètres (i.e. de l'ordre de la longueur d'onde étudiée). Ces dimensionnements dépendent notamment du contraste d'indice Δn entre le cœur du guide et de son environnement direct. Les guides *rib* (forme en « T ») sont utilisés davantage pour les composants électro-optiques comme les modulateurs.

Il existe toutefois des guides d'onde dont la coupe transversale diffère des géométries classiques afin de viser des propriétés particulières. C'est le cas notamment de la famille de guides d'onde Si_3N_4 rassemblées sous le nom « technologie TriPleX » et développés par la compagnie LioniX au Pays-Bas [63][64][65]. Ces guides d'onde sont conçus pour une utilisation dans le spectre visible-IR. Leurs géométries optimisées à $\lambda = 1550$ nm sont présentées à la **Figure 1-32** tirée de K. Wörhoff *et al.* [63].

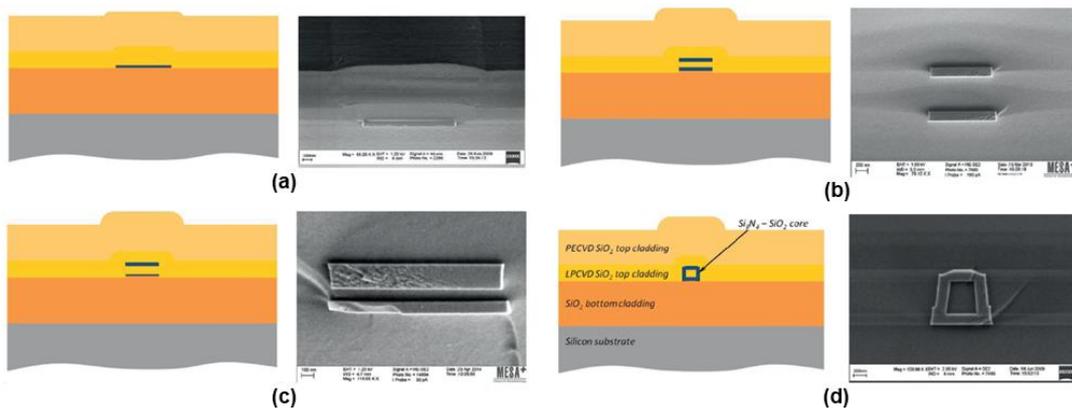


Figure 1-32 Géométries transversales de guides d'onde Si_3N_4 visant des propriétés spécifiques (optimisés à $\lambda = 1550$ nm) et développés par la compagnie LioniX, a) guide *single strip*, b) guide *double strip*, c) guide *double strip* asymétrique, d) guide *box*.

À la **Figure 1-32**, le guide *single strip* a une épaisseur de 25 nm et une largeur minimale de 1 μm (dimensionnement optimisé pour le spectre visible). Il est conçu pour avoir de très faibles pertes de propagation. Des pertes de propagation de -0.03 dB/cm ont été atteintes pour un rayon de courbure $R = 2000$ μm à $\lambda = 1.55$ μm [63]. Ces faibles pertes de propagation sont atteignables au détriment des pertes de courbure. Généralement en photonique intégrée le canal dans lequel se propage le signal (guide d'onde) ne peut pas tourner spontanément (ex : angle droit de 90 deg) comme en électronique (fil métallique). La rotation doit s'effectuer graduellement afin d'éviter que le mode ne cesse d'être guidé dans le circuit (perte de signal).

Le guide *double strip* permet de faibles pertes de propagation tout en réduisant le rayon de courbure [47]. Cette géométrie trouve des applications dans les réseaux optiques à filtrage spatial (OBFN, *Optical Beam-Forming Networks*, en anglais), notamment pour des OPA (*Optical Phased Array*).

Les deux couches formant le guide *double strip* peuvent être différentes. C'est le cas du guide *double strip* asymétrique. La couche la plus mince (couche du bas) est utilisée pour le couplage vers des composants externes (ex : fibres optiques) tandis que la couche plus épaisse (haut) est utilisée pour obtenir des rayons de courbures plus faibles.

Le guide *box* est notamment utilisé pour des applications en télécommunications. Sa forme symétrique le rend moins dépendant en polarisation.

Des circuits peuvent être une combinaison de différents guides pour tirer profit de leurs propriétés respectives. Par exemple, pour réduire les pertes de propagation et l'erreur de phase, Shin *et al.* [66] utilisent des guides élargis à 1 μm (guides multimodes à $\lambda = 488$ nm). Cela permet de réduire la diffusion par la rugosité de surface des flancs dans les guides droits. La largeur des guides est graduellement réduite à 300 nm à l'aide de *tapers* avant d'atteindre les zones où les guides sont courbés (propagation monomode) ce qui évite la conversion vers des modes d'ordre supérieur.

1.1.4.4 Applications de la photonique intégrée visible

La photonique intégrée à base de Si_3N_4 a de nombreuses applications. Leur grande variété provient notamment du domaine spectral très large dans lequel ce matériau peut guider la lumière. Dans notre cas, nous nous intéressons surtout aux circuits photoniques linéaires du spectre visible.

L'un des domaines d'application les plus connus est celui des OPAs. Les OPA sont utilisés pour les LIDARs des véhicules autonomes, l'holographie 3D (ex : systèmes de projection pour la réalité augmentée) et les communications optiques VLC (*Visible Light Communication*) dans l'espace libre [67][68].

Un exemple d'OPA en Si_3N_4 à $\lambda = 635 \text{ nm}$ tiré de C. V. Poulton *et al.* [69] est montré à la **Figure 1-33**. La taille de la zone émissive est de $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ et la largeur angulaire du faisceau obtenu est de $0.064^\circ \times 0.074^\circ$. Le circuit présenté a une grande densité de composants – un aspect important dans le projet de thèse.

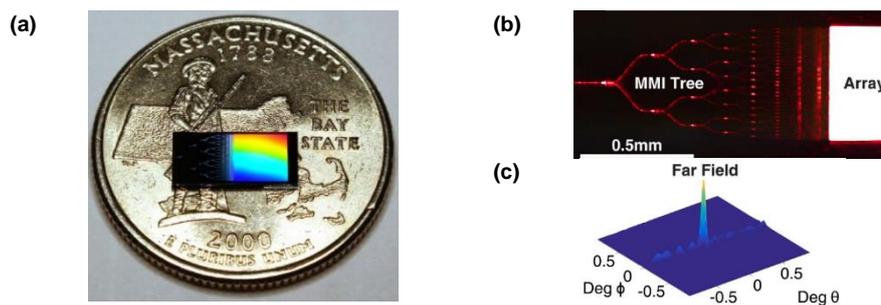


Figure 1-33 OPA en Si_3N_4 à $\lambda = 635 \text{ nm}$, a) taille comparée à une pièce de monnaie, b) observation de la distribution de lumière vers le réseau d'antennes de l'OPA, c) émission du signal en champ lointain.

Shin *et al.* [66] démontrent une architecture compacte de PIC pour un OPA à $\lambda = 488 \text{ nm}$. Leur architecture originale comprend un espacement irrégulier entre les réseaux de diffraction d'un OPA tel que montré à la **Figure 1-34**. Cela permet le contrôle de la direction d'émission d'un faisceau sur un champ angulaire (FOV, *Field-Of-View* en anglais) de 50° sans utilisation de pièces mécaniques. Ce FOV est beaucoup plus large que celui obtenu par des réseaux régulièrement espacés (1.8°). L'utilisation d'aléatoire dans le circuit PIC est un concept également utilisé dans notre projet de projection rétinienne.

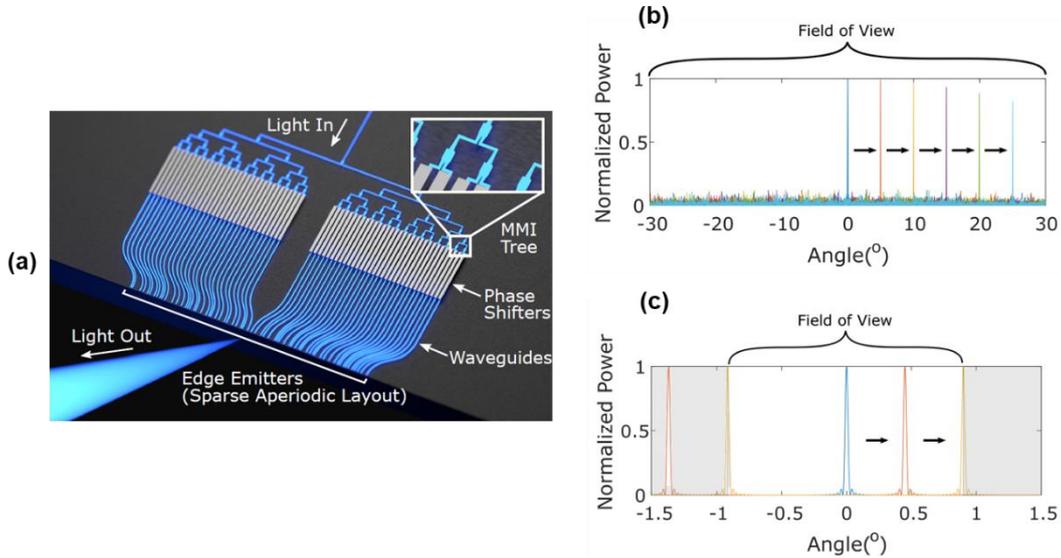


Figure 1-34 OPA avec des réseaux de diffraction (i.e. points d'émission) distants aléatoirement, a) représentation du PIC, b) FOV élevé obtenu avec des réseaux distribués aléatoirement, c) FOV limité obtenu lorsque les réseaux sont régulièrement espacés.

La photonique intégrée utilisant le Si_3N_4 trouve d'autres applications dans les systèmes quantiques et les ordinateurs neuromorphiques (i.e. inspirés des réseaux neuronaux comme chez l'humain) [70]. Chiles *et al.* démontrent un exemple d'architecture de circuit photonique en Si_3N_4 pour des applications de calcul neuronal, tel que présenté à la **Figure 1-35**. Son circuit compact a une architecture multicouche.

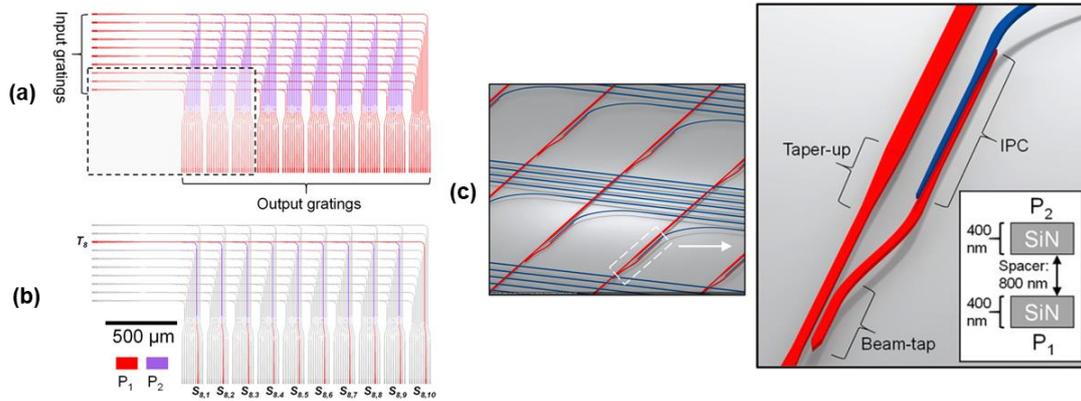


Figure 1-35 Architecture de circuit photonique Si_3N_4 multicouche pour le calcul neuronal, a) ensemble du circuit alimenté (les deux couches sont distinctes par les couleurs rouge et mauve), b) un seul guide principal allumé connecté à 10 sorties, c) détail sur le coupleur multicouche.

Plusieurs applications pour les capteurs et les détecteurs biologiques existent en photonique intégrée pour le spectre du visible au proche IR (400-950 nm). Dans ce cas, le spectre visible est d'intérêt particulier car il ne cause qu'un faible dommage aux cellules vivantes. La lumière est faiblement absorbée par l'eau – une substance récurrente dans l'ensemble du vivant. De plus, les capteurs basés sur le silicium sont hautement sensibles à ce spectre particulier [48][71].

Les applications en biophotonique utilisent les techniques de microscopie, de fluorescence, de spectroscopie et d'absorption dans le spectre visible [47][50][72]. Cela permet de faire des laboratoires sur puce (*lab-on-a-chip* en anglais). La transparence du Si_3N_4 et de son encapsulant (SiO_2) dans ce domaine spectral évite qu'ils ne perturbent ces techniques de mesure.

Un exemple d'applications en biophotonique est la tomographie en cohérence optique (OCT, *Optical Coherence Tomography*) [47]. C'est une technique d'imagerie non-invasive qui permet d'obtenir des vues 3D par des coupes tomographiques de microstructures biologiques in vivo. Cette technique est comparable à l'imagerie par ultrasons. Toutefois, ici ce sont les ondes optiques plutôt que les ondes sonores qui sont utilisées. La résolution de l'OCT peut atteindre le micromètre (1-2 ordres de grandeur plus précis que les ultrasons). L'OCT peut imager jusqu'à une profondeur de 2 cm [73].

Wörhoff *et al.* [63] décrit un capteur biologique utilisant l'interaction entre le champ évanescent d'un guide d'onde et le milieu étudié, tel que représenté à la **Figure 1-36**. Les propriétés chimiques de l'élément étudié vont modifier les propriétés de propagation dans le circuit photonique adjacent.

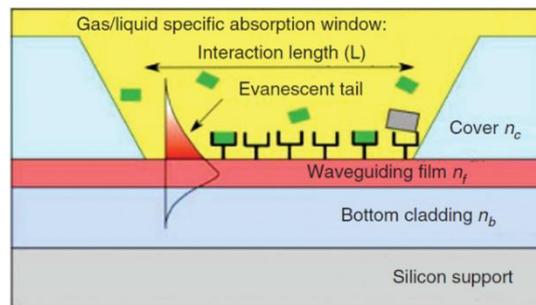


Figure 1-36 Capteur biologique où le champ évanescent du guide d'onde interagit avec les éléments chimiques à étudier.

1.2 Objectifs de thèse

1.2.1 Objectifs généraux

Le concept de projection rétinienne du CEA-LETI nécessite le développement de deux blocs technologiques majeurs : le circuit PIC à longueur d'onde visible et la partie holographique.

L'holographie analogique est une technologie déjà existante. Toutefois, l'utilisation d'hologrammes dans notre projet nécessite de maîtriser leur technique de dépôt, d'enregistrement et de lecture sur des circuits photoniques micrométriques. L'hologramme doit être compatible pour une utilisation à notre longueur d'onde spécifique. De plus, l'enregistrement de milliers d'hologrammes micrométriques uniques (i.e. pixels holographiques) nécessite le développement d'une imprimante holographique de haute précision. Ces travaux de recherche et développement ont été entamés en parallèle de la thèse par d'autres membres de l'équipe.

La thèse se concentre sur le deuxième bloc technologique majeur du projet : le circuit PIC visible.

Le CEA-LETI a une longue expérience en recherche et développement de circuits intégrés pour la microélectronique. L'institut possède de vastes infrastructures de salles blanches pour leur fabrication. De plus, le département d'optique du CEA-LETI a une forte expérience dans la conception, la fabrication et la caractérisation de circuits photoniques intégrés compatibles

CMOS à base de Si et de Si₃N₄. La fabrication de ces circuits réutilise les installations initialement dévouées à la fabrication de circuits microélectroniques.

Plusieurs projets de l'institut visaient la fabrication de PIC visibles pour des applications biophotoniques. Toutefois, au moment de débiter la thèse, il n'y avait pas de bibliothèque de composants passifs pour le développement de PIC à $\lambda = 532$ nm.

Les composants d'un PIC sont très sensibles en longueur d'onde. Leurs dimensionnements doivent être ajustés à leur longueur de fonctionnement exacte pour leur assurer une efficacité maximale (pertes optiques minimales, composants monomodes etc.).

De plus, les publications scientifiques dans la littérature traitent peu de PICs dans la partie verte du spectre visible. Il n'y avait donc pas beaucoup de références de composants photoniques intégrés existants sur lesquels se baser pour développer le PIC de notre projet. Seulement quelques articles montrent le dimensionnement de guides dans le vert (autour de $\lambda = 532$ nm) ^{[50],[74]-[77]}.

Cela nous a contraint à développer notre propre gamme de composants PIC à $\lambda = 532$ nm en se basant sur l'équipement et les procédés du CEA-LETI. Les quelques publications portant sur des composants photoniques à notre longueur d'onde ont servi à estimer des dimensionnements pour certains de nos composants. Elles servent aussi de base de comparaison pour valider l'efficacité de nos composants.

Les objectifs principaux de la thèse sont donc les suivants :

- Dans un premier temps, la thèse vise à concevoir les briques de base du PIC à $\lambda = 532$ nm (modélisation et simulation, fabrication et caractérisation). Une fois que le fonctionnement expérimental de ceux-ci sera validé, ces briques de base serviront à l'élaboration de circuits photoniques complets permettant de mettre au point un prototype de projection rétinienne.
- Montage d'un banc de caractérisation pour étudier les circuits photoniques fabriqués. Il doit notamment pouvoir en étudier les propriétés angulaires.
- Proposer une première architecture de distribution dense de guides d'onde et analyser ses performances de propagation.
- Étudier l'interaction « guide d'onde – hologramme » pour des guides micrométriques afin de valider la capacité d'un hologramme à changer les propriétés d'émission d'un point d'émission à cette petite échelle.
- Évaluation des contraintes du projet de projection rétinienne en fonction de la conception du PIC (architecture du circuit, taille minimale des composants...). Cela servira à déterminer ce qui est possible ou non de faire pour la suite du projet.
- Proposer et fabriquer une architecture réaliste pour adresser les DPEs aléatoires à partir du PIC.
L'architecture de l'adressage ligne-colonne du circuit prime par rapport à la conception d'une distribution aléatoire des PEs du circuit. Dans un premier temps, on vise surtout à faire le circuit de la **Figure 1-26 (a)** (distribution quasi-aléatoire), ou des guides ayant des courbes simples (formes sinusoïdales).

L'objectif final de la thèse est de fournir une preuve de concept expérimentale du projecteur rétinien. Le prototype doit être constitué d'un circuit PIC ayant quelques dizaines de points d'émission interagissant avec des hologrammes pour afficher une image simple de quelques

pixels (ex : une lettre « T » ou le nom « LETI »). L'affichage se fera de façon passive et la source de lumière sera un laser externe. Cet objectif est représenté par une vue d'artiste à la **Figure 1-37**.

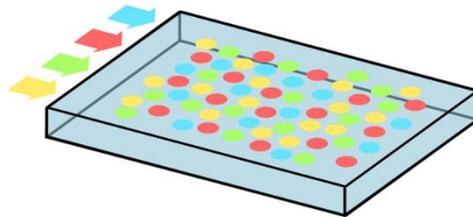


Figure 1-37 Vue d'artiste de l'objectif final de thèse. Plusieurs distributions de points d'émission (représentées par différentes couleurs) formant des pixels image sur la rétine.

La thèse est donc une première étape au développement du projet de lunettes RA de projection rétinienne du CEA-LETI. Ce projet a des objectifs et des contraintes initiales qui vont au-delà de ceux de la thèse. Toutefois, certaines contraintes du projet guident le travail de conception du PIC pendant la thèse :

- On vise à obtenir un circuit PIC le plus compact possible. Cela permettra d'avoir une plus grande densité de points d'émission à la surface du verre de lunette, et donc une meilleure qualité d'image (i.e. une plus grande résolution ou une réduction du bruit de fond de chaque pixel rétinien).
- Le projecteur rétinien est monochromatique à $\lambda = 532$ nm (vert, pic de sensibilité des hologrammes et proche de celui de l'œil humain).
- Le PIC doit être transparent.
- Fabrication du circuit simple et répétable.

Au niveau de la thèse, plusieurs éléments seront négligés dans la conception des premiers PICs :

- Interfaçage dynamique des guides d'onde et des hologrammes (ex : commutateurs thermo / électro-optiques, cristaux liquides).
- L'intégration des sources laser sur les puces photoniques. Dans le cadre de la thèse, on aura uniquement recours à des lasers macroscopiques classiques (couplage du signal dans les circuits à l'aide de fibres optiques).

Finalement, les concepts d'*eye box*, d'*eye tracking* et l'utilisation de capteurs pour les lunettes RA ne sont pas abordés dans ce début de projet de lunette RA.

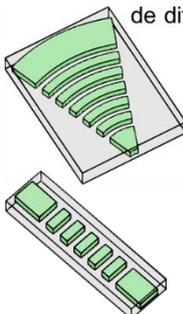
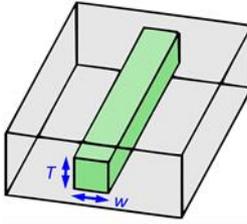
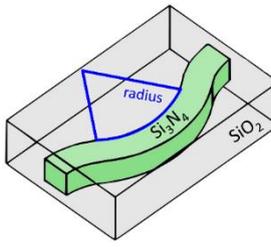
1.2.2 Objectifs des masques de photolithographie

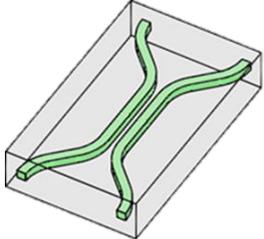
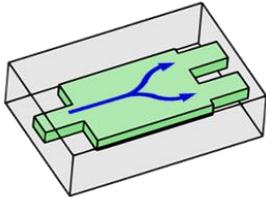
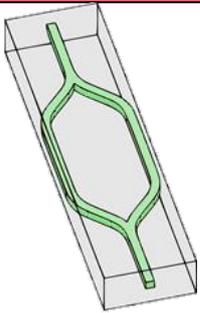
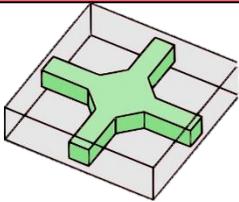
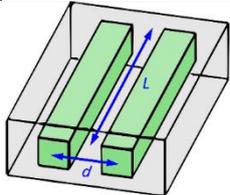
Le développement de 2 masques de photolithographie (i.e. 2 lots) ont été prévus pour la thèse. Chaque masque permet la fabrication de plusieurs circuits photoniques ayant des sous-objectifs précis. Ceux-ci permettent de répondre aux objectifs principaux décrits précédemment.

1.2.2.1 Étude des briques de base (lot 1)

Le premier masque de photolithographie envisagé correspond au lot 1. Il vise à fabriquer et valider expérimentalement le fonctionnement des composants photoniques de base. Ces composants sont initialement modélisés et simulés analytiquement et numériquement. Ces composants de base sont détaillés au **Tableau 1-1**.

Tableau 1-1 Composants de base du circuit de photonique intégrée du lot 1

Circuit complet	Insertion & extraction de signal dans le circuit	<p>Réseaux de diffraction</p> <p>Coupleur par réseau de diffraction</p>  <p>Réseau de diffraction</p>	<p>Sert à coupler et à extraire le signal du circuit.</p> <p>Les réseaux de diffraction sont des composants complexes à concevoir et à fabriquer lorsqu'on souhaite qu'ils couplent très efficacement ou qu'ils émettent de façon très directive.</p> <p>On vise une efficacité de couplage standard de -3 dB pour nos réseaux de diffraction.</p>
	Transport du signal	<p>Guide d'onde droit</p> 	<p>Composant initial pour guider et transporter la lumière dans le circuit. La qualité de fabrication du composant est évaluée en grande partie par ses pertes de propagation en dB/cm.</p> <p>On vise des pertes inférieures à -1 dB/cm, ce qui correspond généralement au seuil de guides Si_3N_4 à faibles pertes retrouvé en littérature dans le spectre visible.</p> <p>Dans le cadre du projet associé à la thèse, on souhaite développer des circuits compacts. On vise donc le développement de guides d'onde monomodes <i>strip</i>. Ils permettent un fort confinement du mode, permettant de densifier les circuits photoniques. Cela correspond à une géométrie transversale de guide d'onde qui est équilibrée entre les pertes de propagation et les pertes de courbure. Le mode fondamental est également le mode avec le meilleur facteur de confinement en puissance dans un guide d'onde [78]. De plus, la présence d'un seul mode permet de mieux contrôler la propagation du signal dans le circuit, notamment au niveau de sa phase.</p> <p>Également, l'architecture de guide d'onde rectangulaire <i>strip</i> est simple. Elle permet de mieux étudier les conditions de fabrication de nos circuits et nécessite peu d'étapes de fabrication (et donc réduit le coût de fabrication). La thèse est la première pour le développement de PIC à $\lambda = 532 \text{ nm}$ au sein du CEA-LETI. Puisque l'architecture du circuit n'est qu'à son début, tenter de concevoir des guides d'onde avec une géométrie plus complexe pour des applications spécifiques ne semble pas pertinent dans la première itération de conception.</p>
		<p>Guide d'onde courbe</p> 	<p>Nécessaire pour développer le circuit en 2D. Les pertes de courbure doivent être minimisées tout en ayant un rayon de courbure le plus petit possible pour maximiser la compacité du circuit.</p>

Circuit complet	Division & combinaison de signal	Coupleur directionnel 3 dB	 <p>Sert à diviser en deux parties égales le signal d'un guide d'onde vers 2 guides d'onde en sortie. Cela permet notamment de coupler la lumière dans plusieurs guides en ayant un nombre de sources de lumière limité. La bonne qualité de conception et de fabrication est validée lorsque la proportion dans chacune des sorties du coupleur 3 dB correspond bien à 50/50 ($\pm 1\%$, seuil auto-défini), et qu'il n'y a pas de déséquilibre (ex : 60/40).</p>
		MMI 1 → 2	 <p>Comme le coupleur 3 dB, le coupleur MMI (<i>MultiMode Interference</i>) divise le signal en plusieurs parties égales. Cela peut être en 2, 4 ou 8 parties etc. Dans le cadre du projet, nous nous limiterons à un MMI 1 vers 2. Le principe du MMI se base sur le principe d'auto-imagerie (<i>self-imaging</i>) [79]. Le MMI a un fonctionnement moins sensible aux erreurs de fabrication que le coupleur 3 dB. De plus, ce composant est plus compact que le coupleur 3 dB. La validation du fonctionnement du MMI repose notamment sur les pertes du composant. On vise des pertes de -0.1 dB/MMI.</p>
	Modulation du signal	Interféromètre de Mach-Zehnder (MZI)	 <p>Les MZIs permettent d'obtenir l'indice effectif (n_{eff}) des guides d'onde de nos circuits. Cela sert notamment à valider les dimensionnements des guides d'onde et les indices des couches de matériau du circuit. Dans un deuxième temps, la connaissance expérimentale du n_{eff} permettra d'augmenter la précision de nos simulations numériques. Un MZI peut servir de commutateur optique, par exemple s'il est combiné à un élément chauffant sur l'un de ses bras (effet thermo-électrique).</p>
		Croisement de guides d'onde	 <p>La conception d'un réseau de guides d'onde compact monocouche va nécessiter des croisements entre les guides d'onde. Les pertes aux croisements doivent donc être étudiées afin de les minimiser.</p>
	Autres	Couplage entre guides d'onde	 <p>Permet de valider une distance minimale inter-guides qui soit suffisante pour que les signaux guidés dans des guides d'onde adjacents n'interfèrent pas entre eux. Cette distance de séparation doit être suffisante pour éviter les effets de couplage entre des guides d'onde rapprochés sur une longueur qui s'étend jusqu'à plusieurs millimètres de long. En contrepartie, on cherche à réduire au minimum cette distance pour maximiser la compacité du circuit. Cette distance est notamment limitée par le pas entre les points d'émission, i.e. $\sim 5 \mu\text{m}$.</p>

Le lot 1 permet de fabriquer tous les composants de base sur de petits circuits photoniques individuels qu'on appelle « structures de test ». La structure de test de chaque composant est répliquée en plusieurs variantes ayant des paramètres différents. Par exemple, une structure

de test peut être répliquée pour des MMIs de différentes longueurs. Cela permet de trouver le dimensionnement exact pour le fonctionnement optimal de chaque composant. De plus, chaque composant est testé selon plusieurs épaisseurs de circuit (couche de Si₃N₄).

Les composants de base peuvent être combinés pour la conception de circuits complexes lorsque leur fonctionnement et leur dimensionnement sont validés expérimentalement. Le lot 1 représente donc la première étape avant la conception d'un PIC complet ayant un but applicatif pour le projet.

Quelques circuits plus complexes sont fabriqués dans le lot 1. Ces circuits permettront de valider notre capacité à assembler un grand nombre de composants photoniques individuels en un circuit complexe fonctionnel. Il s'agit de réseaux de guides d'onde qui combinent plusieurs briques de base : réseau de diffraction, guides d'onde droits et courbes, MMIs et réseaux de diffraction gravés partiellement. Ils sont utilisés pour assembler jusqu'à 1024 guides d'onde parallèles. Le fonctionnement de ces grands circuits est validé si la lumière est correctement guidée et uniformément distribuée à la fin de l'ensemble des guides du réseau. Ceux-ci se terminent par des réseaux de diffraction permettant d'observer ces signaux.

Les circuits du lot 1 serviront aussi à déterminer les contraintes de dimensionnement et de fabrication pour la suite du projet.

Les objectifs secondaires du lot 1 sont également :

- Tester et valider les procédés de fabrication du CEA-LETI pour la fabrication de circuits en Si₃N₄ à $\lambda = 532$ nm.
- Évaluer expérimentalement l'indice effectif des guides d'onde pour affiner les futures simulations de dimensionnement. L'indice peut être déterminé à l'aide des MZIs.
- Déterminer les besoins et maîtriser les outils existants pour la caractérisation des PICs dans le cadre de notre projet.

1.2.2.2 *Étude de l'interaction « guide d'onde – hologramme » (lot 2)*

L'étude de l'interaction « guide d'onde – hologramme » nécessite un circuit transparent. Les circuits du lot 1 sont déposés sur un substrat opaque standard (substrat Si). Ils ne sont donc pas conçus pour étudier les hologrammes.

La mise en transparence des substrats des circuits photoniques doit être planifiée en amont de leur fabrication et nécessite davantage d'étapes de fabrication. Cela engendre un délai de livraison des échantillons et complexifie leur fabrication. Puisque le lot 1 représente un premier test, nous avons décidé de faire au plus simple et de réserver la mise en transparence du substrat à un second circuit.

De plus, le travail pour maîtriser les procédés d'enregistrement et de lecture des hologrammes du projet sont entamés en même temps que le développement du lot 1. Ces travaux sont gérés indépendamment du développement des PICs par d'autres membres de l'équipe de recherche.

Le second circuit (lot 2) vise spécifiquement à tester l'interaction « guide d'onde – hologramme » sur un substrat transparent. Il comportera des réseaux de guides d'onde s'étalant sur une large surface, permettant de faciliter le dépôt de résine holographique à leur surface.

L'interaction guide d'onde – hologramme doit être étudiée sur plusieurs points :

- Pertes optiques à l'interface « guide d'onde – hologramme ».
- Directivité de l'hologramme.
- Capacité de l'hologramme à faire interférer constructivement plusieurs points d'émission le long du PIC. Cette capacité est nécessaire pour l'effet d'auto-focalisation du concept de projection rétinienne.
- Impact du bruit du PIC (pertes le long des guides etc.) sur l'efficacité d'enregistrement de l'hologramme.

Les objectifs des circuits du lot 2 sont également:

- Tester et valider les procédés de fabrication du CEA-LETI pour la mise en transparence du substrat d'un PIC.
- Réussir à projeter une image rétinienne d'une dizaine de pixels (objectif final de thèse).
- Tester expérimentalement le fonctionnement d'un composant additionnel : le coupleur par la tranche. Celui-ci nécessite une conception spéciale et plus complexe dans le spectre visible.
Il permettra de coupler la lumière de sources externes dans le cadre de démonstrateurs, où le couplage par réseau est moins pratique. Il peut également servir à injecter plus facilement de grandes puissances laser dans l'échantillon par rapport aux coupleurs par réseau de diffraction. Cette forte puissance est utile pour la vitesse et l'efficacité d'enregistrement des hologrammes.

1.2.2.3 *Architecture d'adressage de DPEs aléatoires*

Un troisième masque de photolithographie aura pour but de tester les premières architectures d'adressage des DPEs aléatoires.

La conception de ce masque se base sur la validation du fonctionnement des briques de base testées sur le lot 1. Il pourrait permettre de tester de nouvelles briques plus complexes tels que les coupleurs adiabatiques multicouches et les anneaux de résonance.

Les coupleurs adiabatiques permettront d'effectuer plusieurs niveaux de circuits. Cela servira à augmenter la compacité du dispositif. De plus, cela lui fournira une flexibilité supérieure pour pouvoir adresser les DPEs aléatoires nécessitant un circuit complexe.

Enfin, les anneaux de résonance peuvent servir de commutateurs actifs pour la distribution du signal dans le circuit. Ceux-ci peuvent être plus compacts que les interféromètres de Mach-Zehnder.

Ce troisième lot vise également à la conception du premier prototype afin de valider expérimentalement le concept de projecteur rétinien du CEA-LETI.

Conclusion du chapitre 1

Ce premier chapitre a permis de présenter le contexte et les objectifs de la thèse. Les notions générales autour de la réalité augmentée et des concepts associés tels que la réalité mixte et virtuelle ont d'abord été présentées. Les principes de fonctionnement de plusieurs types de lunettes RA ont ensuite été succinctement décrits. Le nouveau concept de projecteur rétinien du CEA-LETI auquel cette thèse se rattache a ensuite été détaillé.

Ce chapitre a également introduit des notions en photonique intégrée spécifiques au contexte du projet de projecteur rétinien, notamment sur les propriétés du Si_3N_4 permettant de guider la lumière visible et les applications associées à la photonique intégrée visible.

Enfin, les objectifs et les contraintes de cette thèse ont été détaillés. Les objectifs généraux de la thèse doivent être atteints à l'aide des objectifs spécifiques associés à différents lots de circuits photoniques. Notamment, le premier lot doit permettre d'établir une bibliothèque de composants photoniques de base pour la création du circuit photonique applicatif du projet. Le second lot doit permettre l'étude de l'interaction « guide d'onde – hologramme ». Un troisième lot aura pour but de tester les premières architectures d'adressage des DPEs aléatoires et de viser la conception du premier prototype afin de valider expérimentalement le concept de projecteur rétinien du CEA-LETI.

Références

- [1] B. C. Kress and W. J. Cummings, "11-1: Invited Paper: Towards the Ultimate Mixed Reality Experience: HoloLens Display Architecture Choices," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 48, no. 1, pp. 127–131, 2017, doi: 10.1002/sdtp.11586.
- [2] H.-L. Chi, S.-C. Kang, and X. Wang, "Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction," *Automation in Construction*, vol. 33, pp. 116–122, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2012.12.017.
- [3] P. Coni, N. Damamme, and J. Bardon, "The Future of Holographic Head-Up Display," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 68–73, Sep. 2019, doi: 10.1109/MCE.2019.2923935.
- [4] Google Inc., "Glass." <https://www.google.com/glass/start/> (accessed Apr. 04, 2020).
- [5] T. Oku et al., "High-luminance see-through eyewear display with novel volume hologram waveguide technology," presented at the *Digest of Technical Papers - SID International Symposium*, 2015, vol. 46, pp. 192–195.
- [6] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks, "Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," *J Vis*, vol. 8, no. 3, pp. 33.1–3330, Mar. 2008, doi: 10.1167/8.3.33.
- [7] M. E. C. Santos, A. Chen, T. Taketomi, G. Yamamoto, J. Miyazaki, and H. Kato, "Augmented Reality Learning Experiences: Survey of Prototype Design and Evaluation," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 38–56, Jan. 2014, doi: 10.1109/TLT.2013.37.
- [8] W. S. Khor, B. Baker, K. Amin, A. Chan, K. Patel, and J. Wong, "Augmented and virtual reality in surgery—the digital surgical environment: applications, limitations and legal pitfalls," *Ann Transl Med*, vol. 4, no. 23, Dec. 2016, doi: 10.21037/atm.2016.12.23.
- [9] N. Cui, P. Kharel, and V. Gruev, "Augmented reality with Microsoft HoloLens holograms for near infrared fluorescence based image guided surgery," in *Molecular-Guided Surgery: Molecules, Devices, and Applications III*, Feb. 2017, vol. 10049, p. 1004901, doi: 10.1117/12.2251625.
- [10] S. K. Ong, M. L. Yuan, and A. Y. C. Nee, "Augmented reality applications in manufacturing: a survey," *International Journal of Production Research*, vol. 46, no. 10, pp. 2707–2742, May 2008, doi: 10.1080/00207540601064773.
- [11] S. W. Lawson, J. R. G. Pretlove, A. C. Wheeler, and G. A. Parker, "Augmented Reality As a Tool to Aid the Telerobotic Exploration and Characterization of Remote Environments," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 11, no. 4, pp. 352–367, Aug. 2002, doi: 10.1162/105474602760204273.
- [12] T. Ronald, "Azuma A Survey of Augmented Reality," 1997.
- [13] A. Maimone, A. Georgiou, and J. S. Kollin, "Holographic Near-eye Displays for Virtual and Augmented Reality," *ACM Trans. Graph.*, vol. 36, no. 4, pp. 85:1–85:16, Jul. 2017, doi: 10.1145/3072959.3073624.
- [14] D. Fattal et al., "A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display," *Nature*, vol. 495, no. 7441, pp. 348–351, Mar. 2013, doi: 10.1038/nature11972.
- [15] C. Martinez, V. Krotov, B. Meynard, and D. Fowler, "See-through holographic retinal projection display concept," *Optica*, *OPTICA*, vol. 5, no. 10, pp. 1200–1209, Oct. 2018, doi: 10.1364/OPTICA.5.001200.
- [16] "Microoled, the smallest AMOLED microdisplay in the world!" <https://www.microoled.net/> (accessed Sep. 17, 2020).
- [17] L. Xia et al., "A green-color portable waveguide eyewear display system," in *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Optical Storage and Display Technology*, Aug. 2013, vol. 8913, p. 89130W, doi: 10.1117/12.2034767.
- [18] S.-B. Kim and J.-H. Park, "Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyepiece," *Optics Letters*, vol. 43, no. 4, pp. 767–770, 2018, doi: 10.1364/OL.43.000767.
- [19] T. Yoshida et al., "A plastic holographic waveguide combiner for light-weight and highly-transparent augmented reality glasses," *Journal of the Society for Information Display*, vol. 26, no. 5, pp. 280–286, 2018, doi: 10.1002/jsid.659.
- [20] C. Jang, K. Bang, J. Kim, Y. Jeong, and B. Lee, "Full color virtual retinal display using a holographic optical element," in *Imaging and Applied Optics 2017 (3D, AIO, COSI, IS, MATH, pcAOP) (2017)*, paper JTU5A.32, Jun. 2017, p. JTU5A.32, doi: 10.1364/3D.2017.JTU5A.32.
- [21] R.-H. Li, M.-W. Kang, Y. Gao, Y. Xie, and G.-X. Xiang, "Optimized design of single-plate full-color holographic waveguide display," presented at the *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2019, vol. 10841, doi: 10.1117/12.2506341.

- [22] Mukawa Hiroshi et al., "A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms," *Journal of the Society for Information Display*, vol. 17, no. 3, pp. 185–193, Jun. 2012, doi: 10.1889/JSID17.3.185.
- [23] B. J. Thompson, "Applications of holography," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 41, no. 5, pp. 633–674, May 1978, doi: 10.1088/0034-4885/41/5/001.
- [24] F.-K. Bruder, T. Fäcke, and T. Rölle, "The Chemistry and Physics of Bayfol® HX Film Holographic Photopolymer," *Polymers*, vol. 9, no. 10, p. 472, Oct. 2017, doi: 10.3390/polym9100472.
- [25] C. Jang et al., "Recent progress in see-through three-dimensional displays using holographic optical elements [Invited]," *Appl. Opt.*, AO, vol. 55, no. 3, pp. A71–A85, Jan. 2016, doi: 10.1364/AO.55.000A71.
- [26] Z. Diao et al., "Electrically tunable holographic waveguide display based on holographic polymer dispersed liquid crystal grating," *Chin. Opt. Lett.*, COL, vol. 17, no. 1, p. 012301, Jan. 2019.
- [27] K. Akutsu et al., "A compact retinal scan near-eye display | ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies." <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3305367.3327977> (accessed Jan. 13, 2020).
- [28] C. Jang, K. Bang, S. Moon, J. Kim, S. Lee, and B. Lee, "Retinal 3D: Augmented Reality Near-eye Display via Pupil-tracked Light Field Projection on Retina," *ACM Trans. Graph.*, vol. 36, no. 6, pp. 190:1–190:13, Nov. 2017, doi: 10.1145/3130800.3130889.
- [29] A. Maimone, D. Lanman, K. Rathinavel, K. Keller, D. Luebke, and H. Fuchs, "Pinlight Displays: Wide Field of View Augmented Reality Eyeglasses Using Defocused Point Light Sources," *ACM Trans. Graph.*, vol. 33, no. 4, pp. 89:1–89:11, Jul. 2014, doi: 10.1145/2601097.2601141.
- [30] Z. Huang, D. L. Marks, and D. R. Smith, "Out-of-plane computer-generated multicolor waveguide holography," *Optica*, OPTICA, vol. 6, no. 2, pp. 119–124, Feb. 2019, doi: 10.1364/OPTICA.6.000119.
- [31] J. Backlund, J. Bengtsson, and A. Larsson, "Waveguide hologram for outcoupling and simultaneous focusing into multiple arbitrary positions," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 9, pp. 1286–1288, 1998, doi: 10.1109/68.705618.
- [32] J. Zhou, J. Sun, A. Yaacobi, C. V. Poulton, and M. R. Watts, "Design of 3D Hologram Emitting Optical Phased Arrays," in *Advanced Photonics 2015* (2015), paper IT4A.7, Jun. 2015, p. IT4A.7, doi: 10.1364/IPRSN.2015.IT4A.7.
- [33] Manan Raval, Ami Yaacobi, Michael R. Watts, Jerry Zhou, Jie Sun, Christopher V. Poulton, "US20170003507A1 Apparatus and methods for augmented reality."
- [34] F. Aflatouni, B. Abiri, A. Rekhi, and A. Hajimiri, "Nanophotonic projection system," *Opt. Express*, OE, vol. 23, no. 16, pp. 21012–21022, Aug. 2015, doi: 10.1364/OE.23.021012.
- [35] J. Sun et al., "Large-Scale Silicon Photonic Circuits for Optical Phased Arrays," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 264–278, Jul. 2014, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2293316.
- [36] B. Meynard, C. Martinez, D. Fowler, and E. Molva, "SiN photonic integrated circuit designed to evaluate its interaction with a hologram for an Augmented Reality application," in *Integrated Photonics Platforms: Fundamental Research, Manufacturing and Applications*, Apr. 2020, vol. 11364, p. 113640H, doi: 10.1117/12.2554540.
- [37] C. Martinez, "Design Considerations for Holographic Retinal Projection Display," presented at the International Display Workshops Incorporated Association, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.36463/idw.2019.1469>.
- [38] B. Meynard, C. Martinez, D. Fowler, and E. Molva, "Integrated optical network design for a retinal projection concept based on single-mode Si3N4 waveguides at 532 nm," in *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXIII*, Mar. 2019, vol. 10921, p. 109210X, doi: 10.1117/12.2507252.
- [39] C. Martinez, B. Meynard, and Y. Lee, "Multiplexed pixelated hologram recording process for retinal projection device," in *Practical Holography XXXIII: Displays, Materials, and Applications*, Mar. 2019, vol. 10944, p. 109440N, doi: 10.1117/12.2507249.
- [40] B. Meynard, C. Martinez, D. Fowler, and E. Molva, "Design of Si3N4 waveguides and components to form an integrated optical network for retinal projection in thin augmented reality glasses," in *Optical Design Challenge 2019*, Feb. 2019, vol. 11040, p. 1104004, doi: 10.1117/12.2523648.
- [41] C. Martinez, V. Krotov and D. Fowler, "Holographic Recording Setup for Integrated See-Through Near-Eye Display Evaluation," in *Imaging and Applied Optics 2017 (3D, AIO, COSI, IS, MATH, pcAOP)* (2017), paper JTU5A.36, Jun. 2017, p. JTU5A.36, doi: 10.1364/3D.2017.JTU5A.36.
- [42] Vladimir Krotov, C. Martinez, and O. Haeberle, "Experimental validation of self-focusing image formation for retinal projection display." *Optics Express*, 2019.
- [43] "US Patent Image Projection device US20150370073_A1_Martinez."
- [44] R. L. Pandey Vimal, J. Pokorny, V. C. Smith, and S. K. Shevell, "Foveal cone thresholds," *Vision Research*, vol. 29, no. 1, pp. 61–78, Jan. 1989, doi: 10.1016/0042-6989(89)90174-0.

- [45] R. G. Baets, "Past, present and future of open access silicon photonics platforms (Conference Presentation)," in *Integrated Photonics Platforms: Fundamental Research, Manufacturing and Applications*, Apr. 2020, vol. 11364, p. 113641A, doi: 10.1117/12.2564233.
- [46] H. Subbaraman et al., "Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects," *Opt. Express, OE*, vol. 23, no. 3, pp. 2487–2511, Feb. 2015, doi: 10.1364/OE.23.002487.
- [47] M. A. G. Porcel et al., "Silicon nitride photonic integration for visible light applications," *Optics & Laser Technology*, vol. 112, pp. 299–306, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.optlastec.2018.10.059.
- [48] A. Rahim et al., "Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 639–649, Feb. 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2617624.
- [49] J. Chiles, S. M. Buckley, S. W. Nam, R. P. Mirin, and J. M. Shainline, "Design, fabrication, and metrology of 10×100 multi-planar integrated photonic routing manifolds for neural networks," *APL Photonics*, vol. 3, no. 10, p. 106101, Jul. 2018, doi: 10.1063/1.5039641.
- [50] A. Z. Subramanian et al., "Low-Loss Singlemode PECVD Silicon Nitride Photonic Wire Waveguides for 532-900 nm Wavelength Window Fabricated Within a CMOS Pilot Line," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 2202809–2202809, Dec. 2013, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2292698.
- [51] L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*, 1st ed. Cambridge University Press, 2015.
- [52] W. Stutius and W. Streifer, "Silicon nitride films on silicon for optical waveguides," *Appl. Opt., AO*, vol. 16, no. 12, pp. 3218–3222, Dec. 1977, doi: 10.1364/AO.16.003218.
- [53] P. Muñoz et al., "Silicon nitride photonic integration platforms for visible, near-infrared and mid-infrared applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 9, 2017, doi: 10.3390/s17092088.
- [54] N. Daldosso et al., "Comparison among various Si₃N₄ waveguide geometries grown within a CMOS fabrication pilot line," *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 7, pp. 1734–1740, Jul. 2004, doi: 10.1109/JLT.2004.831182.
- [55] A. Marinins et al., "Silicon photonics co-integrated with silicon nitride for optical phased arrays," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2019, doi: 10.7567/1347-4065/ab5b6d.
- [56] Clemens Kruckel, "Integrated Nonlinear Optics in Silicon Nitride Waveguides," 2015. https://research.chalmers.se/publication/248868/file/248868_Fulltext.pdf (accessed Sep. 03, 2018).
- [57] H. E. Dirani, "Development of high quality silicon nitride chips for integrated nonlinear photonics," phdthesis, Université de Lyon, 2019.
- [58] L. Hoffman et al., "Low Loss CMOS-Compatible PECVD Silicon Nitride Waveguides and Grating Couplers for Blue Light Optogenetic Applications," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 5, p. 2701211, Oct. 2016, doi: 10.1109/JPHOT.2016.2601782.
- [59] A. M. Jones, C. T. DeRose, A. L. Lentine, D. C. Trotter, A. L. Starbuck, and R. A. Norwood, "Ultra-low crosstalk, CMOS compatible waveguide crossings for densely integrated photonic interconnection networks," *Optics Express*, vol. 21, no. 10, pp. 12002–12013, 2013, doi: 10.1364/OE.21.012002.
- [60] R. Heidemana et al., "Large-scale integrated optics using tripleXtm waveguide technology: From UV to IR," presented at the Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2009, vol. 7221, doi: 10.1117/12.808409.
- [61] S. C. Mao, Y. L. Xu, and G. Lu, "Correspondence relation between [N-H]/[Si-H] ratio and their optical loss properties in silicon nitride thin films," in 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, May 2009, pp. 3319–3322, doi: 10.1109/ICIEA.2009.5138817.
- [62] C. Martinez, B. Hoarau, L. Chirossel, O. Jacquin, and C. Guidoux, "Advanced spectral filtering functionalities in ion-exchanged waveguides with artificial cladding gratings," *Optics Communications*, vol. 233, no. 1, pp. 97–106, Mar. 2004, doi: 10.1016/j.optcom.2004.01.031.
- [63] K. Wörhoff, R. G. Heideman, A. Leinse, and M. Hoekman, "TriPleX: a versatile dielectric photonic platform," *Advanced Optical Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 189–207, 2015, doi: 10.1515/aot-2015-0016.
- [64] C. G. H. Roeloffzen et al., "Low-Loss Si₃N₄ TriPleX Optical Waveguides: Technology and Applications Overview," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 4, pp. 1–21, Jul. 2018, doi: 10.1109/JSTQE.2018.2793945.
- [65] A. Leinse, R. G. Heideman, E. J. Klein, R. Dekker, C. G. H. Roeloffzen, and D. A. I. Marpaung, "TriPleX™ platform technology for photonic integration: Applications from UV through NIR to IR," in 2011 ICO International Conference on Information Photonics, May 2011, pp. 1–2, doi: 10.1109/ICO-IP.2011.5953782.
- [66] Min Chul Shin, "Chip-scale Blue Light Phased Array," *Optica*, 2019.

- [67] J. Notaros et al., "Integrated Optical Phased Arrays: LiDAR, Augmented Reality, and Beyond," in OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2019 (IPR, Networks, NOMA, SPPCom, PVLED) (2019), paper IM4A.2, Jul. 2019, p. IM4A.2, Accessed: Jan. 13, 2020. [Online]. Available: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=IPRSN-2019-IM4A.2>.
- [68] M. Raval, A. Yaacobi, and M. R. Watts, "Integrated visible light phased array system for autostereoscopic image projection," *Opt. Lett.*, OL, vol. 43, no. 15, pp. 3678–3681, Aug. 2018, doi: 10.1364/OL.43.003678.
- [69] C. V. Poulton et al., "Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths," *Opt. Lett.*, OL, vol. 42, no. 1, pp. 21–24, Jan. 2017, doi: 10.1364/OL.42.000021.
- [70] "AN Technology," LIGENTEC. <https://www.ligentec.com/ligentec-an-technology/> (accessed Sep. 17, 2020).
- [71] M. A. G. Porcel, I. Artundo, J. D. Domenech, D. Geuzebroek, R. Sunarto, and R. Hoofman, "Monolithic photonic integration for visible and short near-infrared wavelengths: technologies and platforms for bio and life science applications," *Advanced Optical Technologies*, vol. 7, no. 1–2, pp. 57–65, 2018, doi: 10.1515/aot-2017-0065.
- [72] J.-C. Tinguely, Ø. I. Helle, and B. S. Ahluwalia, "Silicon nitride waveguide platform for fluorescence microscopy of living cells," *Optics Express*, vol. 25, no. 22, pp. 27678–27690, 2017, doi: 10.1364/OE.25.027678.
- [73] Iñigo Artundo, "Photonic Integration: New Applications Are Visible," *Optik&Photonik*, 2017.
- [74] W. D. Sacher et al., "Visible-light silicon nitride waveguide devices and implantable neurophotonic probes on thinned 200 mm silicon wafers," *Optics Express*, vol. 27, no. 26, pp. 37400–37418, 2019, doi: 10.1364/OE.27.037400.
- [75] P. Neutens et al., "Characterization of PECVD silicon nitride photonic components at 532 and 900 nm wavelength," presented at the Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2014, vol. 9133, doi: 10.1117/12.2052119.
- [76] S. Gali, V. Raghunathan, and S. K. Selvaraja, "Visible Wavelength Photonic Integrated Circuit in Silicon Nitride Platform for On-Chip Sensing Applications," in 2019 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP), Dec. 2019, pp. 1–3, doi: 10.1109/WRAP47485.2019.9013702.
- [77] S. Gali, V. Raghunathan, and S. K. Selvaraja, "Silicon nitride waveguide platform for on-chip spectroscopy at visible and NIR wavelengths," in *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXIV*, Feb. 2020, vol. 11283, p. 112831I, doi: 10.1117/12.2545808.
- [78] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 3rd ed., vol. 2. Wiley, 2019.
- [79] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 615–627, Apr. 1995, doi: 10.1109/50.372474.

Chapitre 2

Moyens

Introduction du chapitre 2	46
2.1 Outils numériques	46
2.1.1 Méthodes de simulation	46
2.1.2 Evaluation de RSoft	47
2.1.2.1 Comparaison aux modèles analytiques et à la littérature	47
2.1.2.2 Convention de polarisation	48
2.1.3 Outils de dessin des masques de photolithographie	49
2.2 Instruments de caractérisation	49
2.2.1 Goniomètre	50
2.2.1.1 Présentation du montage du goniomètre	51
2.2.1.2 Erreur d'alignement fibre-réseau	55
2.2.1.3 Scan angulaire au goniomètre	56
2.2.1.4 Imagerie au goniomètre	57
2.2.2 Prober	58
2.2.3 Autres outils de caractérisation	60
2.3 Conception des circuits	61
2.3.1 Fabrication du lot 1	61
2.3.1.1 Dépôt des couches initiales	62
2.3.1.2 Gravure des réseaux partiels	64
2.3.1.3 Gravure totale du circuit	67
2.3.1.4 Encapsulation et observation des circuits au FIB	73
2.3.1.5 Fabrication des chaufferettes	76
2.3.2 Fabrication du lot 2	77
2.3.2.1 Fabrication du circuit (partie 1)	78
2.3.2.2 Report sur substrat transparent (partie 2)	80
2.3.2.3 Début de la fabrication du lot 2	83
2.3.3 Autres moyens de conception	84
2.4 Fonctionnement de l'hologramme	84
Conclusion du chapitre 2	87
Références	88

Introduction du chapitre 2

Dans ce second chapitre, les outils numériques et les instruments de caractérisation (*prober* et goniomètre) utilisés durant la thèse sont décrits. L'outil de caractérisation goniométrique fait l'objet d'une description détaillée car c'est un outil que j'ai conçu en très grande partie durant ma thèse. Sa conception a été orientée selon les besoins spécifiques en caractérisation du projet.

Les procédés de fabrication de chacun des lots sont ensuite détaillés, suivi de la méthode d'enregistrement et de lecture des hologrammes analogiques du projet. La fabrication du premier lot inclut de nombreux procédés qui sont réutilisés dans la fabrication des générations de circuits subséquentes. La connaissance des étapes de fabrication des circuits permet de mieux comprendre les possibilités d'architecture du circuit photonique applicatif du projet et d'effectuer les simulations numériques des composants photoniques de façon plus réaliste. Les données expérimentales des étapes de fabrication du premier lot soutiennent également l'analyse des résultats issus de la caractérisation des circuits photoniques au chapitre 3

Résultats.

2.1 Outils numériques

Le comportement de la lumière dans un composant de photonique intégrée (CPI) est décrit précisément à l'aide des équations de Maxwell. Des modèles analytiques approximatifs peuvent être dérivés de ces équations pour décrire plus facilement le comportement de certains CPIs de géométries simples. Cela permet par exemple de dimensionner approximativement des guides d'onde monomodes. Dans ce cas, des méthodes analytiques telles que celles des Indices effectifs ^{[1][2]}, de Marcatili ^{[3][4]} ou de Kumar ^[5] peuvent être utilisées.

Toutefois, lorsqu'on souhaite éviter l'utilisation des approximations – afin d'obtenir un résultat physiquement exact – ou étudier des CPIs de géométries complexes, les modèles analytiques ne sont pas suffisants. Ils sont alors complétés par des modèles de simulations numériques. Ces simulations permettent de mieux décrire le comportement physique des CPIs à l'aide de la résolution directe des équations de Maxwell dans un environnement numérique. Les principales limitations de ces méthodes de résolution sont les ressources informatiques (mémoire, cœurs de calcul...) et le temps nécessaire à l'exécution des simulations.

2.1.1 Méthodes de simulation

Dans cette thèse, les calculs analytiques sont effectués sur MATLAB. Les simulations numériques des CPIs sont effectuées à l'aide du logiciel commercial RSoft ^[6].

Le CEA-LETI possède plusieurs super-ordinateurs pour le calcul numérique intensif. Dans le cadre de cette thèse, jusqu'à 20 cœurs de calcul parallèle pouvaient être utilisés simultanément pour la résolution de simulations numériques sur RSoft. Ces cœurs sont déportés sur des serveurs de calcul Linux.

Les principales méthodes de simulation numériques utilisées dans RSoft sont FullWAVE, BeamPROP et FemSIM.

FullWAVE utilise une méthode de résolution des équations de Maxwell physiquement exacte en se basant sur la technique FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*). Cette technique calcule le champ électromagnétique à chaque position de l'environnement de simulation en fonction du temps, de l'indice de réfraction et de l'excitation électromagnétique initiale ^{[7][8]}.

La précision de la simulation dépend notamment de la taille de la maille de simulation. Celle-ci doit typiquement être inférieure d'un facteur 10 à la longueur d'onde ($< \lambda/10$) ou à la plus petite géométrie du composant simulé. FullWAVE peut simuler le comportement de la lumière dans des environnements complexes (plusieurs directions de propagation de la lumière, variations d'indices, réflexions...). Il permet également d'étudier la réponse spectrale d'un composant en une seule simulation. Les simulations FDTD sont lourdes en capacité de calcul et sont généralement limitées à de petits composants (ordre des microns à quelques dizaines de microns).

Des composants plus grands peuvent plus facilement être simulés numériquement à l'aide de BeamPROP. Cela se fait toutefois au détriment de l'exactitude physique du résultat. BeamPROP se base sur la technique FD-BPM (*Finite-Difference Beam Propagation Method*). La technique est utilisée pour résoudre des approximations de l'équation d'Helmholtz [9][10][11]. Les approximations physiques utilisées limitent généralement les simulations à une direction de propagation restreinte angulairement. Les réflexions et les effets de polarisation ne sont également généralement pas pris en compte.

La dernière méthode de simulation numérique utilisée dans RSoft est FemSIM qui utilise la FEM (*Finite-Element Method*) pour le calcul de modes dans des guides d'onde [1][12][13]. Ces différentes techniques de simulation numérique sont davantage décrites dans la littérature [14].

2.1.2 Evaluation de RSoft

2.1.2.1 Comparaison aux modèles analytiques et à la littérature

La méthode de résolution des modes FemSIM du logiciel RSoft a d'abord été validée par comparaison à des modèles analytiques et à des résultats publiés dans la littérature. FemSIM sert notamment au dimensionnement de guides d'onde. Dans notre cas, nous nous intéressons au dimensionnement de guides d'onde monomodes à notre longueur d'onde ($\lambda = 532$ nm). Ce composant représente la base de conception de l'ensemble de nos circuits photoniques.

Subramanian *et al.* [15] ont proposé un dimensionnement de guide monomode de 180 nm d'épaisseur et de 300 nm de largeur à notre longueur d'onde. Les indices de réfraction qu'ils utilisent sont de 1.93 pour le guide (Si_3N_4) et de 1.46 pour son environnement extérieur (SiO_2). Ces paramètres physiques ont été insérés dans FemSIM et dans 3 méthodes de résolution analytiques de modes (Indices effectifs, Marcatili, Kumar). Les simulations et les calculs nous permettent d'obtenir un indice effectif en fonction de la largeur du guide d'onde. Le résultat est montré à la **Figure 2-1**.

Un guide est monomode lorsque seul son mode fondamental a un indice effectif supérieur à l'indice de l'environnement ($n_{\text{environnement}} = 1.46$ dans ce cas, représenté par une ligne horizontale sur le graphique de la **Figure 2-1**). Le guide d'onde est monomode jusqu'à une largeur de ~ 320 nm selon les résultats de Subramanian *et al.* Le second mode TE (*Transverse Electric*) apparaît lorsque la largeur du guide dépasse cette valeur. On remarque qu'on obtient le même résultat à l'aide des simulations FemSIM RSoft. De plus, les courbes en polarisation TE et TM (*Transverse Magnetic*) concordent bien entre celles de l'article et du logiciel RSoft.

Quant aux modèles analytiques, on observe que les courbes des modes en polarisation TE et TM se rapprochent de celles des simulations numériques, surtout pour les modes fondamentaux (TE_0 et TM_0). Toutefois, elles perdent en précision pour les modes d'ordre supérieur. Cela nous empêche de déterminer avec précision l'épaisseur du guide à partir de laquelle il passe d'un comportement monomode à multimode. La méthode des Indices effectifs tend à surestimer l'indice effectif du guide alors que les méthodes de Marcatili et de Kumar tendent à le sous-estimer.

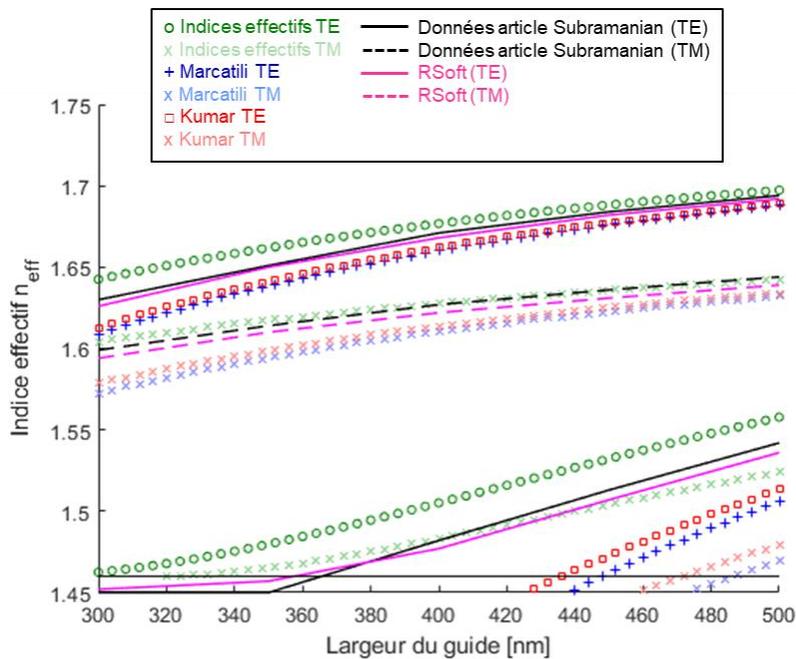


Figure 2-1 Indices effectifs pour les premiers modes en polarisation TE et TM obtenus à l'aide de méthodes analytiques (Indices effectifs, Marcatili, Kumar) en comparaison des résultats de l'article de Subramanian *et al.* et des simulations FemSIM RSoft pour un guide d'onde (épaisseur 180 nm, largeur 300-500 nm, $\lambda = 532$ nm, $n_{guide} = 1.93$, $n_{oxyde} = 1.46$).

La **Figure 2-1** illustre bien l'avantage des modèles analytiques, i.e. ils permettent de viser rapidement une valeur approximative pour le dimensionnement de composants simples en photonique intégrée. Toutefois, la figure démontre aussi les limitations en précision que peuvent présenter ces modèles et justifie l'utilisation de modèles numériques pour la conception et le dimensionnement précis de CPIs.

2.1.2.2 Convention de polarisation

Les modes se propageant dans un guide d'onde peuvent être polarisés TE (*Transverse Electric*) ou TM (*Transverse Magnetic*). Dans notre cas, nous nous intéressons principalement à la polarisation TE, à la fois car c'est la polarisation standard généralement retrouvée en littérature et également car c'est celle envisagée pour la création d'interférences (ex : pour l'interaction « guide d'onde – hologramme »). Les CPIs développés dans cette thèse sont optimisés pour la polarisation TE.

Dans le cas TE (2D), le champ électrique est transverse à la direction de propagation (i.e. le vecteur \mathbf{k}). Dans le cas de guides d'onde 3D, il n'y a pas de guide purement TE ou TM. Ils sont alors décrits comme quasi-TE ou quasi-TM. Dans les sections suivantes, les polarisations quasi-TE et quasi-TM seront sous-entendues par les termes TE et TM pour des fins de simplification.

Le logiciel RSoft considère que les modes quasi-TE sont ceux dont le champ électrique est majoritairement orienté dans la direction transverse du profil d'indice variant le moins rapidement. Pour clarifier cette définition, la **Figure 2-2** illustre deux guides d'onde identiques dont la largeur est plus grande que l'épaisseur.

A la **Figure 2-2 (a)**, on considère que l'indice varie moins rapidement sur l'axe x que sur l'axe y car le guide d'onde est plus large sur l'axe x . Dans une polarisation quasi-TE, le champ électrique est donc majoritairement orienté selon l'axe x . La situation inverse est présentée à la **Figure 2-2 (b)** pour le cas quasi-TM.

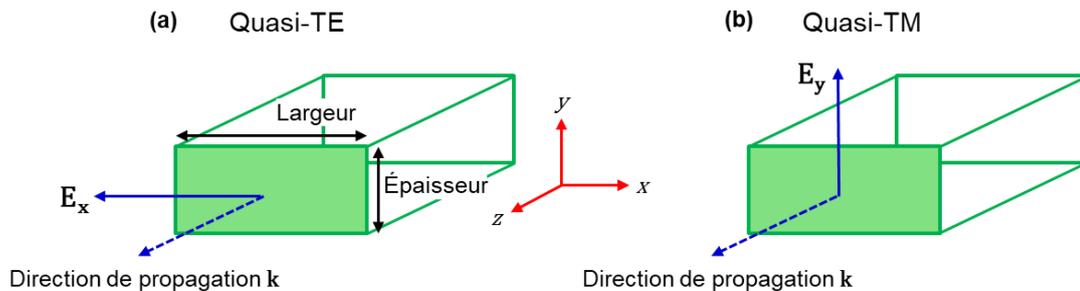


Figure 2-2 Direction principale du champ électrique dans un guide d'onde (coupe transversale) pour la polarisation a) quasi-TE, b) quasi-TM. Ces références sont basées sur les conventions utilisées par le logiciel de simulation numérique RSoft.

2.1.3 Outils de dessin des masques de photolithographie

Les composants de photonique intégrée peuvent être fabriqués après avoir été simulés et dimensionnés. Leur fabrication nécessite un plan sur lequel sont dessinés les circuits. Ce plan peut ensuite être répliqué sur un masque de photolithographie. Le plan peut comporter plusieurs couches de dessin. Chaque couche représente un niveau du circuit.

Le CEA-LETI possède une bibliothèque de fonctions MATLAB qui permettent de dessiner la forme de composants prédéfinis : guides d'onde (droits, courbes...), MMIs, réseaux de couplage etc. Les variables d'entrée de chaque fonction permettent de modifier le dimensionnement de ces composants rapidement pour les adapter à ceux définis lors de l'étape de conception et de simulation.

Les dessins des composants individuels peuvent ensuite être assemblés pour former le plan d'un ou plusieurs circuits complexes (à l'image d'un assemblage de plusieurs blocs de base consécutifs). Le plan final est fourni sous un format .CIF (*Caltech Intermediate Form*) répandu dans le domaine du dessin de circuits intégrés. Ce format permet notamment d'observer et de modifier le plan manuellement à l'aide du logiciel Klayout.

Une fois que le plan est complété, celui-ci est envoyé à un laboratoire tiers (LMDK, Laboratoire Masques et Design Kits) qui en effectue la vérification automatique. Cela inclut la vérification du respect des dimensionnements minimaux des composants par rapport aux limites connues des machines de fabrication. Le LMDK rajoute également au plan les marques d'alignement nécessaires à la manipulation des masques de photolithographie par les machines de fabrication en salle blanche. Également, il insère sur le plan des carrés d'aplanissement (*dummies* en anglais) entre les composants intégrés. Ceux-ci servent à assurer un taux de gravure et un polissage de l'encapsulation qui soient uniformes à la surface des plaques [16][17]. Les masques en version numérique sont ensuite envoyés à un sous-traitant pour leur fabrication.

2.2 Instruments de caractérisation

Les circuits photoniques fabriqués pour la thèse sont caractérisés à l'aide de deux bancs de caractérisation. Le premier est un goniomètre que j'ai presque entièrement conçu pendant la

thèse. Il est adapté à nos besoins spécifiques en caractérisation. Ce goniomètre a la capacité d'étudier les propriétés d'émission et d'insertion angulaires des faisceaux guidés par nos échantillons (puces découpées $22 \times 22 \text{ mm}^2$). Ceci est particulièrement important pour étudier l'interaction « guide d'onde – hologramme » (quantité d'énergie émise du circuit, angle d'émission, divergence des faisceaux ...). Le goniomètre peut également étudier des circuits photoniques complexes (grande surface et plusieurs points d'émission simultanément) à l'aide d'un système d'imagerie. Le deuxième banc de caractérisation est une sonde optique automatisée (*prober*) disponible au CEA-LETI. Cet instrument est partagé par plusieurs utilisateurs de différents laboratoires. Il permet d'étudier les propriétés d'insertion et de transmission de circuits photoniques simples (i.e. typiquement des circuits 1 entrée et 1 sortie). Il peut faire rapidement de nombreuses mesures répétitives sur une plaque d'un substrat entier de 200 mm de diamètre.

2.2.1 Goniomètre

Un goniomètre est un instrument permettant de faire des mesures en fonction de l'angle. Dans notre cas, nous souhaitons l'utiliser pour la caractérisation en espace libre des circuits photoniques émettant dans le spectre visible.

Les circuits photoniques étudiés peuvent avoir un à plusieurs milliers de points d'émission, dont la largeur est de quelques microns. Leur angle de divergence est de quelques degrés (~ 3 deg typiquement dans nos échantillons). L'angle d'émission dépend du circuit (typiquement 10-30 deg). Cet angle peut aussi varier à l'aide d'un hologramme déposé sur le circuit. La puissance émise individuellement par les points est de l'ordre des microwatts ou des nanowatts (avec une puissance de la source laser à 1 mW), selon le nombre de points d'émission du circuit étudié.

Les plaques de substrat en silicium (*wafers*) de notre projet font 200 mm de diamètre.

Les substrats entiers sont étudiés à l'aide de la sonde automatisée (*prober*). Le substrat est directement posé à plat sur cette machine. Deux bras sondes (comportant chacun une fibre optique) s'alignent automatiquement aux entrées et aux sorties des circuits photoniques de la plaque et scannent l'objet. Cette technique permet de caractériser un grand nombre de circuits rapidement. Dans notre cas elle est limitée à un seul type de mesure : la valeur absolue de la puissance optique en sortie des circuits. Elle ne donne pas d'information sur l'angle d'émission des circuits. De plus, elle ne peut généralement étudier qu'un nombre limité de points d'émission par circuit. Par exemple, le *prober* permet d'étudier les circuits photoniques à 1 entrée et à 1 sortie et il est difficilement envisageable d'étudier un circuit dont le nombre de sorties est très supérieur au nombre d'entrées, par exemple avec un circuit à 1 entrée et 1024 sorties comme dans certains de nos circuits photoniques.

Le substrat est composé de plusieurs puces (*die*), i.e. une répétition des motifs des circuits photoniques. Chaque *die* a une surface de $22 \times 22 \text{ mm}^2$ et comporte plusieurs circuits différents (taille, fonction etc.). Ces circuits individuels sont appelés *subdies* ou « structures de test ». Ils sont composés de composants photoniques dont les dimensionnements sont de l'ordre des centaines de nanomètres. Un *subdie* complet fait généralement de quelques centaines de microns à quelques millimètres (1-2 mm) dans notre cas. Le motif d'une puce est répété une cinquantaine de fois à la surface du substrat de 200 mm de diamètre. Ces répliques servent notamment à obtenir des moyennes statistiques à l'aide du *prober* pour valider le fonctionnement expérimental des circuits individuels.

Les *dies* d'un substrat peuvent être découpées individuellement. Il est alors plus facile d'étudier les circuits photoniques qu'elle comporte sur un autre type de banc de caractérisation car l'échantillon étudié est beaucoup plus petit. Dans notre cas, les *dies* individuelles sont étudiées

sur le banc de caractérisation goniométrique. Ce banc nous donne plus de flexibilité par rapport au *prober*. Nous pouvons l'utiliser afin d'étudier les points suivants sur les circuits photoniques :

- Analyse de l'émission et de l'insertion angulaire dans les coupleurs des circuits photoniques (ex : points d'émission formés par des réseaux de diffraction).
- Analyse de l'émission angulaire lorsqu'un guide d'onde est combiné à un hologramme.
- Analyse simultanée par imagerie de plusieurs sorties (points d'émission) sur un circuit photonique individuel (1 entrée).
- Observation visuelle des circuits, notamment pour la génération d'images dans la cadre de l'application du projet de lunettes de réalité augmentée.

Toutefois, l'utilisation du goniomètre a également des inconvénients par rapport au *prober* :

- L'alignement optique du goniomètre est manuel, ce qui augmente le risque d'erreur par rapport à un alignement automatique sur *prober* (couplage optique non-optimal et moins bonne répétabilité d'un circuit à l'autre).
- Les alignements manuels prennent du temps et ne permettent pas d'étudier un grand nombre de circuits rapidement.
- Les longues manipulations limitent le nombre de circuits que l'on peut étudier dans un temps raisonnable sur différentes *die* et rendent difficile une étude statistique des résultats obtenus.

Remarque : à titre d'exemple, de 10 à 50 circuits photoniques individuels peuvent être étudiés quotidiennement à l'aide du goniomètre selon l'expérience d'alignement de l'utilisateur, alors que plusieurs *die*s (environ 5-10) d'un substrat peuvent être étudiées en 1 journée au *prober*. Sachant que nos premiers échantillons comportent environ 360 circuits photoniques par *die*, cela représente potentiellement plus de 3600 circuits testés par jour.

La **Figure 2-3** montre la taille de l'une de nos demi-plaques de 200 mm par rapport à une puce individuelle :

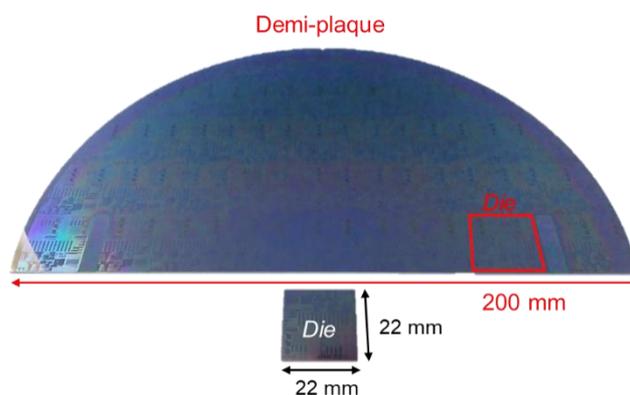


Figure 2-3 Photos d'une demi-plaque 200 mm et d'une puce individuelle 22 x 22 mm².

2.2.1.1 Présentation du montage du goniomètre

Le banc de caractérisation goniométrique est composé de 3 blocs principaux, tel que présenté à la **Figure 2-4** :

- Bloc 1 : injection laser (source laser, polarisation, fibres optiques injectant le signal laser dans l'échantillon). Le bloc 1 permet de déplacer linéairement en $x/y/z$ la fibre optique qui injecte le signal laser dans l'échantillon (translation 3D avec $1\ \mu\text{m}$ de précision dans chaque direction). Une petite pièce permet également d'ajuster manuellement à $\pm 5^\circ$ l'orientation de la fibre pour qu'elle soit perpendiculaire à l'échantillon.
- Bloc 2 : support de l'échantillon (partie maintenant et déplaçant la puce de l'échantillon étudié). Le bloc 2 peut se déplacer linéairement en $x/y/z$ (translation 3D avec $1\ \mu\text{m}$ de précision dans chaque direction) et tourner à l'aide d'une platine de rotation robotisée (incrément de $1\ \text{mdeg}$, angle θ). Ce bloc possède aussi une petite pièce permettant d'ajuster l'angle de l'échantillon afin qu'il soit perpendiculaire au capteur.
- Bloc 3 : partie capteur comprenant un bras robotisé sur lequel un *cage system* de Thorlabs est installé afin d'y mettre différents types de capteurs (photodétecteur, caméra CMOS) et autres composants (objectifs de microscope, filtres polarisant, iris ...). Le bloc 3 peut se déplacer linéairement en $x/y/z$ (translation 3D avec $1\ \mu\text{m}$ de précision dans chaque direction) et tourner à l'aide d'une platine de rotation robotisée (incrément de $1\ \text{mdeg}$, angle φ).

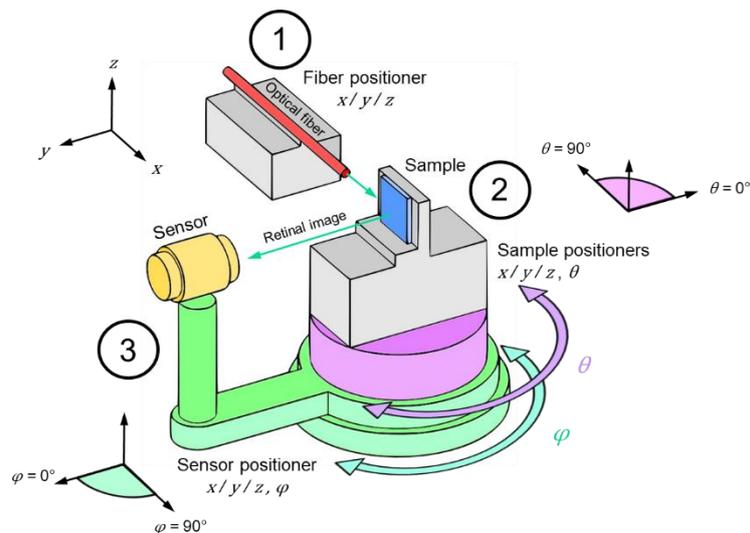


Figure 2-4 Représentation schématique des 3 blocs du banc de caractérisation goniométrique

Le banc goniométrique a d'abord été modélisé sur SolidWorks avant sa construction afin d'en vérifier le fonctionnement et la mécanique de base. Cela permet une réduction des erreurs de conception.

Il a 2 configurations prévues selon le type d'injection laser que l'on souhaite faire. La première est une configuration de couplage par la tranche (*edge-coupling*). La seconde est une configuration de couplage par réseau (*grating-coupling*), tel que présenté à la **Figure 2-5**. Cette dernière est la configuration principale dans laquelle les mesures sont effectuées pendant la thèse.

Sur le schéma principal de la **Figure 2-5**, la flèche verte représente la direction du signal laser. La flèche jaune pointillée représente la direction d'observation du capteur. Le carré bleu représente la puce de l'échantillon. Les pièces rouges sont associées au bloc 1. Les pièces mauves sont associées au bloc 2. Les pièces vertes sont associées au bloc 3. Les pièces jaunes sont associées au *cage system* (bloc de détection, photodétecteur dans ce cas). Les couleurs correspondent à la représentation schématique du goniomètre à la **Figure 2-4**.

Plusieurs des pièces de l'instrument ont été conçues spécialement pour le banc et ont été fabriquées à l'atelier du CEA ou chez un sous-traitant extérieur. Certaines ont aussi été fabriquées par impression 3D. Ces dernières servent généralement à soutenir la fibre optique d'injection laser et à faire des raccords entre des pièces mécaniques qui ne peuvent pas être directement assemblées.

En configuration de couplage par la tranche, la fibre d'injection laser est parallèle à la surface de l'échantillon. Le capteur est également centré dans le même axe de propagation que le faisceau laser. En configuration de couplage par réseau, la fibre d'injection a un angle proche de la normale de l'échantillon (typiquement $\alpha \approx 16$ deg dans notre cas). Le capteur observe du côté opposé à la normale de l'échantillon (φ_s). L'origine angulaire de α et de φ_s est donnée par la normale au plan de l'échantillon (pointillé bleu).

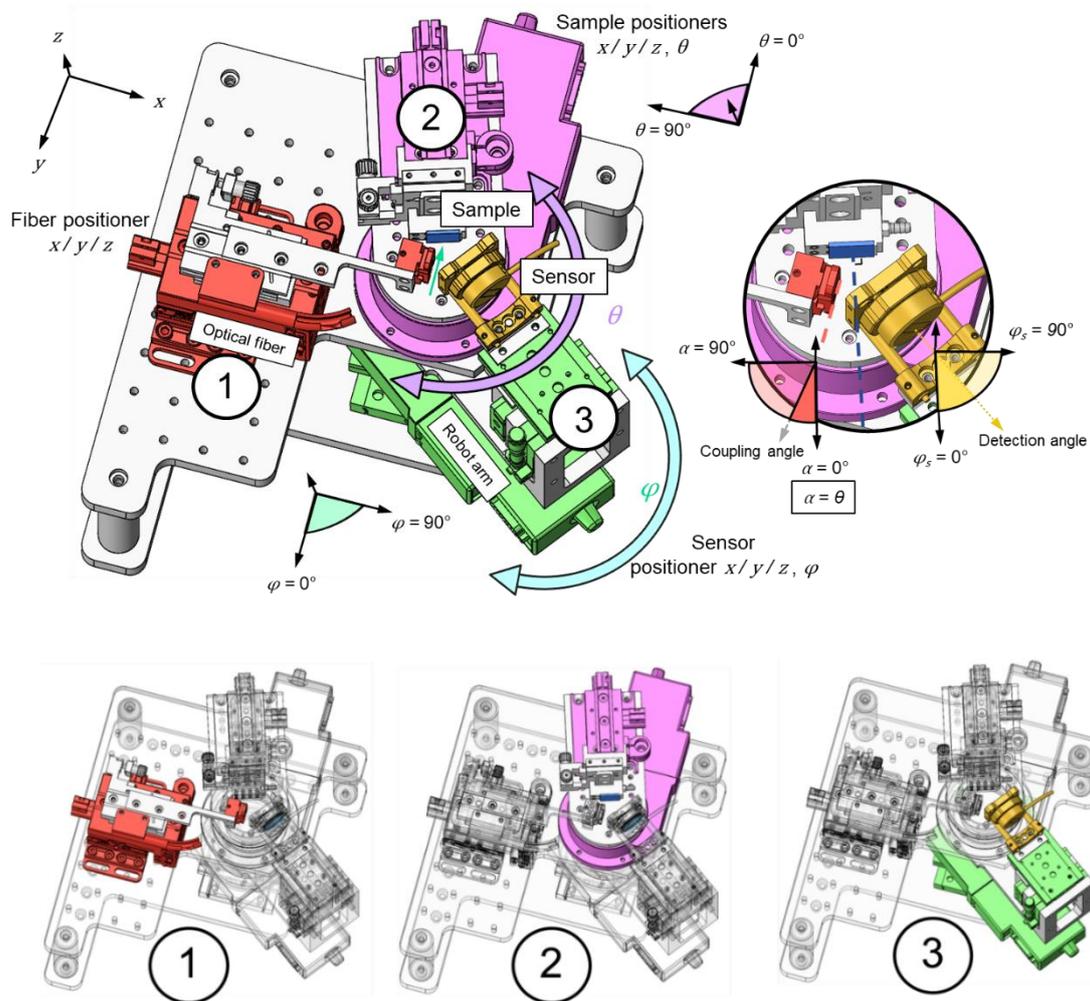


Figure 2-5 Banc goniométrique en configuration de couplage par réseau avec en détail les 3 blocs principaux numérotés de l'instrument.

Des photos du montage réel sont présentées à la **Figure 2-6**. La boîte noire autour du goniomètre (**Figure 2-6** (b)) sert à éliminer le bruit lumineux ambiant et assurer la sécurité des opérateurs face aux dangers laser. Elle possède un couvercle pour la refermer entièrement.

Un programme LabVIEW permet de contrôler automatiquement les déplacements des 2 platines de rotation du montage (rotation du support échantillon θ et du capteur φ). Il permet également de lire la valeur du photodétecteur en temps réel et de faire des acquisitions automatiques de données selon l'angle du capteur avec l'échantillon (i.e. scan angulaire). Un second programme LabVIEW permet l'acquisition d'images en temps réel à l'aide d'un capteur CMOS.

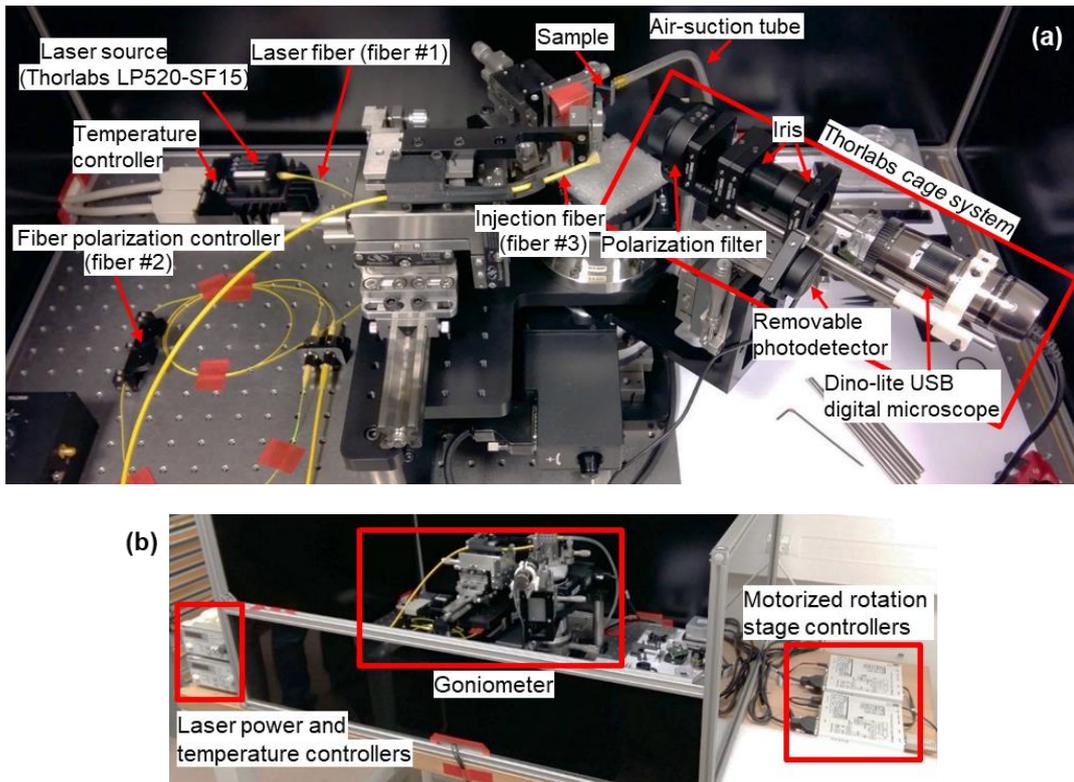


Figure 2-6 Photo du goniomètre, a) vue détaillée du goniomètre, b) vue globale du montage avec la boîte de sécurité optique.

La source laser est un laser fibré Thorlabs LP520-SF15. Cette source continue peut fournir jusqu'à 15 mW de puissance. Son pic d'émission est à $\lambda = 519$ nm. L'émission spectrale du laser est fournie par le fabricant à la **Figure 2-7**. En considérant que $\lambda_0 = 519$ nm et $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 1$ nm, on obtient par la relation $L_c \approx \lambda_0^2 / \Delta\lambda_{FWHM}$ que la longueur de cohérence de notre laser est d'environ 270 μm .

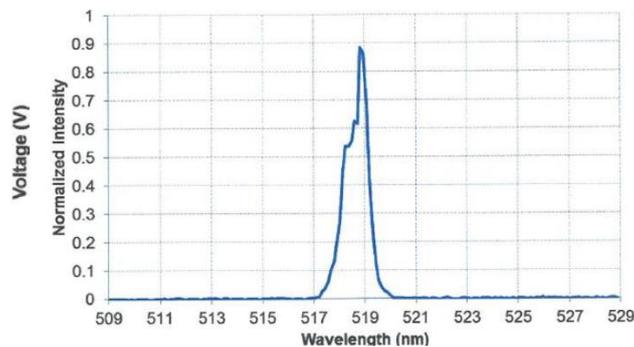


Figure 2-7 Émission spectrale du laser monomode fibré Thorlabs LP520-SF15.

Ce laser a été sélectionné pour effectuer la caractérisation de nos circuits car sa longueur d'onde centrale ($\lambda = 519 \text{ nm}$) est suffisamment proche de celle utilisée lors de la conception numérique de nos composants ($\lambda = 532 \text{ nm}$). De plus, ce laser était déjà disponible, fonctionnel et fibré lors de la planification des mesures. Enfin, il était facile à transporter. Cette dernière caractéristique est très importante car le montage laser devait fréquemment être déplacé du banc de caractérisation goniométrique à celui du *prober*. Ceux-ci sont séparés dans deux bâtiments distants de plusieurs centaines de mètres. Le passage de l'un à l'autre demande de sortir le montage en extérieur. Nous avons tenté d'utiliser un autre laser à la longueur d'onde exacte de conception des circuits mais il n'était pas fibré. Le montage optique nécessaire pour fibrer ce laser était très instable et se déréglaît au moindre déplacement.

La fibre optique fibrée au laser (fibre #1) est une fibre monomode Thorlabs 460HP ayant une plage de longueur d'onde de fonctionnement de 450-600 nm. Cette fibre est connectée à la fibre #2 à l'aide d'un connecteur FC/PC. La fibre #2 est une fibre monomode Thorlabs SM450 guidant la lumière sur la gamme de longueur d'onde 488-633 nm. Elle est installée dans un contrôleur de polarisation Thorlabs FPC021. La calibration du contrôleur de polarisation est détaillée à l'Annexe A. Un second connecteur FC/PC connecte la fin de cette fibre avec la fibre #3 qui est également une fibre Thorlabs SM450. Cette dernière sert à injecter le signal laser dans les circuits.

Le MFD (*Mode Field Diameter*) de la fibre #3 est compris entre 2.8 et 4.1 μm à $\lambda = 488 \text{ nm}$, ce qui est bien en-deçà de la taille de nos réseaux de couplage (20 μm de long). Ce critère est l'une des conditions pour coupler efficacement dans un réseau de couplage. De plus, une taille de faisceau en sortie de fibre inférieure à la taille du réseau permet également d'éviter de coupler directement dans des circuits voisins (i.e. pas de « débordement » du faisceau à l'extérieur de la zone du coupleur). Le MFD est défini comme étant le diamètre auquel la densité de puissance est de $1/e^2$ pour une fonction gaussienne normalisée.

Le photodétecteur utilisé est le Thorlabs S120C (sensibilité dans la gamme de longueurs d'onde 400-1100 nm).

2.2.1.2 Erreur d'alignement fibre-réseau

La fibre d'injection permet de coupler la lumière du laser dans les circuits photoniques du goniomètre. Cette fibre peut avoir une erreur d'alignement par rapport à l'entrée des circuits étudiés, tel que représenté schématiquement à la **Figure 2-8**. Cette erreur peut nuire à l'efficacité de couplage et augmente à l'incertitude de mesure (i.e. réduction de la répétabilité des mesures et augmentation des marges d'erreur lors de mesures statistiques).

La sensibilité d'alignement de la fibre optique et son effet sur l'efficacité de couplage dans nos circuits a été évaluée manuellement à l'aide du goniomètre, tel que présenté à la **Figure 2-9**. Cette sensibilité d'alignement est étudiée selon la translation linéaire de la fibre en x et y par rapport au réseau.

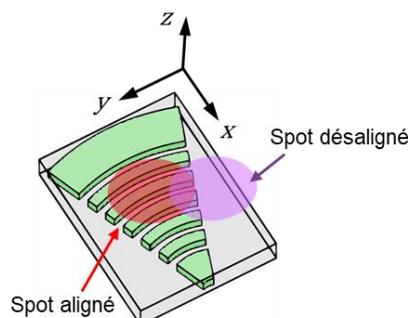


Figure 2-8 Alignement du spot de la fibre d'injection laser sur un réseau de couplage.

A la **Figure 2-9 (a)**, on observe que l'efficacité de couplage n'est pas symétrique en x par rapport au maximum observé. En effet, la puissance captée descend beaucoup plus abruptement à droite du maximum qu'à sa gauche. Cela s'explique par la forme du coupleur de diffraction qui n'est pas symétrique selon x (cône de réseau de diffraction). On pose que la tolérance pour un bon alignement est lorsque la puissance captée est supérieure à 90 % du maximum de la courbe. A la **Figure 2-9 (a)**, cela correspond à une tolérance d'alignement sur une zone de $5.5 \mu\text{m}$ (rectangle rouge).

A la **Figure 2-9 (b)**, la courbe semble davantage symétrique qu'en (a). Cela s'explique par la symétrie du coupleur selon l'axe y . Sur l'axe y , la tolérance d'alignement diminue car le coupleur est plus étroit sur cet axe que sur l'axe x . La tolérance mesurée est d'environ $3 \mu\text{m}$.

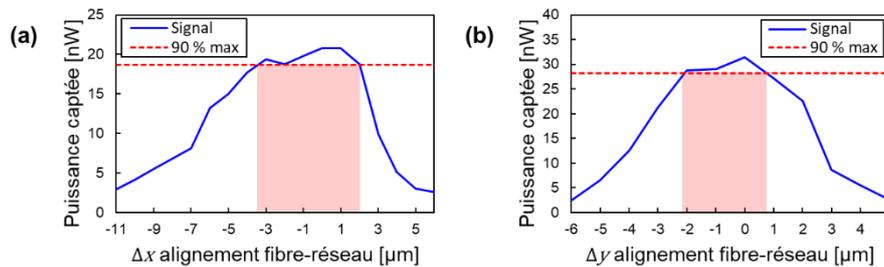


Figure 2-9 Sensibilité d'alignement entre la fibre optique d'injection laser et le réseau de couplage nominal du circuit photonique intégré, a) alignement selon x , b) alignement selon y .

On conclut que l'efficacité de couplage est sensible au désalignement dans notre cas. En effet, la tolérance d'alignement minimale de nos circuits ($\sim 3 \mu\text{m}$, i.e. $\pm 1.5 \mu\text{m}$) se rapproche de la résolution d'alignement des instruments de caractérisation ($\pm 1 \mu\text{m}$ pour le goniomètre et le *prober*). Cette faible tolérance découle de la longueur d'onde utilisée. Puisque celle-ci est petite ($\lambda = 532 \text{ nm}$), il en est de même des dimensions des réseaux de couplage ($\sim 16 \mu\text{m}$ de long). Plus le réseau de couplage est petit et plus il est sensible aux erreurs d'alignement. Généralement, les longueurs d'onde utilisées en photonique intégrée sont davantage dans le spectre IR et sont donc plus grandes que dans notre cas (λ est souvent proche ou supérieur de $1 \mu\text{m}$). Les réseaux de couplage de longueurs d'onde plus élevées sont plus grands et occupent donc une plus grande surface sur le circuit. Cela limite leur sensibilité d'alignement par rapport à notre cas. La précision d'alignement des outils de caractérisation qui nous sont accessibles sont généralement davantage adaptés pour ces réseaux de couplage conçus pour l'IR que ceux conçus pour notre faible longueur d'onde.

Lors du couplage, il y a également une erreur sur le réglage de la distance entre la fibre d'injection et les réseaux de couplage (i.e. espacement « fibre – réseau », axe z). Cette erreur a un impact sur l'efficacité de couplage. Pour maximiser cette efficacité, on souhaite que la fibre soit le plus proche possible du réseau. Dans notre cas, nous ne connaissons pas avec exactitude l'erreur d'alignement vertical entre la fibre et le réseau de couplage.

Le *prober* permet toutefois d'ajuster précisément la distance « fibre – réseau » avant la prise de mesure. Cette distance peut toutefois varier de quelques microns en fonction de la planéité du substrat.

2.2.1.3 Scan angulaire au goniomètre

Le goniomètre permet de scanner angulairement le signal émis depuis des points d'émission à la surface d'un échantillon (ex : circuit photonique, hologramme etc.). Les propriétés angulaires des échantillons sont utiles à la calibration du couplage lors de la caractérisation

des circuits photoniques. Cela sert également à étudier l'interaction « guide d'onde – hologrammes » et les propriétés d'émission des hologrammes.

Les scans angulaires sont effectués par le bloc 3 du goniomètre (bloc capteur) installé sur un bras robotisé qui peut tourner autour de l'échantillon étudié (voir **Figure 2-5**).

Une photo de l'équipement monté sur le bloc capteur est montré à la **Figure 2-10**. Cette photo est détaillée schématiquement à la **Figure 2-11**.

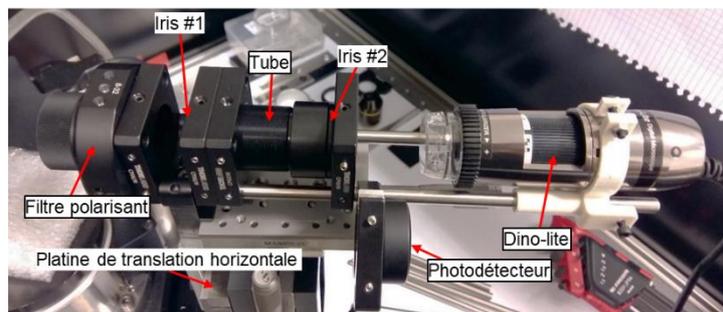


Figure 2-10 Photo de l'équipement installé sur le bloc 3 du goniomètre pour effectuer des scans angulaires.

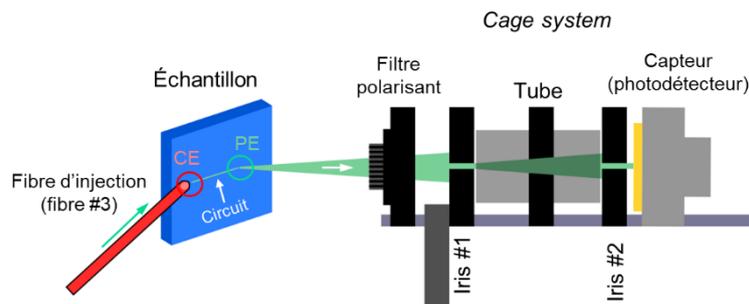


Figure 2-11 Schéma du montage du bloc capteur utilisé pour les scans angulaires sur le goniomètre. La zone où il y a un couplage d'entrée (CE) entre la fibre optique et l'entrée d'un circuit photonique cause un bruit important (réflexions indésirables). Ces réflexions sont filtrées à l'aide des iris et d'un cache (non représenté). Les iris permettent également d'être sélectif angulairement sur le faisceau détecté. Le point d'émission (PE) en sortie de circuit est scanné angulairement par le bloc 3 qui tourne autour de celui-ci par petits incréments angulaires (0.2 deg typiquement).

Les **Figure 2-10** et **Figure 2-11** montrent que le bloc de détection permet d'observer sélectivement en angle les faisceaux provenant des points d'émission. Le bloc de détection est facilement modulable pour utiliser au choix le photodétecteur ou un microscope USB Dino-Lite (utilisé pour l'observation des circuits et les alignements).

2.2.1.4 Imagerie au goniomètre

Le goniomètre permet également de caractériser les échantillons par imagerie. Cela permet d'étudier des distributions d'intensité de plusieurs points d'émission. En effet, certains circuits photoniques ont une seule entrée mais plusieurs centaines ou milliers de sorties (points d'émission) activés simultanément. Ceux-ci ne peuvent pas être caractérisés un à un au *prober* ou au goniomètre à cause de contraintes mécaniques ou de temps. Il est plus simple d'imager l'ensemble des PEs puis d'en faire l'analyse d'image sur ordinateur. Dans le futur, ce système d'imagerie pourra aussi être adapté pour l'étude de formation d'image (auto-focalisation).

Pour utiliser l'imagerie au goniomètre, le matériel installé sur le bloc de détection est remplacé par une lentille et une caméra CMOS espacés par un tube. Le microscope USB Dino-lite n'est

pas utilisé pour l'acquisition d'images car il a une résolution limitée par rapport à nos besoins. De plus, il représente une « boîte noire » au niveau de son système optique. Le capteur pour l'imagerie est donc une caméra CMOS haute résolution (réf : IDS UI-1492LE¹, 3840 x 2748 pixels – i.e. 10.55 Mpx, taille de pixel 1.67 μm). Elle est installée dans un système optique simple (une lentille de 4.5 mm de focale et un tube de raccord). Cela nous permet de plus facilement régler et comprendre la formation d'image sur le capteur. La caméra CMOS monochromatique a une réponse linéaire en intensité. Celle-ci varie sur une échelle 8 bits (0 à 255). La puissance injectée dans le circuit étudié est réduite pour s'assurer qu'aucun pixel de la caméra ne soit saturé en intensité. Le circuit peut être étudié à de plus fortes intensités si une densité optique est placée devant la caméra.

Le montage permet d'observer la surface de l'échantillon (ex : une distribution de PEs) en champ proche. Le montage optique est présenté à la **Figure 2-12**.

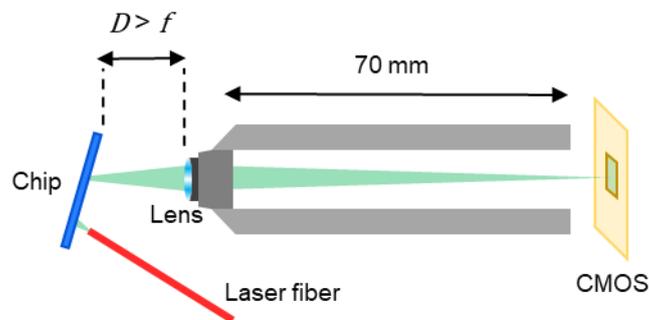


Figure 2-12 Montage du système d'imagerie sur le *cage system* du goniomètre. Le montage permet d'observer l'échantillon en champ proche.

2.2.2 Prober

Le *prober* est un outil de caractérisation automatisé. Il permet de caractériser rapidement un grand nombre de circuits photoniques (jusqu'à plusieurs milliers par jour) sur un substrat entier (*wafer* 200 mm). Il peut faire des mesures sur des circuits photoniques passifs ou actifs. Dans les circuits actifs, des électrodes contrôlent des chaufferettes modulant le signal optique en sortie de circuits (ex : interféromètres de Mach-Zehnder actifs).

Cet instrument ne peut caractériser que des circuits ayant un faible nombre de sorties (1-2 typiquement). Son accès est limité car il est partagé entre plusieurs laboratoires internes et des instituts étrangers, contrairement au goniomètre qui est dédié à la thèse. Une photo du *prober* utilisé pour les caractérisations de nos circuits photoniques est présenté à la **Figure 2-13**.

¹ Référence : <https://fr.ids-imaging.com/store/ui-1492le.html>

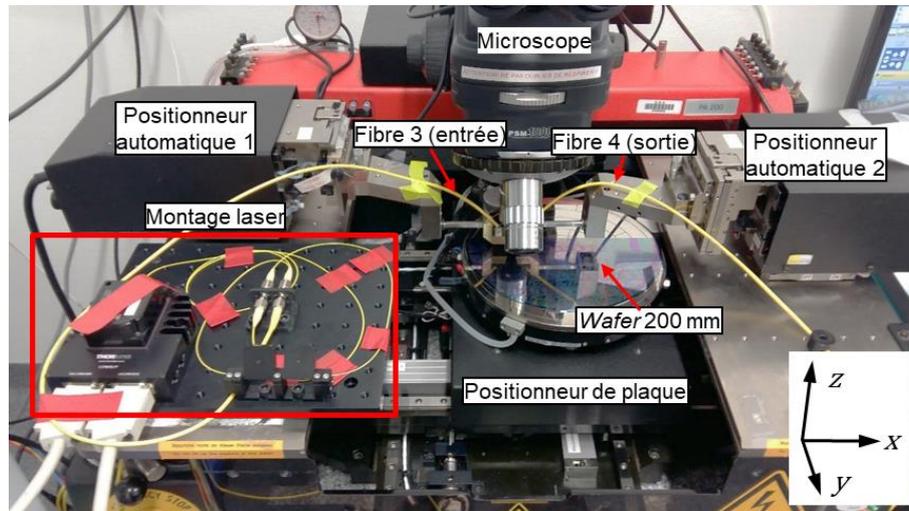


Figure 2-13 Photo du prober avec un substrat 200 mm.

A la figure **Figure 2-13**, on aperçoit le même montage laser que celui utilisé sur le goniomètre (source laser, fibres #1 à 3, contrôleur de polarisation, connecteurs etc.). Celui-ci est transportable d'un banc de caractérisation à l'autre. Le substrat de 200 mm (*wafer*) est posé sur une plaque d'aspiration qui peut se translater en 3D (horizontalement et verticalement) et tourner. La rotation permet d'ajuster l'orientation de la plaque par rapport aux fibres #3 (entrée, i.e. injection laser dans le circuit) et #4 (sortie, i.e. récupération du signal transmis par un circuit). L'aspiration de la plaque sert à maintenir mécaniquement le substrat sur le support (condition nécessaire à un alignement précis et constant des fibres par rapport au substrat). L'aspiration sert également à aplanir le substrat pour s'assurer que la distance « *wafer* – fibre » soit la plus constante possible.

Les fibres en entrée et en sortie sont positionnées à l'aide de deux positionneurs automatiques. Ceux-ci ont une précision d'alignement de $\pm 1 \mu\text{m}$. Une petite pièce mécanique est utilisée au bout des positionneurs pour ajuster les angles de couplage des fibres optiques. Généralement, les angles d'entrée et de sortie sont les mêmes. Dans notre cas, nous avons conçu et fabriqué des pièces personnalisées dont l'angle de couplage correspond aux réseaux de nos circuits et à notre longueur d'onde (i.e. 16.5 deg). Les fibres optiques dénudées en entrée et en sortie sont les mêmes (fibres monomodes SM450, $\lambda = [488, 633] \text{ nm}$, FC/PC).

Un microscope est utilisé pour les alignements préliminaires avant le scan des circuits par le *prober*. Ces alignements comprennent l'orientation de la plaque, le réglage de la distance « substrat – fibre » (z) et l'alignement de la position de référence du substrat par rapport aux fibres optiques (x, y). La distance « substrat – fibres » est ajustée à $15 \mu\text{m}$. Cette distance permet à la fois aux pointes des fibres d'être très proches des réseaux de couplage (augmente l'efficacité de couplage) tout en gardant une marge d'erreur par rapport à la variation de planéité du substrat. Durant le scan au *prober*, c'est le positionneur de plaque qui est translaté pour que la position des fibres optiques qui est fixe corresponde aux entrées et aux sorties de chaque circuit testé. La distance « entrée – sortie » des circuits photonique testés est identique.

Lors du scan au *prober* l'ordinateur contrôlant la plaque d'aspiration lit un fichier de positions (cartographie). Les positions lues correspondent aux entrées de chaque circuit photonique par rapport à une référence (0,0) prédéfinie.

La manipulation du *prober* s'effectue en grande partie par du personnel spécialisé. Dans mon travail de thèse, j'avais la responsabilité de l'écriture du fichier de cartographie, de la validation des conditions de mesure et de l'analyse des données de scan du *prober* à l'aide de MATLAB.

Un schéma du *prober* est présenté à la **Figure 2-14**.

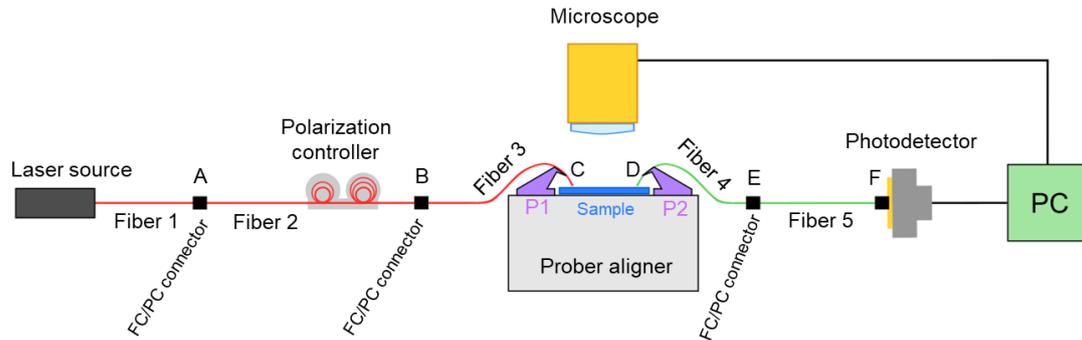


Figure 2-14 Schéma du *prober* détaillant la propagation de lumière dans les fibres optiques depuis le laser jusqu'au détecteur. Les positionneurs automatiques sont indiqués par les abréviations P1 et P2.

Avant la caractérisation au *prober*, la puissance en sortie de la fibre #3 est mesurée au puissance-mètre (point C sur la **Figure 2-14**). De plus, la puissance en sortie de fibre #2 est mesurée (point B) afin de déterminer les pertes aux connecteurs FC/PC. Celles-ci sont d'environ -0.5 dB. Cela permet de connaître la puissance injectée dans les circuits (point C) et les pertes dans la zone de récupération du signal (connecteur E). On considère que les pertes de propagation dans les fibres optiques sont nulles. On néglige également les pertes entre le connecteur et le photodétecteur (point F).

2.2.3 Autres outils de caractérisation

D'autres outils de caractérisations ont été utilisés au cours de la thèse. Ils ont participé à l'obtention des résultats mais ont été manipulés par du personnel scientifique spécialisé, notamment en salle blanche. Ces outils comprennent le CDSEM (*Critical-Dimension Scanning Electron Microscope*), le MEB standard (Microscope Electronique à Balayage), le FIB (sonde ionique focalisée, ou *Focused Ion Beam*) et l'ellipsomètre.

Le CDSEM a été utilisé en majorité pour l'analyse automatique de motifs de test similaires aux guides d'onde. Ces motifs ont été utilisés pour valider les dimensionnements des composants suite à plusieurs étapes de fabrication (photolithographie et gravure).

Le MEB a été utilisé pour l'observation (étude visuelle) de composants photoniques à la surface des échantillons.

Le FIB a été utilisé pour imager la coupe transversale des guides d'onde et la superposition des différentes couches de dépôt des circuits.

L'ellipsométrie a été utilisée pour obtenir les indices de réfraction de plusieurs matériaux sur de larges domaines spectraux. Ces matériaux rentrent dans la composition des circuits photoniques.

2.3 Conception des circuits

La fabrication des circuits photoniques dans le projet a été un élément majeur au cours de la thèse. Leur fabrication suit de nombreuses étapes qui sont décrites dans les sous-sections suivantes. L'enchaînement des étapes et procédés de fabrication a été déterminé par des collaborateurs spécialisés au sein du CEA-LETI. Mon rôle durant la thèse a été principalement de superviser à distance la fabrication des circuits et d'étudier l'impact des données expérimentales issues de la fabrication des lots pour comprendre comment le fonctionnement des composants photoniques de base peut varier entre les modèles théoriques et les mesures expérimentales au *prober* et au goniomètre (chapitre 3 **Résultats**).

De plus, la connaissance des étapes de fabrication des circuits permet de mieux comprendre les possibilités d'architecture du circuit photonique applicatif du projet et d'effectuer les simulations numériques des composants photoniques de façon plus réaliste.

2.3.1 Fabrication du lot 1

Les circuits du lot 1 sont fabriqués en salle blanche à l'aide de procédés de micro-fabrication classiques (dépôts LPCVD, photolithographie etc.). La majorité des étapes de fabrication ont été réalisées au sein des salles blanches du CEA-LETI de Grenoble. Les étapes de photolithographie ont toutefois été effectuées à STMicroélectronique sur un site géographiquement voisin. Le recours aux machines de STMicroélectronique est justifié par la résolution exigeante de la photolithographie des circuits (150 nm) qui n'était pas accessible au CEA-LETI sur des *wafers* 200 mm au moment d'effectuer la thèse. Cette contrainte en résolution est donnée par la petite taille des composants photoniques du projet, qui provient elle-même de la courte longueur d'onde d'utilisation de ceux-ci ($\lambda = 532$ nm). Généralement, les circuits photoniques fabriqués au CEA-LETI visent des longueurs d'onde plus grandes (ex : spectre IR) et sont donc moins contraints en termes de résolution.

La combinaison des plateformes de fabrication du CEA-LETI et de STMicroélectronique a augmenté les délais de livraison du lot 1. Cet inconvénient provient d'un problème de compatibilité entre les procédés de fabrication des deux plateformes. En effet, le procédé de photolithographie de STMicroélectronique n'était pas adapté aux conditions de gravure du CEA-LETI, et ce pour nos conditions de conception (i.e. dimensions critiques de 150 nm et matériau Si_3N_4 déposé par LPCVD). La fabrication des circuits photoniques a été interrompue pour concevoir de nouveaux procédés compatibles entre les deux plateformes, notamment pour respecter les dimensionnements des composants photoniques (ex : largeur et géométrie générale des guides d'onde). La durée de fabrication était initialement prévue pour être de 4 à 6 mois. Au final, la fabrication complète du lot 1 aura duré presque 2 ans.

Dans notre cas, les circuits du lot 1 sont conçus à l'aide d'un masque de photolithographie partagé avec une autre équipe de laboratoire (LIPS, Laboratoire d'Intégration de Photonique sur Silicium). Ce laboratoire a une grande expertise dans la fabrication de circuits photoniques en Si_3N_4 au CEA-LETI (applications dans l'IR). Le partage du masque nous permet de bénéficier de leur expertise de fabrication, notamment pour l'écriture d'un carnet de lot qui détaille les aspects techniques pour chaque étape de fabrication.

Le masque permet de fabriquer les circuits sur des puces de 22 mm de côté. Les puces sont identiques et sont répliquées à la surface d'un *wafer* de 200 mm de diamètre. La surface de ces carrés est partagée en deux moitiés entre les circuits du projet (lot 1) et celui du LIPS (11 x 22 mm² chacun). En pratique, la surface utile pour concevoir mes circuits photoniques est davantage réduite pour laisser de la place à des marques d'alignement en périphérie. La périphérie du masque est gérée par un laboratoire tiers (LMDK, Laboratoire Masques et Design Kits). Celui-ci utilise des modèles standards permettant de dessiner la périphérie des masques

en fonction des machines de fabrication utilisées. Au final, la surface occupée par mes circuits est de 10 x 20 mm² (200 mm²).

La conception des circuits photoniques dessinés sur le masque de photolithographie est vérifiée automatiquement avant la fabrication de ce dernier. La vérification automatique (DRC, *Design Rule Checking*) est effectuée par le logiciel Virtuoso [18]. Il permet de vérifier que les composants photoniques sont bien raccordés et que leur taille respecte la résolution limite de fabrication.

Les circuits du lot 1 sont fabriqués en différentes variantes sur 12 plaques. Ces variantes sont détaillées au **Tableau 2-1**. Les plaques P01-06 permettent de tester les circuits de Si₃N₄ en différentes épaisseurs (épaisseur nominale de 200 nm ± 20 nm). Les plaques P07-10 permettront d'étudier des réseaux de diffraction partiels gravés. Ceux-ci ont différentes profondeurs de gravure (valeur nominale de 40 nm ± 10 nm). Les plaques P11-12 permettront une étude des circuits actifs nécessitant des électrodes de métal.

Tableau 2-1 Variantes de fabrication des plaques du lot 1.

Plaque	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12
Épaisseur BOX (µm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Épaisseur Si ₃ N ₄ (nm)	200	200	180	180	220	220	200	200	200	200	200	200
Gravure partielle (nm)	40	40	40	40	40	40	30	30	50	50	40	40
Épaisseur chaufferette (nm)	passif	passif	passif	passif	passif	passif	passif	passif	passif	passif	800	800
Épaisseur Ti / TiN (nm)											10 / 100	10 / 100
Paramètre varié	Nominal		Épaisseur Si ₃ N ₄				Gravure partielle				Circuit actif	

Les différentes couches de matériaux constituant les circuits passifs du lot 1 sont représentées sur le schéma simplifié de la **Figure 2-15**. L'ensemble des étapes de fabrication du lot 1 sont décrites dans cette sous-section. Les schémas ne sont pas présentés à l'échelle.

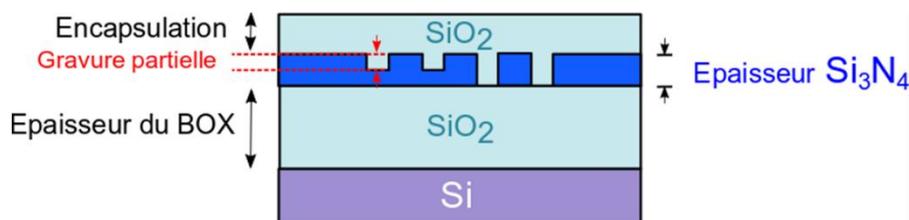


Figure 2-15 Empilement des couches de différents matériaux constituant les circuits passifs du lot 1.

2.3.1.1 Dépôt des couches initiales

Les premières étapes pour démarrer la fabrication des circuits du lot 1 sont présentées à la **Figure 2-16**. A l'étape 1, on définit le substrat sur lequel seront par la suite déposées l'ensemble des couches du circuit. Cette plaque opaque (substrat de Si) a un diamètre de 200 mm et une épaisseur standard de 725 µm. Des marques d'alignement sont gravées dans le substrat de Si (étape 2). Elles permettent d'effectuer l'alignement des masques dans les étapes de photolithographie.

Ensuite, une oxydation du substrat de Si est effectuée par vapeur d'eau (H₂O). Cette couche permet de séparer et isoler le substrat et la future couche de guidage en Si₃N₄. Cela évite que

le substrat de Si d'indice élevé ne perturbe la propagation des modes guidés dans la couche de Si_3N_4 . L'épaisseur de l'oxyde est optimisée à la fois pour éviter cette interaction mais aussi pour maximiser la directivité d'émission de réseaux de diffraction dans la suite du projet. Dans notre cas, l'oxyde a une épaisseur de $2\ \mu\text{m}$. On fait généralement référence à cette couche par l'acronyme BOX (*Buried Oxide*).

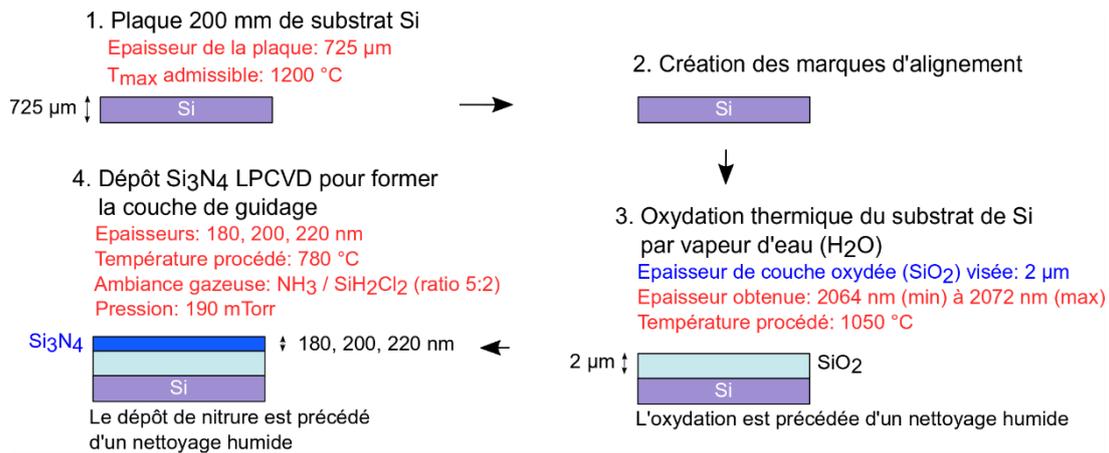


Figure 2-16 Premières étapes de fabrication du lot 1.

La couche de guidage en Si_3N_4 est ensuite formée par-dessus l'oxyde à l'aide d'un dépôt LPCVD (étape 4). Les conditions de dépôt de l'ensemble des couches de Si_3N_4 dans la thèse sont identiques à celles de la Figure 2-16. Les dépôts de Si_3N_4 sont effectués en différentes épaisseurs sur différentes plaques. Ces variations permettent de compenser d'éventuelles incertitudes sur l'épaisseur des couches déposées expérimentalement. Cela permet aussi d'étudier la tolérance de fonctionnement des circuits pour des dimensions qui s'écartent légèrement de celles optimisant la propagation monomode. Des mesures effectuées par ellipsométrie spectroscopique montrent que les épaisseurs de dépôts sont conformes à celles attendues. L'écart moyen entre les épaisseurs visées et celles mesurées après dépôt est d'environ 2 à 3 % selon la plaque. Les dépôts ont une faible variation d'épaisseur sur une même plaque. En effet, l'écart-type des épaisseurs de dépôt est de 1.3 % en moyenne. Les mesures de dépôt de la couche de Si_3N_4 sur différentes plaques sont présentées au Tableau 2-2.

Tableau 2-2 Epaisseurs de dépôt de la couche de guidage en Si_3N_4 pour plusieurs plaques. Les mesures sont effectuées par ellipsométrie spectroscopique.

Plaquette	P01	P03	P05	P07	P09	P11	
Épaisseur Si_3N_4 visée (nm)	200	180	220	200	200	200	
Épaisseur mesurée maximale (nm)	198.3	182.1	220.2	199.2	198.5	198.8	
Épaisseur mesurée minimale (nm)	190.9	174.5	211.6	191.3	191.3	191.5	
Épaisseur mesurée moyenne (nm)	193.8	177.4	214.9	194.2	194.1	194.4	
Ecart-type σ (nm)	2.5	2.5	2.9	2.6	2.4	2.5	
Ecart-type σ (%)	1.3	1.4	1.3	1.4	1.2	1.3	
Δ (épaisseur visée – épaisseur mesurée moyenne)	(nm)	6.2	2.6	5.1	5.8	5.9	5.6
	(%)	3.1	1.4	2.3	2.9	3.0	2.8

Des mesures par ellipsométrie effectuées au CEA-LETI précédemment au projet ont permis d'obtenir l'indice de dépôts LPCVD en Si_3N_4 dans le spectre visible, tel que présenté à la **Figure 2-17**.

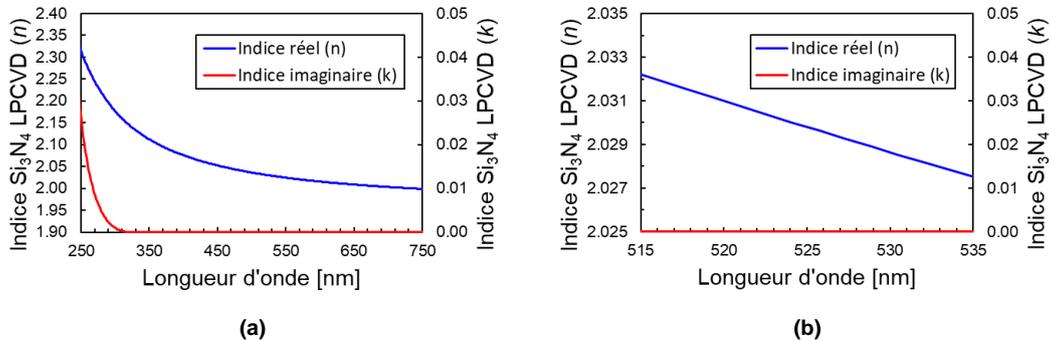


Figure 2-17 Indice de réfraction du Si_3N_4 déposé par LPCVD au CEA-LETI mesuré avec un ellipsomètre, a) dans le spectre visible, b) dans la zone d'intérêt du projet (515 – 535 nm).

Cet indice dépend des méthodes et conditions de dépôt. Il est important de connaître précisément sa valeur pour concevoir et simuler analytiquement et numériquement les composants photoniques de nos circuits. Dans notre cas, l'indice réel du Si_3N_4 est de 2.029 à $\lambda = 532$ nm. Cet indice est donné avec précision pour l'ensemble du domaine spectral d'intérêt au projet (515 – 535 nm) à la **Figure 2-17** (b). Ce spectre est légèrement élargi par rapport à notre référence ($\lambda = 532$ nm) afin de tenir compte de la longueur d'onde du laser utilisé pour la caractérisation des circuits (519 nm).

Les dépôts de Si_3N_4 ne sont pas recuits comme les circuits Si_3N_4 utilisés dans l'IR car ils ont une absorption négligeable dans le spectre visible où se trouve notre longueur d'onde d'intérêt [15].

2.3.1.2 Gravure des réseaux partiels

Une première gravure est ensuite effectuée sur la couche de guidage. Il s'agit d'une gravure partielle permettant de générer des réseaux de diffraction avec un faible coefficient d'extraction. Les étapes menant à la fabrication des gravures partielles sont détaillées à la **Figure 2-18**.

D'abord, une fine couche de 82 nm de BARC (*Bottom Anti-Reflective Coating*) est déposée sur les guides d'onde (étape 5). Ensuite, une couche de 400 nm de résine photolithographique est déposée sur le BARC. Le BARC sert notamment à améliorer la qualité du procédé de photolithographie. Il réduit la réflexion des couches composant le circuit, notamment celle du substrat en Si. Celles-ci peuvent parasiter l'étape d'exposition. Le BARC participe aussi à augmenter l'adhésion de la résine au-dessus de la couche de Si_3N_4 .

Ensuite, un masque de photolithographie est utilisé pour exposer la résine à l'aide d'un éclairage UV (étape 6). Suite à l'exposition, la résine est développée (étape 7) pour laisser place à des zones sans revêtement au-dessus de la couche de Si_3N_4 .

La résine est renforcée à l'aide d'un traitement plasma HBr avant la gravure du BARC (étape 9). La gravure s'effectue par une gravure sèche ICP (*Inductively Coupled Plasma*) à l'étape 10. Une fois que le BARC est gravé, les zones de la couche de Si_3N_4 sans revêtement de résine sont également gravées par une gravure sèche ICP (étape 11). Cette gravure partielle grave 30, 40 ou 50 nm de la couche de guidage afin de faire des variantes des réseaux de diffraction partiels sur différentes plaques.

La gravure ICP est un type de gravure RIE (*Reactive-Ion Etching*). L'ICP utilise des plasmas (gaz ionisé) de basses énergies et avec un fort flux ionique (grande densité de plasma dans le réacteur de gravure). La directivité des ions permet une gravure anisotrope (i.e. flancs droits) par rapport à une gravure humique. Dans l'ICP, la gravure s'effectue davantage par réaction

chimique (dissociation des molécules) entre le plasma et la couche gravée plutôt que par bombardement ionique (i.e. gravure physique). Cette gravure sélective à faible énergie permet de réduire les dommages aux surfaces des plaques gravées [19][20].

L'étape de nettoyage (*stripping*, étape 12) permet d'enlever la résine et les résidus de surface suite à la gravure. Ce nettoyage est effectué par un plasma de O₂ et de CF₄ à 250 °C. Il est complété par un nettoyage humide. L'étape de *stripping* revient fréquemment afin de continuer à travailler avec une couche externe propre pour les futurs dépôts.

Le contrôle de la qualité de la photolithographie (étape 8) et de la gravure (étape 13) sont effectuées par observation au CDSEM (*Critical-Dimension Scanning Electron Microscope*).

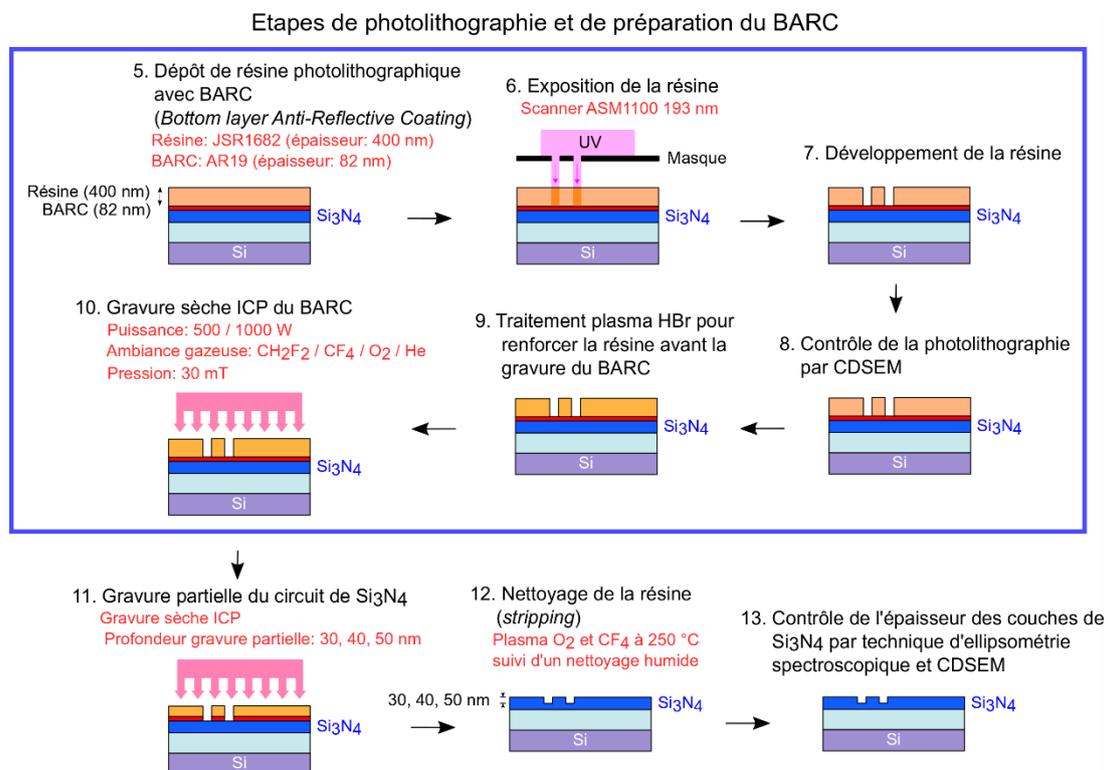


Figure 2-18 Etapes de fabrication du lot 1 pour la création de réseaux de diffraction partiellement gravés.

La plaque P01 a servi de plaque test pour optimiser la dose d'exposition de la résine de photolithographie (en mJ). L'ajustement de cette dose sert à bien définir les dimensionnements des zones exposées. Puisque plusieurs tests ont été effectués sur la plaque P01, celle-ci ne sera pas utilisée par la suite pour tester le fonctionnement des circuits photoniques.

Pour optimiser la dose d'exposition, celle-ci est variée et étudiée sur des motifs de test. Dans notre cas, les motifs de test sont composés de rectangles (on y fait référence par le terme « ligne ») de 200 nm de large et de 200 nm d'espacement (voir **Figure 2-19**). A l'étape 8 de la **Figure 2-18**, les motifs de test sont observés par CDSEM suite aux expositions à différentes énergies. Le CDSEM permet de mesurer les dimensions des lignes et des espaces pour vérifier que leurs dimensions correspondent à celles attendues.

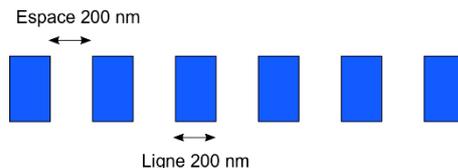


Figure 2-19 Motifs de test ligne-espace pour l'optimisation de la dose d'exposition de la résine de photolithographie.

Les résultats de la dose optimale mesurés sur les motifs de test à l'aide du CDSEM sont présentés à la **Figure 2-20**. La dose optimale est de 24 mJ. Elle permet de se rapprocher au mieux les valeurs ligne-espace nominales (i.e. 200 nm).

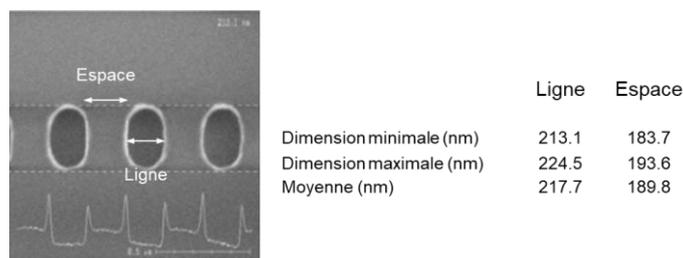


Figure 2-20 Motif de test observé par CDSEM. Ce motif correspond à une dose d'exposition optimale de la résine pour faire concorder les valeurs des dimensions ligne-espace. La moyenne est obtenue à l'aide de plusieurs mesures sur plusieurs puces de la plaque P01.

On remarque sur la photo CDSEM (**Figure 2-20**) que les coins des motifs de test rectangulaires sont arrondis au lieu d'être droits suite à la photolithographie. Ceci peut s'expliquer par la taille minimale des motifs de test (200 nm) qui s'approche de la résolution critique de fabrication (150 nm). Cette déformation risque de modifier le comportement et l'efficacité de nos composants ayant des coins droits (ex : cubes formant les réseaux de diffraction, MMIs ...). Toutefois, la majorité des autres composants photoniques de nos circuits sont formés de longues lignes (ex : guides d'onde) et comportent peu de coins dont les arrondis pourraient causer un problème de fonctionnement au circuit.

On remarque aussi que les lignes sont légèrement plus larges (moyenne ~ 218 nm) que les espaces (~ 190 nm). Ce décalage est prévu pour être compensé après la gravure.

Les épaisseurs de Si_3N_4 après les gravures partielles ont été mesurées par ellipsométrie spectroscopique, tel que présenté au **Tableau 2-3**.

Tableau 2-3 Epaisseurs de la couche de Si_3N_4 sur les zones gravées partiellement pour différentes plaques.

Plaque	P01	P07	P09
Epaisseur théorique de Si_3N_4 avant photolithographie (nm)	200	200	200
Epaisseur moyenne mesurée avant photolithographie (nm)	193.8	194.2	194.1
Gravure partielle (nm)	40	30	50
Epaisseur théorique après gravure partielle (nm)	160	170	150
Epaisseur moyenne mesurée après gravure partielle (nm)	155.5	163.8	145.5
Ecart-type σ (nm) pour la gravure partielle	1.7	1.6	1.0
Ecart-type σ (%) pour la gravure partielle	1.1	1.0	0.7
Δ (épaisseur moy. avant gravure – épaisseur moy. après gravure) (nm)	38.3	30.4	48.6

Les différences d'épaisseurs moyennes entre les couches de Si_3N_4 avant et après les gravures partielles sont conformes à ce qui était attendu. L'erreur absolue des gravures partielles est inférieure à 2 nm sur l'ensemble des plaques mesurées. De plus, l'écart-type sur l'épaisseur moyenne des couches après gravure partielle est d'environ 0.9 %. La gravure a donc été effectuée uniformément sur les plaques. Cet écart est très similaire à celui obtenu précédemment lors des dépôts LPCVD de Si_3N_4 .

Les mesures au CDSEM pour mesurer les dimensionnements des motifs test (ligne-espace de 200 nm) ont été effectuées de nouveau après la gravure partielle (**Tableau 2-4**). Tel qu'attendu, les dimensions des motifs de test sont mieux respectées après la gravure partielle qu'après la photolithographie (**Figure 2-20**).

Tableau 2-4 Dimensionnements des motifs de test ligne-espace mesurés au CDSEM suite à la gravure partielle des réseaux de diffraction de la couche de Si_3N_4 .

Plaques	P01		P08		P10	
	Ligne	Espace	Ligne	Espace	Ligne	Espace
Largeur théorique (nm)	200	200	200	200	200	200
Largeur mesurée minimale (nm)	186.9	197.0	197.0	201.6	195.7	202.9
Largeur mesurée maximale (nm)	241.1	214.3	203.4	208.2	200.9	206.9
Largeur moyenne (nm)	204.3	203.7	199.7	204.7	197.9	204.8

On observe que les tests de dose d'exposition de la plaque P01 ont eu un impact important sur la variation des dimensions de ses motifs de test suite à la gravure partielle. En effet, la différence de largeur de ligne entre les extremums de la plaque P01 est d'environ 54 nm. Cette variation est très élevée par rapport à la taille de ligne visée (200 nm) ainsi que par rapport à la variation de largeur de ligne observée sur les autres plaques. En effet, les autres plaques fabriquées à une dose d'exposition unique (représentées par les plaques P08 et P10) ont une marge d'erreur de dimensionnement bien inférieure. Leur variation maximale par rapport à la valeur visée est d'environ 8 nm. En moyenne, l'écart absolu est inférieur à 5 nm. Les dimensionnements des lignes et des espaces sont très similaires après la gravure partielle. Une photo CDSEM d'un motif de test de la plaque P08 est présentée à la **Figure 2-21**.

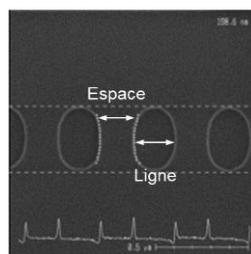


Figure 2-21 Motif de test ligne-espace de la plaque P08 après gravure partielle du Si_3N_4 tel qu'observé au CDSEM.

2.3.1.3 Gravure totale du circuit

Une gravure complète est effectuée pour dessiner les contours finaux du circuit en Si_3N_4 (création des guides d'onde et des autres composants photoniques). Des tests au sein de CEA-LETI et de STMicroélectronique ont permis de déterminer que l'utilisation d'un masque dur permettait de mieux effectuer la gravure complète de nos guides d'onde en nitrure de silicium. En effet, les épaisseurs de résine utilisées sont d'épaisseur standard au sein de STMicroélectronique, où avait lieu la photolithographie. Les épaisseurs de résine accessibles n'étaient pas suffisantes pour bien protéger les zones de Si_3N_4 qui ne doivent pas être gravées. Avec l'utilisation seule de la résine, de fortes sur-gravures sont observées. La largeur des

guides d'onde est donc très en-dessous des valeurs visées. L'ajout d'un masque dur compense ce manque en budget de résine et réduit fortement les problèmes de sur-gravure. Il permet donc de garantir la protection des zones de Si_3N_4 qui ne doivent pas être gravées. De plus, cela permet de mieux respecter le dimensionnement des composants photoniques et améliorer la verticalité de leur flancs (i.e. flancs droits).

Ce masque dur est l'équivalent d'un masque de photolithographie, à l'exception qu'il est formé par la couche d'un matériau solide déposé à la surface du circuit (oxyde) plutôt que d'un masque externe amovible.

Pour générer le masque dur (**Figure 2-22**, étapes 14-22), un dépôt PECVD de 200 nm de SiO_2 TEOS (*TetraEthylOrthoSilicate*) est effectué. L'indice de cet oxyde en fonction de la longueur d'onde est présenté à la **Figure 2-23** (mesures par ellipsométrie au CEA-LETI).

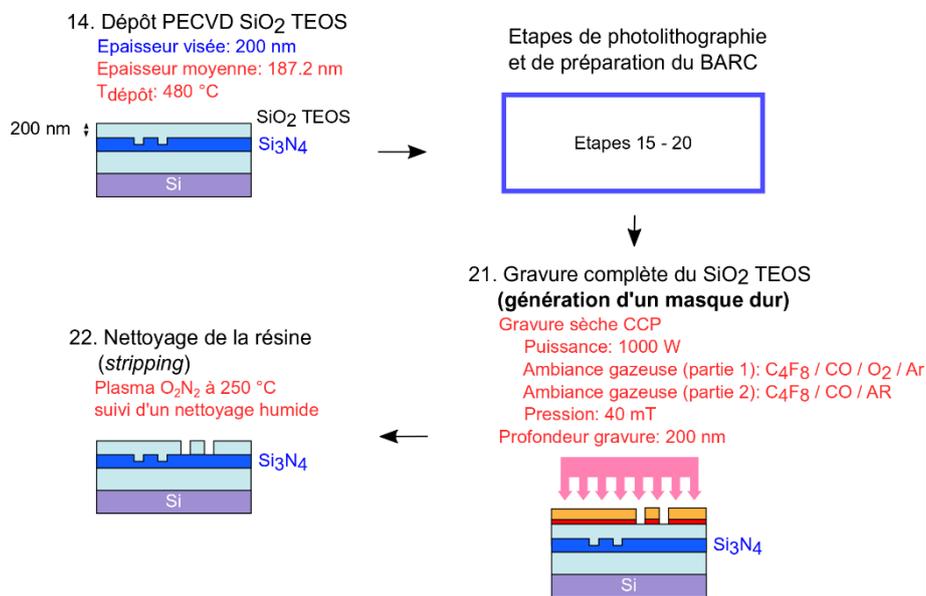


Figure 2-22 Étapes de fabrication du lot 1 pour la création du masque dur.

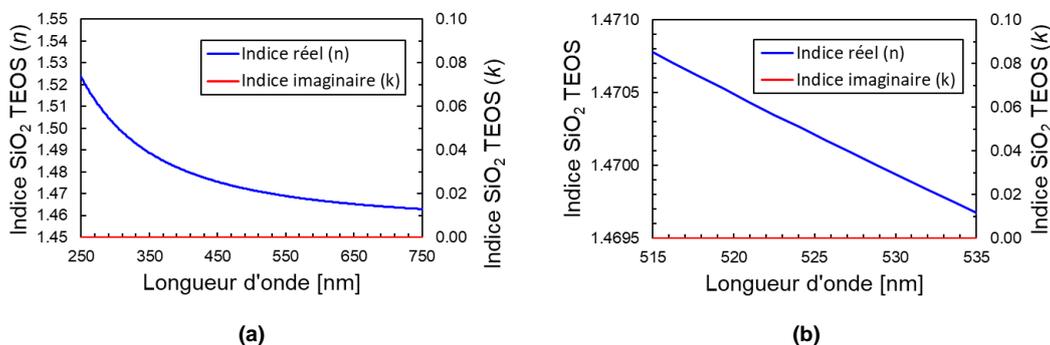


Figure 2-23 Indice de réfraction du dépôt PECVD SiO_2 formé par le TEOS au CEA-LETI mesuré avec un ellipsomètre, a) dans le spectre visible, b) dans la zone d'intérêt du projet (515 – 535 nm).

Un dépôt de résine de photolithographie avec BARC est déposé sur cet oxyde (**Figure 2-22**, étape 15). Ensuite, la résine est exposée et développée (étapes 16-17) comme précédemment aux étapes 6-7. La qualité de la photolithographie est vérifiée par CDSEM (étape 18). La résine

est ensuite renforcée par plasma HBr avant la gravure du BARC (étape 19), comme lors des étapes précédentes lors de la gravure partielle. Les zones d'oxyde qui se retrouvent sans revêtement dessinent les contours des circuits.

L'étude d'optimisation de la dose d'exposition pour la photolithographie est recommencée avant la gravure du masque dur. Dans ce cas, elle est menée sur des motifs de réseaux de diffraction (lignes-espaces plus longs mais toujours espacés de 200 nm). L'étude est aussi menée sur des guides d'onde de 200 nm d'épaisseur et de 300 nm de large (dimensions nominales de nos guides d'onde monomodes). La dose optimale est de 20 mJ, soit 4 mJ de moins que lors de la gravure partielle. Des photos CDSEM des motifs de test sont présentées à la **Figure 2-24**.

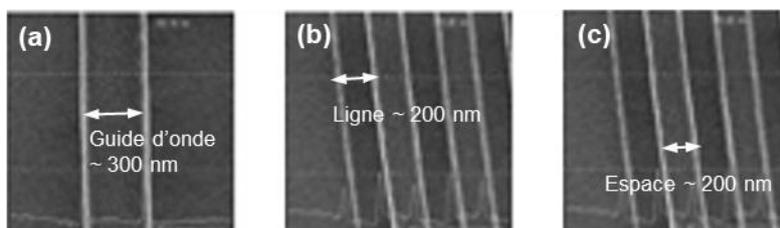


Figure 2-24 Motifs de test ligne-espace observés au CDSEM pour la photolithographie avant la gravure du masque dur, a) guide d'onde 200 nm x 300 nm, b) ligne de 200 nm, c) espace de 200 nm.

Les dimensions des motifs de test ligne-espace pour la photolithographie précédant la gravure du masque dur sont données au **Tableau 2-5**.

Tableau 2-5 Dimensionnements des motifs de test ligne-espace mesurés au CDSEM pour la photolithographie précédant la gravure du masque dur.

Plaque	P02		
	Guide d'onde	Ligne	Espace
Largeur théorique (nm)	300	200	200
Largeur mesurée minimale (nm)	321.7	213.0	190.9
Largeur mesurée maximale (nm)	327.7	215.3	193.4
Largeur moyenne (nm)	324.0	214.3	191.9

A partir de l'étape 21, une gravure sèche CCP (*Capacitively Coupled Plasma*) est effectuée. Elle permet de faire une gravure complète de l'oxyde là où la résine et le BARC ont été enlevés. Elle ne grave pas la couche de Si₃N₄. L'oxyde gravé réplique alors les contours du masque de photolithographie et représente le masque dur utilisé pour la suite.

La gravure CCP fait aussi partie de la catégorie des gravures RIE, comme les gravures ICP précédentes. Dans la gravure CCP, le plasma a une faible densité. Toutefois, les ions qui le composent ont de fortes énergies. Cela permet de faire une gravure beaucoup plus physique que chimique à l'aide d'un fort bombardement ionique [21][22].

Les résidus de la gravure de l'oxyde (résine, BARC et fragments d'oxyde TEOS) sont nettoyés à l'aide d'une étape de nettoyage (étape 22). Ce nettoyage est effectué par un plasma de O₂N₂ à 250 °C. Il est complété par un nettoyage humide.

Une gravure sèche ICP est ensuite directement effectuée sur les plaques à l'aide du masque dur (**Figure 2-25**, étape 23). Le masque dur est peu consommé pendant la gravure complète de la couche de nitrure. Cette gravure est suivie d'un simple nettoyage humide (non représenté sur les schémas).

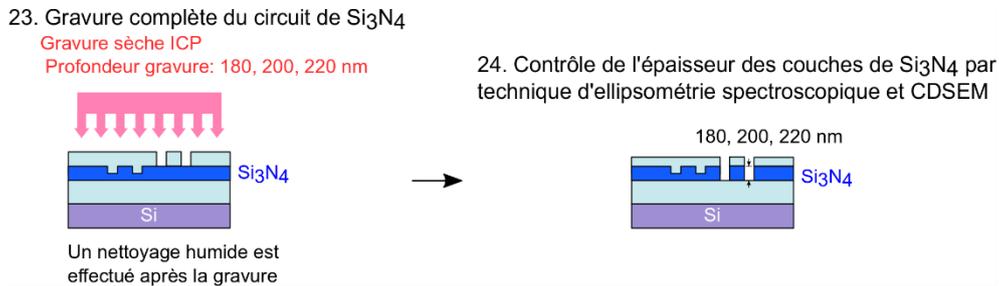


Figure 2-25 Etapes de fabrication du lot 1 pour la gravure complète formant le circuit photonique de Si_3N_4 .

Les gravures partielles n'ont pas besoin de masque dur, contrairement aux gravures complètes. Dans la fabrication du lot 1, la gravure partielle est donc effectuée avant la gravure complète du circuit. Si on inversait l'ordre des étapes de gravure (i.e. gravure complète avant la gravure partielle), alors le masque dur de la gravure complète pourrait gêner la gravure partielle. Cette dernière serait faite en deux fois (d'abord une gravure du masque dur préexistant puis gravure partielle) au lieu d'être effectuée en une seule étape (gravure partielle directe). Cela pourrait augmenter le risque d'erreur pour le respect des dimensionnements et des profondeurs de gravure.

Les circuits des plaques du lot 1 ont été complètement fabriqués deux fois. La première fois, il y a eu une erreur de fabrication. La gravure complète a été effectuée en une seule fois par la gravure sèche CCP (étapes 21 et 23 combinées), sans effectuer l'étape intermédiaire de nettoyage (étape 22) entre la gravure du masque dur et celle du circuit (Si_3N_4). L'oubli de l'étape 22 et l'utilisation du plasma CCP au lieu de l'ICP pour la gravure du Si_3N_4 ont causé des défauts de fabrication. En effet, la résine de photolithographie, l'épaisseur de BARC et les résidus de la gravure du masque dur n'ont pas été enlevés avant la gravure de la couche de Si_3N_4 . Ils ont gêné la gravure de cette dernière. Ceux-ci, combinés à l'erreur du type de gravure, ont causé une pente des flancs des composants du circuit. En théorie, ces flancs sont prévus pour être droits. De plus, l'erreur de fabrication a causé une forte rugosité de surface aux guides et des irrégularités (trous) sont visibles sur les composants. Ces défauts participent à augmenter les pertes de propagation des guides d'onde et à induire un fonctionnement des composants différent de celui attendu suite à leur conception et à leur simulation numérique. La deuxième itération de fabrication des circuits du lot 1 s'est effectuée sans défaut dans le suivi des étapes de fabrication. Pour la suite, la seconde itération du lot 1 sera référée par le terme « lot 1* ».

Les photos MEB suivantes montrent les circuits de la première itération de fabrication du lot 1 (avec défauts).

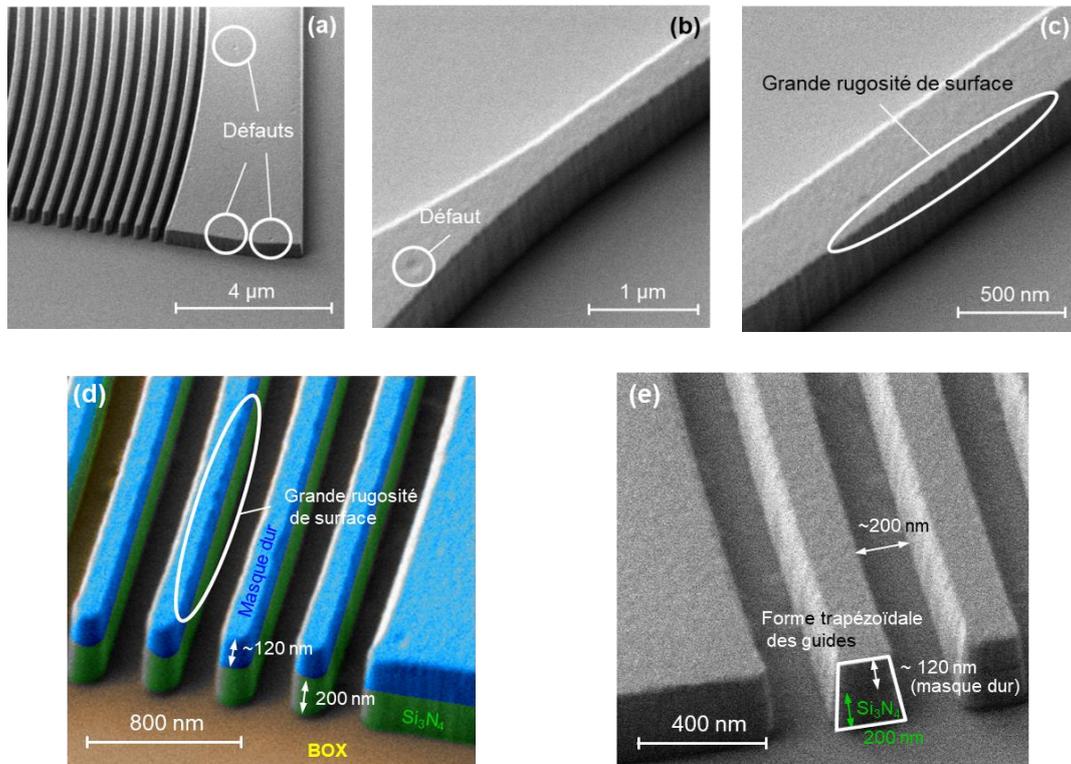


Figure 2-26 Photos MEB de la première itération de fabrication du lot 1 (avec défauts), a) défauts (trous) sur un coupleur par réseau formés par des résidus de gravure du masque dur, b) défaut à la jonction coupleur-guide monomode, c) rugosité de surface sur les flancs des guides d'onde, d) mise en évidence de la rugosité de surface dans la zone du réseau de couplage avec le masque dur (bleu), le Si_3N_4 (vert) et le BOX (jaune-orange), e) mise en évidence que les flancs des guides ne sont pas droits mais plutôt de forme trapézoïdale.

Les photos MEB suivantes montrent l'équivalent des circuits précédents sans défaut de fabrication sur une plaque de test de la première itération du lot 1. L'épaisseur des guides y est supérieure à celle prévue sur le lot 1. En effet, cette plaque était destinée à un autre projet associé au laboratoire avec lequel le masque de photolithographie est partagé. Ces photos sont représentatives de la qualité de fabrication de la deuxième itération du lot 1 (i.e. le lot 1*). Toutefois, dû à des contraintes de temps, aucune photo MEB ou CDSEM n'a été effectuée du lot 1*. A la **Figure 2-27**, on peut remarquer que sans l'oubli de l'étape de nettoyage (étape 22) et avec la technique de gravure appropriée, les rugosités de surface des guides (côtés) et du masque dur (surface supérieure) sont bien meilleures. De plus, les flancs des guides sont mieux définis (i.e. les flancs sont droits). Cette rugosité n'a toutefois pas été évaluée quantitativement. Les mesures CDSEM et par ellipsométrie spectroscopique dans la suite de cette section sont données pour la seconde itération de fabrication du lot 1.

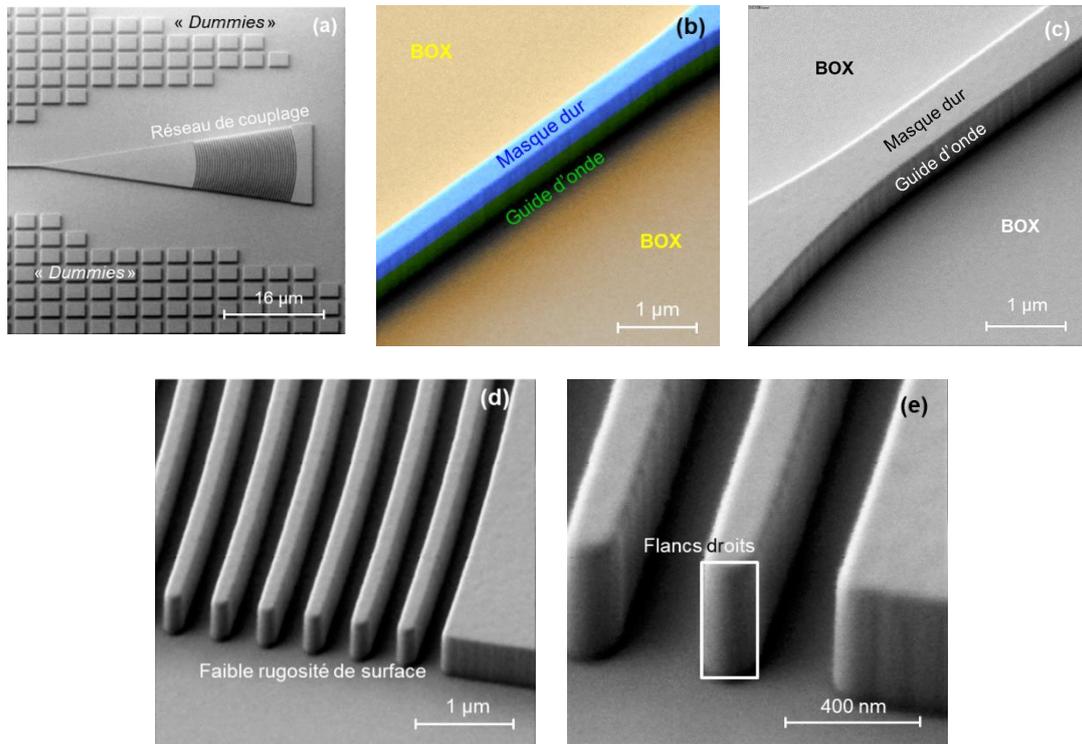


Figure 2-27 Photos MEB d'une plaque test de la première itération de fabrication du lot 1 (sans défaut), a) coupleur par réseau entouré de *dummies*, b) guide d'onde monomode avec une faible rugosité de surface apparente, c) guide d'onde plus large qu'en (b) permettant de mieux observer la faible rugosité de surface du guide et du masque dur rémanent, d) et e) coupleur par réseau dont les lignes ont une apparence lisse et des flancs droits, contrairement aux lignes trapézoïdales observées sur les plaques avec un défaut de fabrication.

Les épaisseurs des couches ont été mesurées après la gravure totale du Si_3N_4 à l'aide de l'ellipsométrie spectroscopique (**Tableau 2-6**). Toutefois, les mesures CDSEM vérifiant les dimensions des guides d'onde n'ont pas été effectuées après la gravure totale (**Figure 2-25**, étape 25) afin d'obtenir un gain de temps sur la fabrication des échantillons.

Tableau 2-6 Epaisseurs des guides d'onde en Si_3N_4 après la gravure totale de la couche du circuit dans les zones protégées par le masque dur. Les mesures sont effectuées par ellipsométrie spectroscopique sur plusieurs plaques.

Plaque	P01	P04	P07	P10	P12	
Épaisseur théorique des guides d'onde Si_3N_4 (nm)	200	180	200	200	200	
Épaisseur minimale mesurée après gravure totale (nm)	193.2	175.4	194.4	194.2	194.1	
Épaisseur maximale mesurée après gravure totale (nm)	198.1	179.7	198.9	198.6	198.6	
Épaisseur moyenne mesurée après gravure totale (nm)	195.9	177.9	196.7	196.7	196.7	
Ecart-type σ (nm) pour la gravure totale	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9	
Ecart-type σ (%) pour la gravure totale	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	
Δ (épaisseur visée – épaisseur mesurée moyenne)	(nm)	4.1	2.1	3.3	3.3	3.3
	(%)	2.1	1.2	1.7	1.7	1.7

Au **Tableau 2-6**, on observe que la gravure complète n'a pas traversé le masque dur. En effet, les couches de Si_3N_4 sont restées intactes dans les zones formant les circuits. Les épaisseurs des circuits sont donc conformes à ce qui était attendu car elles sont identiques à celles obtenues lors des dépôts LPCVD au début des étapes de fabrication et aux valeurs théoriques visées. En moyenne, l'écart entre les épaisseurs finales mesurées et théoriques de Si_3N_4 est

de 1.6 %. L'épaisseur de BOX sous les zones du circuit est de 2064 nm avec un écart-type de 1.3 nm. Dans les zones sans masque dur (i.e. masque dur préalablement gravé), le Si_3N_4 a été complètement gravé. La gravure complète a légèrement continué à graver les plaques après la couche de Si_3N_4 . En effet, l'épaisseur résiduelle de BOX où le Si_3N_4 a été complètement gravé est de 2058 nm avec un écart-type de 1 nm pour l'ensemble des plaques. Cette épaisseur est donc 6 nm inférieure à celle sous les circuits photoniques. De plus, l'épaisseur du masque dur (initialement 200 nm de SiO_2 TEOS) est diminuée d'environ 80 nm suite à la gravure totale (environ 120 nm restant au-dessus du nitrure de silicium).

2.3.1.4 Encapsulation et observation des circuits au FIB

Le circuit photonique est ensuite encapsulé (**Figure 2-28**, étape 25) par l'oxyde SiO_2 obtenu par dépôt de silane HDP (Plasma Haute-Densité). Cette encapsulation permet de diminuer la variation d'indice (Δn) entre le guide et son environnement extérieur par rapport à l'exposition directe du circuit à l'air ambiant. En effet, le SiO_2 entourant le circuit a un indice plus élevé ($n = 1.46$ à $\lambda = 532$ nm) que l'air ($n \approx 1$) et se rapproche davantage de l'indice du Si_3N_4 ($n \approx 2$). Une réduction de Δn permet de réduire les pertes de propagation du circuit. De plus, l'encapsulation protège physiquement les circuits de l'environnement extérieur (chocs, égratignures...).

Un polissage CMP (Planarisation Mécano-Chimique) permet d'aplanir l'encapsulation. Toutefois ce polissage enlève près de 620 nm de l'épaisseur de l'encapsulant. L'épaisseur résiduelle d'oxyde au-dessus des guides est de 200 nm en moyenne. Cette encapsulation est formée par le masque dur et le dépôt HDP poli. La planéité de l'encapsulation est essentielle pour le dépôt et la gravure de couches additionnelles (ex : circuits multi-niveaux, électrodes etc.).

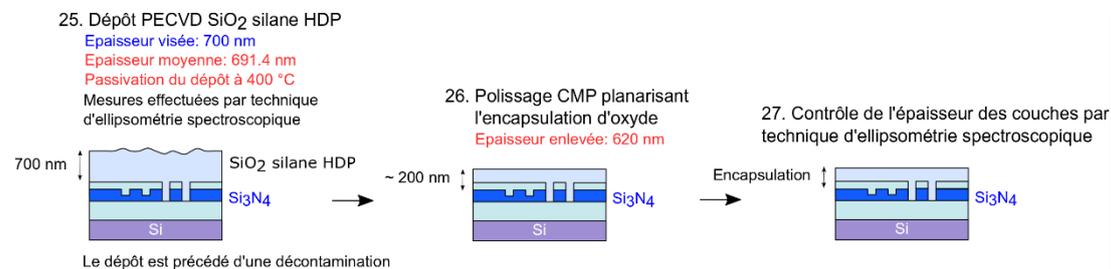


Figure 2-28 Etapes de fabrication du lot 1 pour la planarisation de l'encapsulation d'oxyde au-dessus des circuits.

L'indice de l'oxyde SiO_2 obtenu par le dépôt silane HDP (1.4634 à $\lambda = 532$ nm) est légèrement inférieur à celui obtenu par dépôt TEOS (1.4698 à $\lambda = 532$ nm). L'indice de cet oxyde en fonction de la longueur d'onde est présenté à la **Figure 2-29** (mesures par ellipsométrie au CEA-LETI).

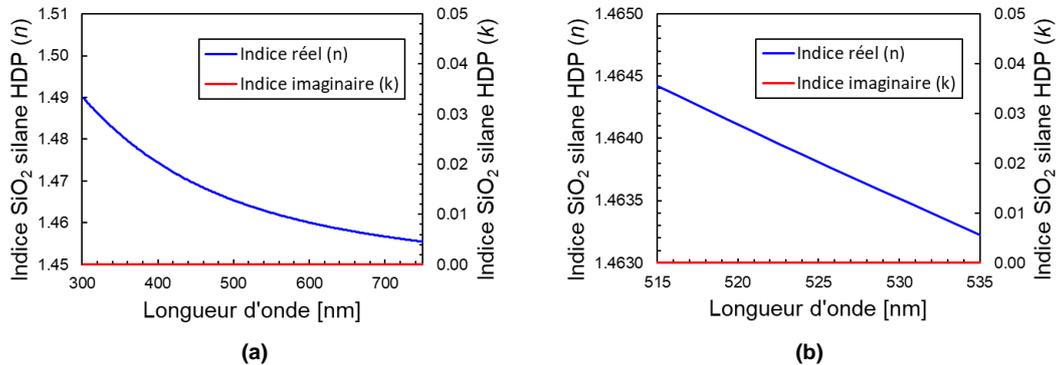


Figure 2-29 Indice de réfraction du dépôt SiO₂ formé par le silane HPD au CEA-LETI mesuré avec un ellipsomètre, a) dans le spectre visible, b) dans la zone d'intérêt du projet (515 – 535 nm).

L'oxyde TEOS est généralement déposé en faibles épaisseurs. Il ne permet pas de combler les grands espaces entre les guides d'onde. Toutefois, il permet de former une fine pellicule protectrice qui enveloppe les guides d'onde sans les endommager lors de son dépôt. Cette pellicule protège la surface des guides lors de dépôts d'oxyde complémentaires, tel que le HDP. Ce dernier permet de remplir les interstices entre les guides d'onde. L'oxyde HDP peut être déposé en grandes épaisseurs. Toutefois, il peut endommager les guides d'onde si ceux-ci ne sont pas préalablement protégés par l'oxyde TEOS. Cette combinaison de dépôts d'oxyde permet également de réduire les défauts (trous, eau) présents dans l'oxyde à proximité des guides. Ces défauts peuvent participer à augmenter les pertes de propagation des guides en interagissant avec le champ évanescent des modes guidés.

L'étape 28 est la dernière étape de fabrication des plaques P01-10.

L'empilement final des couches des plaques du lot 1* a été observé au FIB, tel que présenté à la **Figure 2-30**. On peut également y observer la coupe transversale des guides d'onde. Une couche de platine (couche claire déposée au-dessus de l'encapsulation d'oxyde) permet d'évacuer les ions pour éviter que les charges ne s'accumulent sur les matériaux diélectriques et ne perturbent l'acquisition d'images.

Les photos au FIB montrent que les guides d'onde sont peu trapézoïdaux (i.e. les flancs sont gravés quasi-droits). Dans le cas du réseau de couplage, les dimensions prévues des blocs de Si₃N₄ sont de 200 nm x 200 nm. Ils doivent être répétés avec une période de 400 nm. Les mesures sur les photos FIB à la **Figure 2-30 (a)** montrent que les flancs de ces blocs ont été sur-gravés d'environ 20 à 40 nm. Toutefois, la période entre les blocs est relativement bien respectée (410 nm mesuré vs 400 nm visé).

Dans le cas des distributions de guides d'onde, les dimensions visées des guides monomodes nominaux sont de 200 nm x 300 nm. Ceux-ci doivent être distants de 1.5 μ m. A la **Figure 2-30 (b)**, on remarque que l'espacement entre les guides d'onde est bien respecté. Bien que la largeur des guides semble aussi correspondre à la valeur visée (305 nm mesuré vs 300 nm visé), les mesures sur les photos FIB montrent que les guides d'onde semblent plus épais que prévu (225 nm mesuré vs 200 nm visé). Toutefois, la position de la bordure supérieure des guides d'onde est difficile à estimer sur les photos, ce qui peut fausser légèrement la mesure de leur épaisseur.

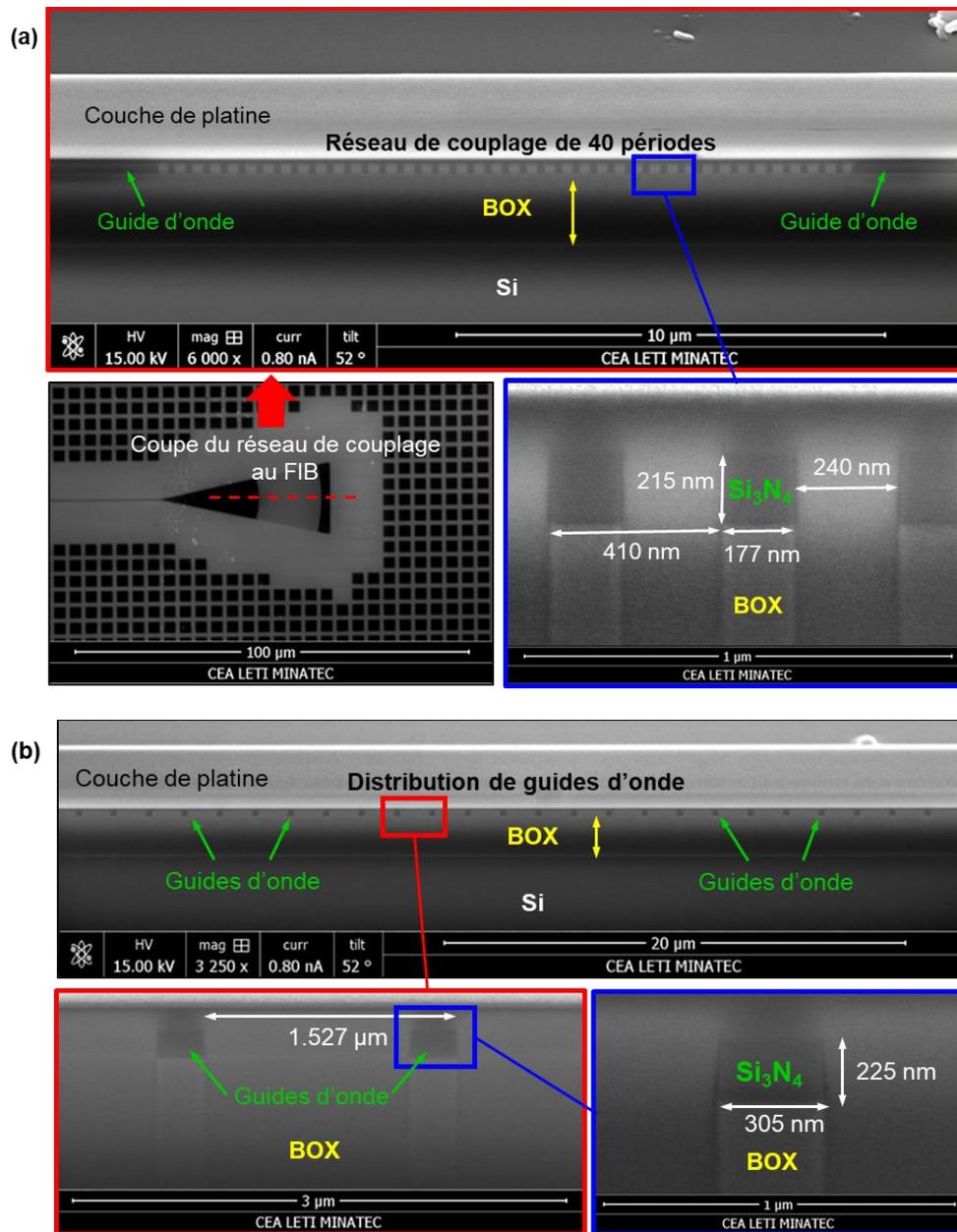


Figure 2-30 Photos FIB de l'empilement des couches des plaques sans composants actifs, a) réseau de couplage, b) distribution de guides d'onde. Les photos ont été acquises sur les plaques P02 et P09 du lot 1* (i.e. épaisseur nominale du circuit à 200 nm).

2.3.1.5 Fabrication des chaufferettes

Les plaques P11-12 sont utilisées pour tester des circuits photoniques actifs. Il s'agit de circuits au-dessus desquels sont déposés et contrôlés électriquement des chaufferettes. La variation de température au-dessus des guides induit un effet thermo-optique qui permet de modifier l'indice effectif perçu localement par un composant photonique du circuit. Cette propriété est utilisée notamment pour faire des commutateurs optiques à l'aide des interféromètres de Mach-Zehnder.

L'ajout de chaufferettes et de leurs connexions électriques nécessitent des étapes de fabrication supplémentaires décrites ci-dessous. La plupart de ces étapes sont redondantes avec les précédentes (dépôt de résine, exposition, développement, gravure, nettoyage). La principale différence est la gamme de matériaux utilisées pour cette nouvelle partie : Ti, TiN, W (tungstène) et AlCu.

La **Figure 2-31** présente les étapes pour la conception de chaufferettes faites en Ti / TiN. La fabrication des tranchées d'isolation thermique autour des chaufferettes n'est pas représentée.

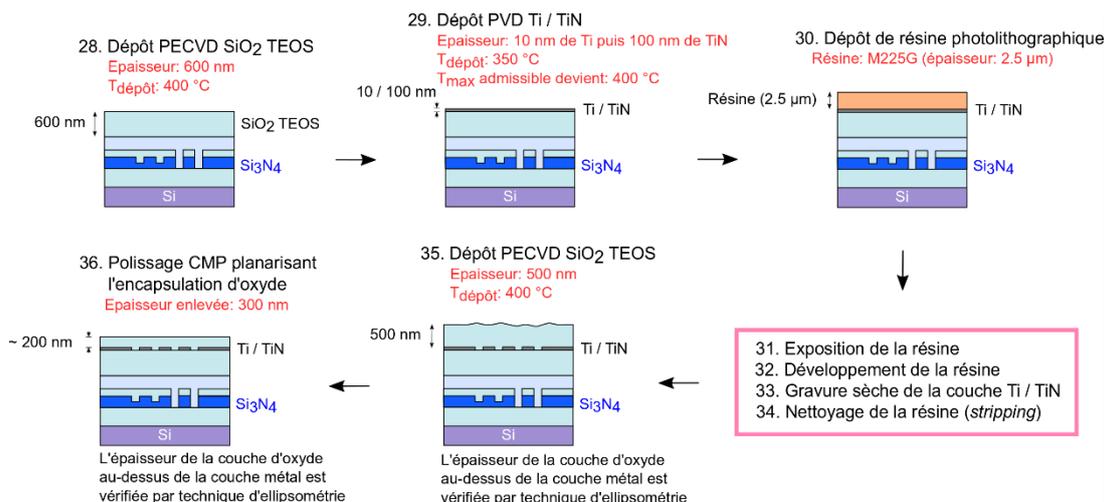


Figure 2-31 Premières étapes de fabrication pour la création de chaufferette sur les circuits actifs du lot 1*.

Les chaufferettes sont encapsulées par une couche d'oxyde. Elles sont ensuite connectées à la surface des plaques à l'aide de vias de tungstène. Des dépôts additionnels de Ti / TiN et de AlCu permettent de faire les connexions électriques finales pour alimenter les chaufferettes. Les dépôts de AlCu qui forment les électrodes d'alimentation sont recouvertes de Ti / TiN pour éviter qu'elles ne s'oxydent. Les détails de fabrication de ces vias et des connexions électriques en surface des plaques sont représentés schématiquement à la **Figure 2-32**.

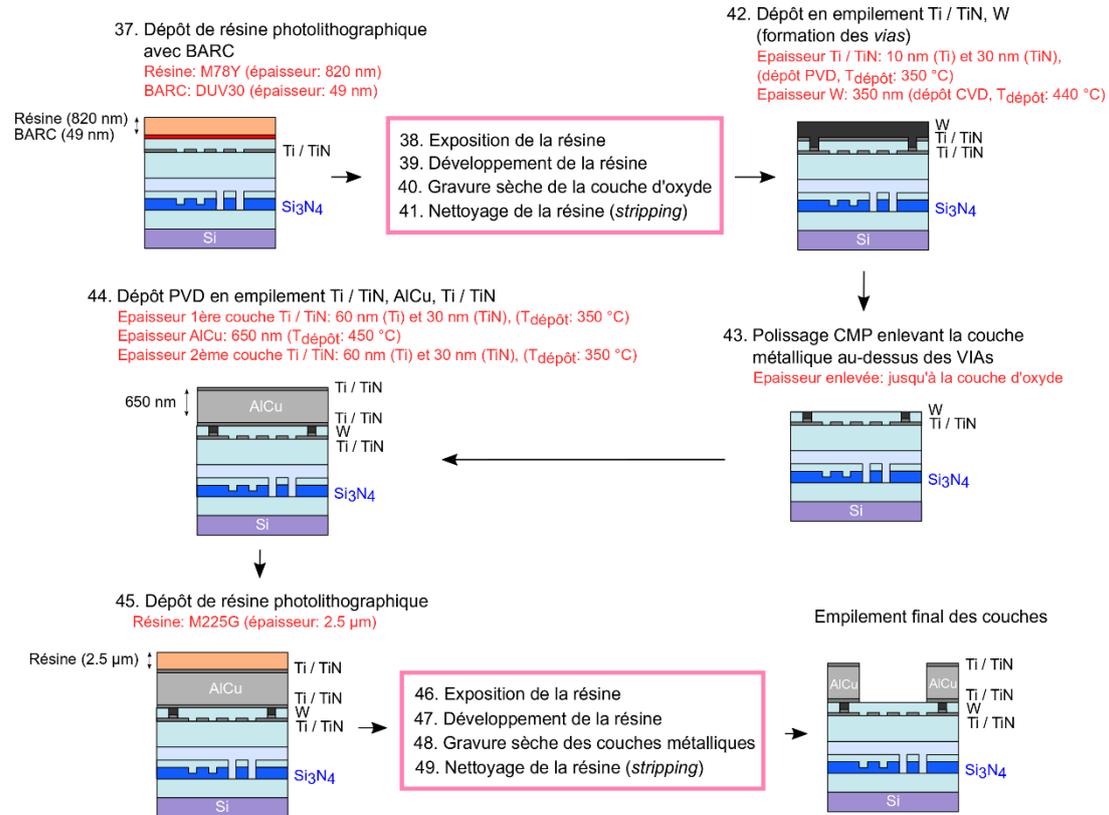


Figure 2-32 Etapes finales de fabrications pour la création des vias et des connecteurs électriques en surface des plaques pour les circuits actifs du lot 1.

La caractérisation expérimentale du fonctionnement des circuits fabriqués est effectuée au chapitre 3 **Résultats**.

2.3.2 Fabrication du lot 2

Le concept de projection rétinienne du CEA-LETI nécessite d'étudier l'interaction entre les circuits photoniques intégrés et des hologrammes analogiques. Pour ce faire, le circuit photonique doit être entièrement transparent. Sa transparence permettra l'enregistrement de l'hologramme déposé à sa surface. De plus, la transparence du circuit est un point majeur pour viser des applications de réalité augmentée. En effet, le circuit photonique sur les lunettes RA doit pouvoir permettre à l'observateur de voir son environnement extérieur tout en projetant des images sur sa rétine. Les plaques sur lesquelles sont fabriqués les circuits du premier lot ne sont pas transparentes. Les guides d'onde (Si_3N_4) et l'oxyde autour (SiO_2) laissent passer la lumière visible mais pas le substrat de base (Si) qui est opaque.

On vise donc la fabrication d'un nouveau circuit complètement transparent (lot 2) pour tester spécifiquement l'interaction « guide d'onde – hologramme ». Ce circuit permettra également d'évaluer l'impact des circuits photoniques sur la transparence du dispositif de projecteur rétinien. Pour ce faire, le substrat de Si est remplacé par un substrat de verre. La mise en transparence de circuits photoniques Si_3N_4 depuis un substrat opaque est une réalisation technique qui a déjà été démontrée dans la littérature [23].

La première partie des étapes de fabrication des circuits du lot 2 suit les étapes classiques de fabrication des circuits photoniques en Si_3N_4 sur substrat opaque en silicium. Il n'est pas recommandé d'utiliser un substrat transparent dans les étapes de fabrication initiales. Cela peut causer des problèmes de détection et d'alignement des plaques sur les machines de photolithographie ou nécessiter l'utilisation de techniques d'opacification des plaques complexifiant les procédés de fabrication.

Dans une deuxième partie, le substrat de silicium de chaque plaque doit être retiré après un report sur un substrat de verre. Le retrait du silicium nécessite l'utilisation d'une couche d'arrêt. Celle-ci est conçue dans la première partie de la fabrication.

2.3.2.1 Fabrication du circuit (partie 1)

La première partie reproduit majoritairement les étapes de fabrication présentées pour le premier lot. Les machines utilisées en salle blanche sont identiques à celles utilisées dans la conception du premier lot, à l'exception des machines de photolithographie. En effet, la collaboration entre le CEA-LETI et STMicroélectronique n'a pas été renouvelée pour notre projet suite aux délais de fabrication induits par ce dernier. La photolithographie s'est donc effectuée en interne au CEA-LETI sur la machine ASM300. Celle-ci limite toutefois la résolution de fabrication à environ 250 nm. La taille de certains composants a été revue à la hausse pour s'adapter à cette nouvelle résolution.

La partie 1 commence par la conception des marques d'alignement, tel que présenté à la sous-section précédente. Elles sont recouvertes par une couche d'oxyde thermique en SiO_2 . Cette couche a une épaisseur de 500 nm (**Figure 2-33**). Elle est moins épaisse que le BOX déposé dans le premier lot (2 μm). Dans le cas du lot 2, l'oxyde va séparer le substrat de Si et une couche d'arrêt en Si_3N_4 plutôt que la couche de guidage.

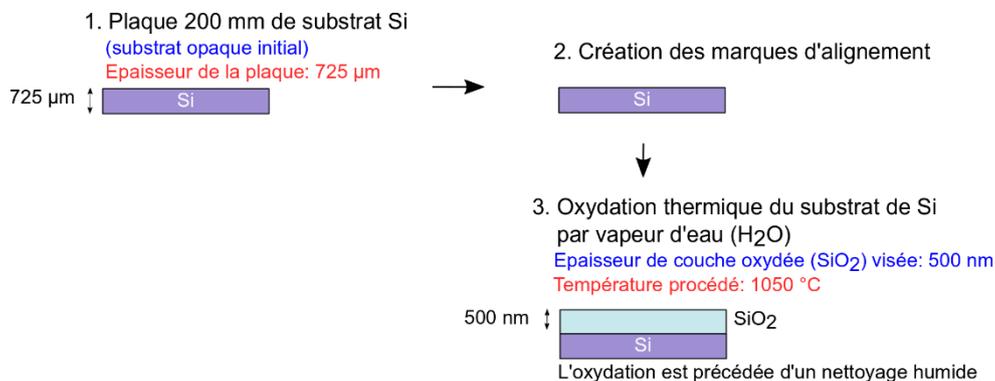
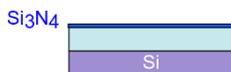


Figure 2-33 Etapes 1 à 3 de la première partie de la fabrication du lot 2.

Une couche d'arrêt de Si_3N_4 est déposée sur la couche d'oxyde thermique (**Figure 2-34**). La couche d'arrêt sert à mieux contrôler l'épaisseur de SiO_2 résiduelle au-dessus des guides d'onde suite au procédé de transfert sur substrat transparent et à l'élimination du substrat initial en Si. La couche d'arrêt a une épaisseur visée de 30 nm. Cette couche doit être suffisamment mince pour ne pas guider la lumière et ne pas interférer avec le circuit de guides d'onde du lot 2 lors des tests de fonctionnement sur des plaques opaques (ex : mesure des pertes de propagation des guides d'onde etc.). Suite à la mise en transparence des plaques, cette couche n'a plus d'impact sur le fonctionnement du circuit.

4. Dépôt Si_3N_4 LPCVD pour former une couche d'arrêt

Épaisseur: 30 nm
 Température procédé: 780 °C
 Ambiance gazeuse: $\text{NH}_3 / \text{SiH}_2\text{Cl}_2$ (ratio 5:2)
 Pression: 190 mTorr



L'épaisseur de dépôt est vérifiée par technique d'ellipsométrie spectroscopique

Figure 2-34 Etape 4 de la partie 1 de la fabrication du lot 2. Dépôt d'une couche d'arrêt de 30 nm d'épaisseur.

La couche d'arrêt est ensuite encapsulée par du SiO_2 TEOS. Le rôle de ce dépôt d'oxyde est de séparer la couche d'arrêt et la couche de guidage (couche de Si_3N_4 plus épaisse). Cette distance de séparation est variée en déposant des couches de SiO_2 de différentes épaisseurs (20, 50, 100, 200 nm). Ensuite, la couche de guidage est déposée sur le SiO_2 TEOS selon différentes épaisseurs (180 ou 200 nm), tel que montré à la Figure 2-35.

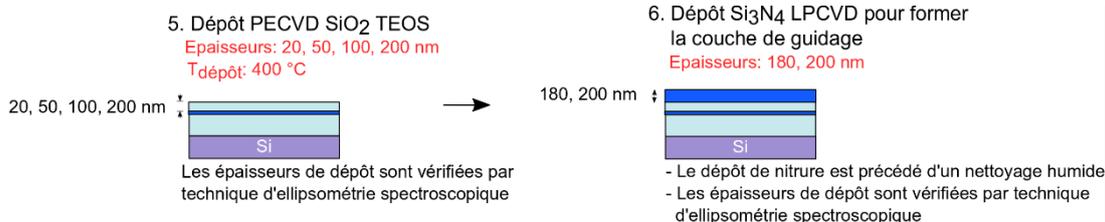


Figure 2-35 Dépôts de SiO_2 TEOS puis de la couche de guidage en Si_3N_4 selon différentes épaisseurs sur le lot 2.

Il y a plusieurs variantes de dépôts pour la conception du lot 2. Ces variantes sont effectuées sur 18 plaques et sont résumées au Tableau 2-7. Chaque plaque est effectuée en double afin de compenser d'éventuels problèmes de fabrication.

Tableau 2-7 Variantes sur les épaisseurs des différentes couches de dépôt du lot 2. Les plaques P17 et P18 sont dédiées à la caractérisation des circuits avant la mise en transparence des plaques. La caractérisation A correspond à la caractérisation avant l'encapsulation des guides d'onde (CDSEM, MEB). La caractérisation B correspond à celle après l'encapsulation (FIB).

Plaque	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
Épaisseur couche de guidage en Si_3N_4 (nm)	180	180	200	200	180	180	200	200	180	180	200	200	180	180	200	200	200	200
Dépôt d'oxyde entre la couche d'arrêt et la couche de guidage (nm)	20	20	20	20	50	50	50	50	100	100	100	100	200	200	200	200	200	200
Épaisseur couche d'arrêt en Si_3N_4 (nm)	30																	
Épaisseur BOX (nm)	500																	
Mise en transparence	Oui																Non	
Utilisation	Etude de la mise en transparence des plaques et interaction « guide d'onde – hologramme »																Caractérisation A	Caractérisation B

Ensuite, les plaques suivent un procédé standard de photolithographie pour exposer et graver la couche de guidage en Si_3N_4 et former les circuits selon le masque de photolithographie du lot 2. Ce procédé est identique à celui utilisé pour la gravure complète de la couche de guidage en Si_3N_4 dans le lot 1*. Les guides d'onde sont ensuite encapsulés. Cette encapsulation est par la suite polie par CMP (**Figure 2-36**).

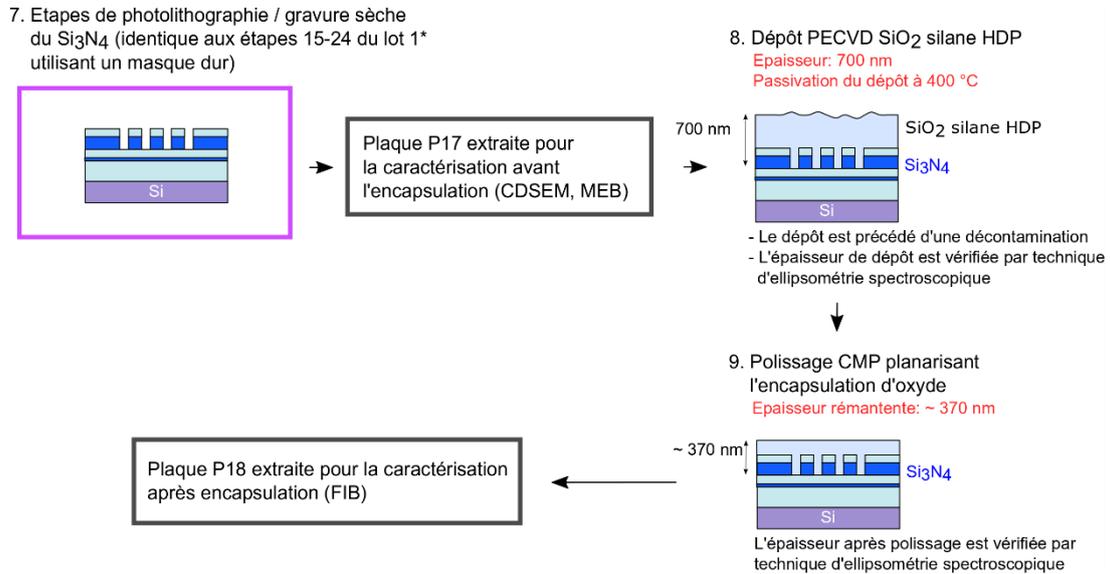


Figure 2-36 Etapes de fabrication pour la photolithographie, la gravure puis l'encapsulation du circuit du lot 2. Des sous-étapes servent à extraire des plaques du lot principal pour entamer la caractérisation avant la mise en transparence de celles-ci.

2.3.2.2 Report sur substrat transparent (partie 2)

L'étape 9 est la dernière étape de la partie 1. La partie 2 commence donc à l'étape 10. Celle-ci correspond à la création d'une « poignée de verre ». Il s'agit d'un substrat de verre qui a été opacifié afin de pouvoir le manipuler durant les étapes de collage avec les plaques des circuits (substrats de Si). L'opacification est réalisée à l'aide du dépôt d'une fine couche de Ti (100 nm). Celle-ci est encapsulée par une couche de Si_3N_4 (500 nm) dont le rôle est de protéger cette couche opacifiante de l'oxydation et des éventuels chocs physiques lors de la manipulation de la poignée en salle blanche.

Un recuit est effectué avant le collage entre les deux types de plaques (poignée de verre et circuit sur substrat Si). Ce recuit permet d'éliminer l'humidité résiduelle présente à la surface de l'encapsulation d'oxyde au-dessus des circuits. Cette humidité pourrait nuire à la qualité du collage entre les deux plaques.

Après le recuit de séchage, un collage direct hydrophile (collage moléculaire) permet d'associer les deux plaques ensemble. Les surfaces des plaques doivent être suffisamment planes pour pouvoir effectuer ce type de collage. Celui-ci est donc précédé d'un polissage CMP. Le collage est ensuite consolidé à l'aide d'un nouveau recuit. Les premières étapes de la partie 2 sont schématisées à la **Figure 2-37**.

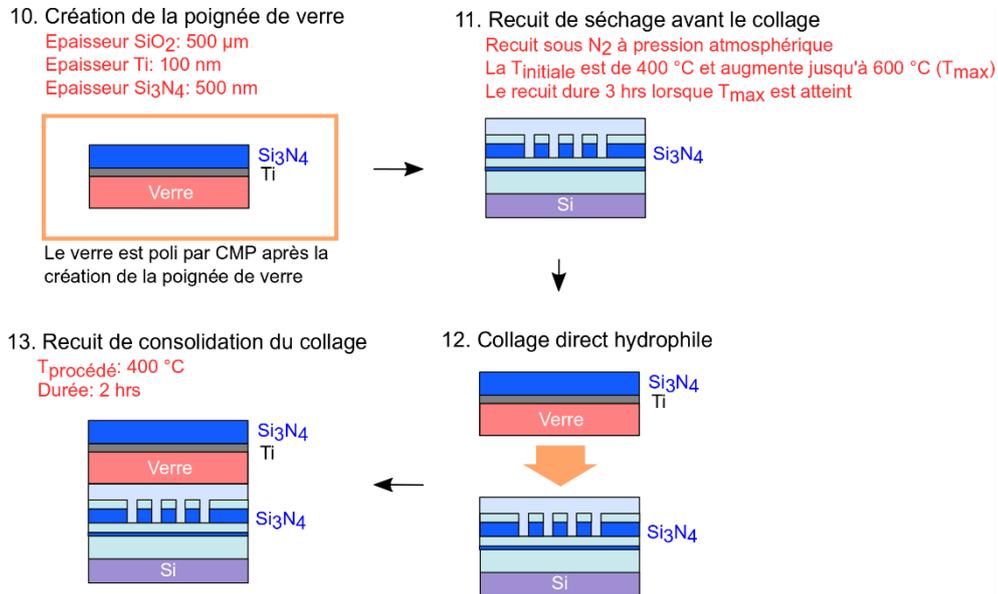


Figure 2-37 Premières étapes de la partie 2 pour la création d'un circuit sur substrat transparent, incluant le collage moléculaire entre la poignée de verre et la plaque en substrat de Si.

Le sens des plaques est ensuite inversé (retournement de plaque) suite au collage de la poignée de verre. Cela permet d'éliminer la couche du substrat de Si à l'aide d'une série de gravures mécaniques (*grinding*) et d'une gravure humide (**Figure 2-38**). La couche d'oxyde sous-jacente (500 nm) est également enlevée (gravure sèche CCP). La gravure s'arrête à la couche d'arrêt. Cette dernière est ensuite enlevée (gravure sèche CCP). L'oxyde au-dessus de la couche de guidage en Si₃N₄ est conservé.

Finalement, la plaque est de nouveau retournée afin d'enlever la couche opacifiante par gravure sèche.

A la fin de l'étape 17, les plaques sont donc complètement transparentes.

Les plaques du lot 2 seront ensuite soit utilisées directement pour l'étude « guide d'onde – hologramme » ou subiront d'éventuelles étapes de fabrication supplémentaires. Ces perspectives sont schématisées à la **Figure 2-40**.

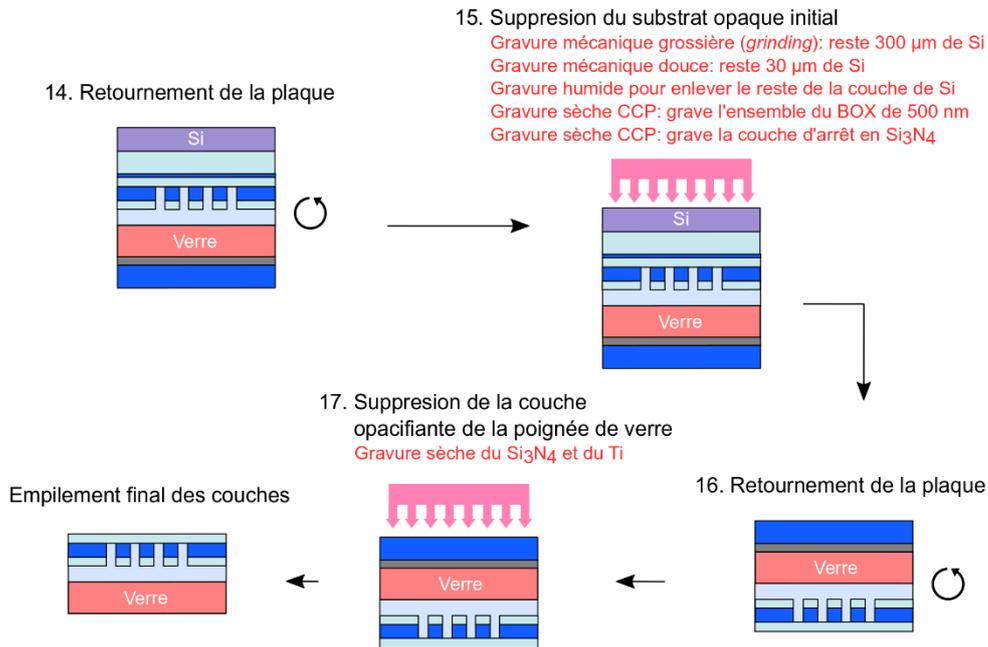


Figure 2-38 Elimination des couches opaques des plaques (substrat de Si et couche opacifiante de la poignée de verre).

Si elles sont utilisées directement pour notre étude holographique (étape 18A), un matériau holographique sera déposé sur l'encapsulation des guides d'onde. Cette couche d'encapsulation doit avoir plusieurs épaisseurs (voir étape 5) pour que l'hologramme soit plus ou moins en contact direct avec le champ évanescent des modes guidés dans les guides d'onde. Le champ électrique principal (E_x) du mode fondamental en polarisation TE de notre guide d'onde monomode nominal est présenté à la **Figure 2-39**. La référence des axes est celle donnée à la **Figure 2-2**.

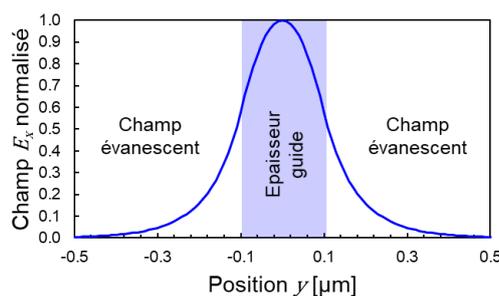


Figure 2-39 Champ électrique principal (E_x) du mode fondamental TE selon l'axe y (axe vertical) de notre guide d'onde monomode nominal. Le guide a une épaisseur de 200 nm, une largeur de 300 nm, son indice est $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2.03$ et son encapsulant a un indice $n_{\text{SiO}_2} = 1.46$ à $\lambda = 532$ nm.

Il devrait aussi être possible d'ajouter un second niveau de circuit photonique au premier. Ce second niveau permettrait d'ajouter des composants qui serviraient à diriger l'émission de lumière du circuit photonique initial vers la couche holographique selon différentes configurations (ex : anneaux de résonance, coupleurs par cristaux liquides etc.).

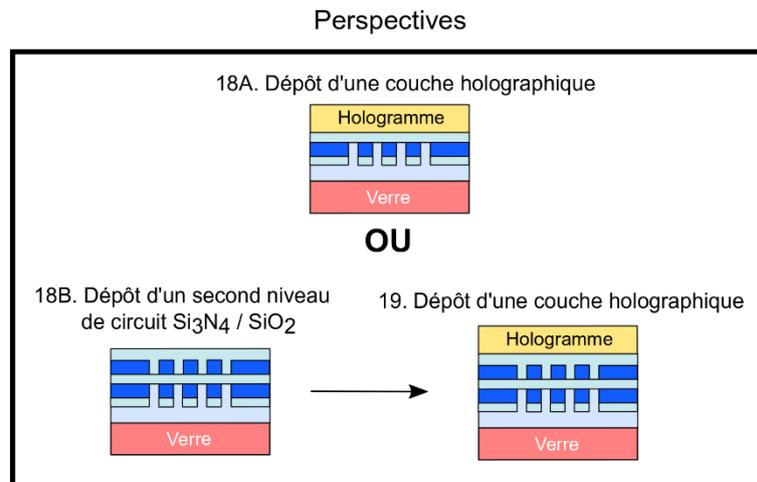


Figure 2-40 Perspectives sur de futures étapes de fabrication du lot 2 et le dépôt d'hologramme à sa surface.

2.3.2.3 Début de la fabrication du lot 2

La fabrication du lot 2 a été entamée à la fin de la thèse. Des mesures au CDSEM ont permis de caractériser la gravure du masque dur précédant la gravure des guides d'onde. Ces mesures ont montré que le masque a subi une forte sur-gravure et présente une grande rugosité de surface. En effet, les zones du masque qui recouvrent les futurs guides d'onde ont une largeur de $200 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm}$. La valeur visée est plutôt de 300 nm , ce qui correspond à la largeur nominale des guides d'onde monomodes. Cette erreur de gravure est montrée à la **Figure 2-41**.

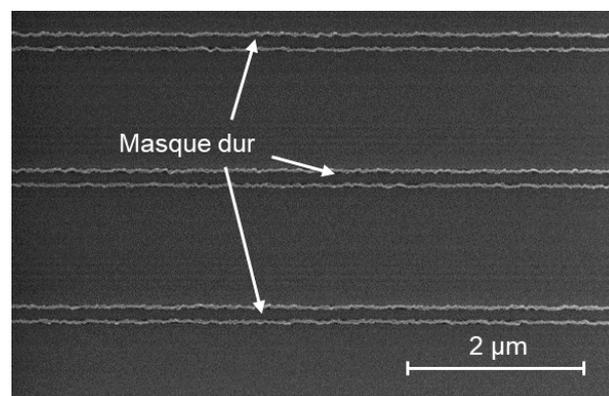


Figure 2-41 Erreur de gravure du masque dur au-dessus des guides d'onde. On observe sur la photo CDSEM que le masque recouvre 3 guides parallèles.

Les mauvais dimensionnements de ce masque et sa forte rugosité de surface sont notamment dus à une erreur sur l'épaisseur de la couche de BARC. Le changement de plateforme de STMicroélectronique vers le CEA-LETI pour l'étape de photolithographie a engendré des changements de l'épaisseur de BARC. Les conditions de gravure du masque dur n'ont pas été adaptées en conséquence. L'épaisseur standard de BARC utilisée au CEA-LETI est inférieure à celle de STMicroélectronique. La couche de masque dur a donc été insuffisamment protégée lors de la gravure et a été sur-gravée. Les fortes rugosités de surface du masque dur peuvent se répercuter sur les flancs des guides d'onde. Comme il le sera détaillé au chapitre 3 **Résultats**, les guides d'onde du lot 1 semblent également souffrir d'une forte rugosité de surface car les guides ont des pertes de propagation très élevées. L'utilisation du masque dur

est l'une des sources potentielles à l'origine de ces grandes pertes. Les photos CDSEM du lot 2 obtenues en fin de thèse indiquent également que le masque dur peut être une source importante de rugosité le long des guides. Il a été décidé de modifier la fabrication du lot 2 en enlevant le masque dur et en compensant cette absence par une résine plus épaisse. Cela a pour but de réduire la rugosité de surface des guides, et donc leurs pertes de propagation. Les résultats de ces tests seront connus après la thèse et ne sont donc pas décrits ici. Le lot 2 n'a donc pas été livré avant la fin de la thèse.

2.3.3 Autres moyens de conception

La fabrication des lots 1* et 2 suit des procédés de photolithographie standards sur des substrats à base de Si de 200 mm de diamètre.

Il est également possible de fabriquer les circuits sur des substrats de 300 mm de diamètre au CEA-LETI. Toutefois, ce changement de taille de substrat nécessite une adaptation des conditions de fabrication sur les machines en salle blanche. Au moment d'effectuer la thèse, les procédés de fabrication pour des circuits en Si_3N_4 sur substrat 300 mm n'étaient pas encore complètement développés au CEA-LETI. La plateforme de fabrication de substrat 300 mm n'a donc pas été utilisée dans notre cas.

La fabrication sur substrat 300 mm est une évolution de celle sur substrat de 200 mm. Les machines 300 mm sont plus récentes et permettent d'atteindre des résolutions plus exigeantes (40 nm en lithographie par immersion) par rapport aux machines 200 mm au CEA-LETI (250 nm). En contrepartie, la fabrication sur substrat 300 mm est plus dispendieuse.

D'autres techniques de lithographie peuvent aussi être envisagées pour la fabrication de circuits photoniques à forte résolution ou nécessitant une structuration 3D, tels que la lithographie à faisceau d'électrons (*Electron Beam Lithography*, EBL ou *ebeam*) ou la lithographie par faisceau d'ions focalisés (*Focused Ion Beam*, FIB) [24]. Ces techniques dépassent les besoins en résolution de fabrication pour cette thèse.

Ces types de lithographies ont quelques limitations. D'abord, elles peuvent généralement exposer une zone de surface limitée (généralement au maximum $\sim 1 \text{ mm}^2$ pour l'*ebeam*). Cela est trop petit pour nos besoins pour la conception du PIC final pour le prototype de projection rétinienne ($\sim 1\text{-}2 \text{ cm}^2$). Ces techniques de lithographie peuvent compenser cette limitation en éclairant plusieurs zones adjacentes pour la conception de PICs plus grands. En contrepartie, ces zones sont généralement désalignées (*stitching*) de quelques dizaines de nanomètres, ce qui peut être problématique pour raccorder des guides d'onde de faibles dimensions comme dans le spectre visible.

2.4 Fonctionnement de l'hologramme

La conception du circuit du lot 2 et sa fabrication sont orientés vers l'objectif d'étudier l'interaction « guide d'onde – hologramme ». La connaissance même du fonctionnement de l'hologramme représente donc un point clé à cette conception.

La création des hologrammes analogiques suit 4 étapes principales : l'enregistrement, le blanchiment, le développement et la lecture.

Durant l'enregistrement, un faisceau référence interfère avec un faisceau objet dans la couche holographique (matériau photosensible). Les interférences génèrent une variation locale d'intensité de la lumière dans le volume de l'hologramme. Cette variation locale d'intensité modifie la composition du matériau holographique. Cette modification correspond à un changement local d'indice de réfraction qui est révélé lors d'une étape de développement. Cet indice augmente proportionnellement à l'intensité locale de lumière qui s'y trouvait au moment

de l'enregistrement. Un recuit est utilisé lors du développement pour accentuer la variation locale d'indice. La variation locale d'indice est limitée à un seuil (typiquement $\Delta n = +0.03$ dans notre cas). La figure d'interférence entre les faisceaux référence et objet est donc reproduite par une distribution d'indice dans le matériau holographique.

Avant l'étape de développement, le matériau holographique subit une étape de blanchiment afin que le matériau holographique ne soit plus photosensible lorsqu'il est de nouveau exposé à la lumière. Cette étape est importante pour lire l'hologramme et le manipuler hors d'une salle inactinique. Le blanchiment permet également d'améliorer la transparence du matériau holographique.

Durant la lecture de l'hologramme, le faisceau référence est émis de la même manière que lors de l'enregistrement. Le faisceau objet n'est pas utilisé. Lorsque le faisceau référence pénètre dans le matériau holographique, la figure d'interférence pré-enregistrée dans celui-ci va modifier les propriétés de l'onde référence afin qu'elle réplique celles de l'onde objet initiale.

Dans notre cas, nous nous intéressons surtout à l'enregistrement et à la lecture d'un hologramme monochromatique ($\lambda = 532 \text{ nm}$) à l'aide de l'interférence entre l'émission d'un PIC et d'un hologramme, i.e. l'interaction « guide d'onde – hologramme ».

Les principes de base d'enregistrement et de lecture des hologrammes sont connus. Toutefois, l'enregistrement individuel de plusieurs milliers de points d'émission représente un défi technique aux échelles d'un PIC. En effet, dans notre cas l'alignement à respecter pour enregistrer les PEs est très petit (de l'ordre des micromètres). Les composants du circuit ont une taille qui atteint la limite de diffraction à notre longueur d'onde, ce qui peut éventuellement perturber l'enregistrement et la lecture de l'hologramme. De plus, notre approche néglige l'empilement complexe des couches du circuit qui pourrait causer des réflexions indésirables lors de la manipulation de l'hologramme. Enfin, les pertes optiques dans le circuit pourraient gêner l'enregistrement. En effet, celles-ci génèrent des émissions non-contrôlées qui peuvent consommer prématurément le matériau photosensible.

L'enregistrement d'un hologramme par l'interférence entre l'émission d'un circuit photonique (un guide d'onde avec 3 points d'émission) et une onde plane externe est représenté à la **Figure 2-42**. L'enregistrement s'effectue dans une couche holographique étalée à la surface du circuit. Cette couche a une épaisseur entre 8 et 20 μm dans notre cas. Les 3 points d'émission du circuit sont représentés par 3 réseaux de diffraction.

L'onde référence est représentée par les PEs du circuit et l'onde objet est représentée par l'onde plane. L'onde objet est obtenue en élargissant un faisceau laser à l'aide d'un système optique en espace libre. Ce faisceau laser provient de la même source que le signal laser qui se propage dans le circuit.

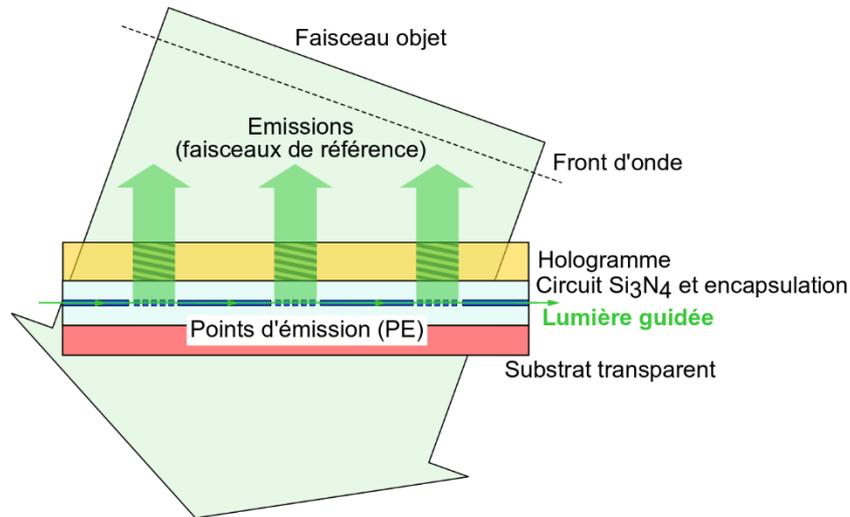


Figure 2-42 Enregistrement d'un hologramme déposé sur un circuit photonique transparent. La vue correspond à la coupe latérale du circuit.

L'étape de lecture est schématisée à la **Figure 2-43**. Dans ce cas, les guides d'onde émettent vers le haut en direction de l'hologramme (onde référence). L'émission des réseaux de diffraction est réfléchi vers le bas par l'hologramme pour imiter l'onde objet. Comme cette dernière, ces faisceaux sont ajustés en phase et forment une onde plane en sortie du substrat transparent. Ces propriétés sont essentielles à l'effet d'auto-focalisation d'image dans notre projet de projection rétinienne.

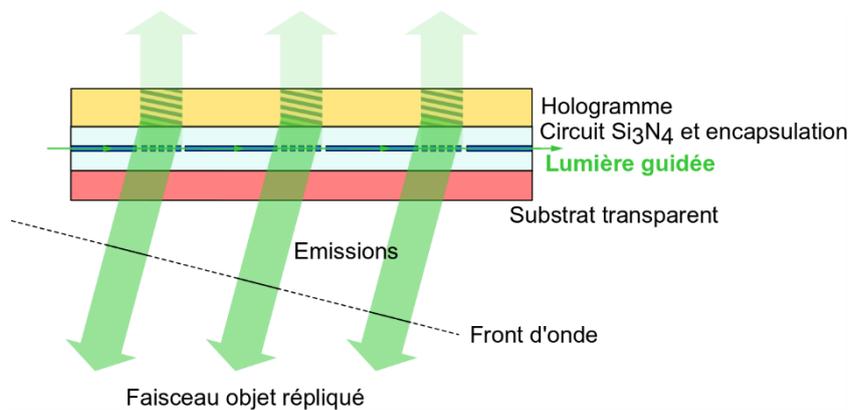


Figure 2-43 Lecture de l'hologramme. Le faisceau référence voit ses propriétés optiques modifiées par l'hologramme afin de répliquer l'onde objet. Il est donc réfléchi et les différents points d'émission sont ajustés en phase et forment une onde plane.

Dans notre projet, l'enregistrement holographique est effectué simultanément pour l'ensemble des PE d'une distribution de points d'émission ^[25]. Plusieurs DPEs sont enregistrés les uns à la suite des autres à l'aide d'une imprimante holographique. Cette imprimante combine une source laser très cohérente (~ 100 m) et une matrice de LCOS (*Liquid Crystal On Silicon*) pour enregistrer plusieurs PE simultanément. L'imprimante permet de contrôler l'angle et l'intensité du faisceau objet afin de former une image 2D en tons de vert.

Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre a permis de présenter les outils numériques et les instruments de caractérisation utilisés durant la thèse. Les deux bancs de caractérisation principaux sont un *prober* optique automatisé et un goniomètre. Ce dernier est un outil que j'ai conçu, fabriqué, calibré et utilisé en grande partie durant ma thèse. La partie d'imagerie a toutefois été développée par un stagiaire que j'ai encadré pendant la thèse. La conception du goniomètre a été orientée selon les besoins spécifiques en caractérisation du projet.

Ce chapitre a également détaillé les procédés de fabrication associés aux différents lots. La connaissance de ces procédés de fabrication est importante pour mieux comprendre les possibilités d'architecture du circuit photonique applicatif du projet. Elles ont aussi permis d'orienter les paramètres des simulations numériques présentées au chapitre suivant. Les données expérimentales de fabrication du lot 1* (épaisseurs des couches, MEB, FIB...) permettent de supporter l'analyse des résultats issus de la caractérisation des circuits photoniques au chapitre 3 **Résultats**. Enfin, les principes d'enregistrement et de lecture des hologrammes ont été présentés. Ceux-ci ont pour but d'orienter la conception du circuit du lot 2 également présentée au chapitre 3.

Références

- [1] K. Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides - 2nd Edition*. Academic Press, 2005.
- [2] K. S. Chiang, "Review of numerical and approximate methods for the modal analysis of general optical dielectric waveguides," *Opt Quant Electron*, vol. 26, no. 3, pp. S113–S134, Mar. 1994, doi: 10.1007/BF00384667.
- [3] E. a. J. Marcatili, "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics," *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 7, pp. 2071–2102, 1969, doi: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01166.x>.
- [4] W. J. Westerveld, S. M. Leinders, K. W. A. van Dongen, H. P. Urbach, and M. Yousefi, "Extension of Marcatili's Analytical Approach for Rectangular Silicon Optical Waveguides," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 14, pp. 2388–2401, Jul. 2012, doi: 10.1109/JLT.2012.2199464.
- [5] Kumar, K. Thyagarajan, and A. K. Ghatak, "Analysis of rectangular-core dielectric waveguides: an accurate perturbation approach," *Opt. Lett., OL*, vol. 8, no. 1, pp. 63–65, Jan. 1983, doi: 10.1364/OL.8.000063.
- [6] Synopsys Inc., "RSoft Products," Synopsys optical solutions, 2019, <https://www.synopsys.com/opticalsolutions/rssoft/rssoft-products.html> (7 January 2019)
- [7] A. Taflov, "Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method," 1995, Accessed: Sep. 07, 2020. [Online]. Available: <https://www.scholars.northwestern.edu/en/publications/computational-electrodynamics-the-finite-difference-time-domain-m-3>.
- [8] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, pp. 302–307, 1966.
- [9] M. D. Feit and J. A. Fleck, "Light propagation in graded-index optical fibers," *Appl. Opt., AO*, vol. 17, no. 24, pp. 3990–3998, Dec. 1978, doi: 10.1364/AO.17.003990.
- [10] R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla, and S. Helfert, "Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 150–162, Jan. 2000, doi: 10.1109/2944.826883.
- [11] D. Yevick and B. Hermansson, "Efficient beam propagation techniques," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 26, no. 1, pp. 109–112, Jan. 1990, doi: 10.1109/3.44923.
- [12] J. C. Nedelec, "Mixed finite elements in \mathbb{R}^3 ," *Numer. Math.*, vol. 35, no. 3, pp. 315–341, Sep. 1980, doi: 10.1007/BF01396415.
- [13] Y. Tsuji, M. Koshiba, and T. Shiraishi, "Finite Element Beam Propagation Method for Three-Dimensional Optical Waveguide Structures", *IEEE JLT*, 15-9, p. 1728 (1997).
- [14] L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*, 1st ed. Cambridge University Press, 2015.
- [15] A. Z. Subramanian et al., "Low-Loss Singlemode PECVD Silicon Nitride Photonic Wire Waveguides for 532-900 nm Wavelength Window Fabricated Within a CMOS Pilot Line," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 2202809–2202809, Dec. 2013, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2292698.
- [16] W. Bogaerts and L. Chrostowski, "Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 12, no. 4, p. 1700237, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.201700237>.
- [17] Y. Xing et al., "Correlation between pattern density and linewidth variation in silicon photonics waveguides," *Opt. Express, OE*, vol. 28, no. 6, pp. 7961–7968, Mar. 2020, doi: 10.1364/OE.388149.
- [18] "Virtuoso," Virtuoso Software. <https://www.virtuoso-software.com/> (accessed Sep. 29, 2020).
- [19] "Inductively Coupled Plasma Etching (ICP)," Oxford Instruments. <https://plasma.oxinst.com/campaigns/technology/icp-etching> (accessed Oct. 02, 2020).
- [20] H. Sharifi and G. Gardner, "Plasma RIE Etching Fundamentals and Applications," Purdue University, 2008. https://www.purdue.edu/discoverypark/birck/files/Plasma_RIE_Etching_Fundamentals_and_Applications.pdf (accessed Oct. 02, 2020).

- [21] S. Sirard, "Introduction to Plasma Etching," Willson Research Group, The University of Texas at Austin, 2017.
https://willson.cm.utexas.edu/Teaching/LithoClass2017/Files/Introduction%20to%20Plasma%20Etching_Lecture_101917_Day1_Sntzd.pdf (accessed Oct. 02, 2020).
- [22] "Capacitively Coupled Plasma Etching (CCP) | Stanford Nanofabrication Facility."
<https://snfexfab.stanford.edu/guide/equipment/purpose/etching/dry-etching/capacitively-coupled-plasma-etching-ccp> (accessed Oct. 02, 2020).
- [23] R. Kallega, S. Nambiar, S. Kalathimekkad, V. Mere, and S. K. Selvaraja, "Flexible silicon nitride photonic integrated circuit embedded in polymer handle," in *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXIII*, Mar. 2019, vol. 10921, p. 109210H, doi: 10.1117/12.2509523.
- [24] "Nanofabrication systems for EBL and FIB," <https://www.raith.com/>. <https://www.raith.com/> (accessed Oct. 07, 2020).
- [25] C. Martinez, V. Krotov, B. Meynard, and D. Fowler, "See-through holographic retinal projection display concept," *Optica*, OPTICA, vol. 5, no. 10, pp. 1200–1209, Oct. 2018, doi: 10.1364/OPTICA.5.001200.

Chapitre 3

Résultats

Introduction du chapitre 3	91
3.3 Etude des briques de base (lot 1*)	91
3.3.1 Guide d'onde monomode	93
3.3.1.1 Simulations numériques	94
3.3.1.2 Mesures expérimentales	97
3.3.1.3 Comparaison à la littérature	100
3.3.2 Guide courbe	102
3.3.2.1 Simulations numériques	102
3.3.2.2 Mesures expérimentales	106
3.3.2.3 Comparaison à la littérature	107
3.3.3 Couplage entre guides	107
3.3.3.1 Simulations numériques	108
3.3.3.2 Mesures expérimentales	111
3.3.4 Coupleur MMI	113
3.3.4.1 Simulations numériques	114
3.3.4.2 Mesures expérimentales	117
3.3.4.3 Comparaison à la littérature	119
3.3.5 Coupleur directionnel 3dB	119
3.3.5.1 Simulations numériques	119
3.3.5.2 Mesures expérimentales	120
3.3.6 Réseaux de diffraction	121
3.3.6.1 Simulations numériques	122
3.3.6.2 Mesures expérimentales	123
3.3.7 Interféromètre de Mach-Zehnder	128
3.3.7.1 Mesures expérimentales	130
3.3.8 Réseaux de guides d'onde	134
3.3.8.1 Mesures expérimentales	136
3.3.8.2 Comparaison à la littérature	141
3.3.9 Croisements	141
3.3.9.1 Simulations numériques	141
3.3.9.2 Mesures expérimentales	142
3.3.9.3 Comparaison à la littérature	144
3.3.10 Edge-coupler (coupleur par la tranche)	144
3.4 Etude de l'interaction « guide d'onde – hologramme » (lot 2)	148
Conclusion du chapitre 3	151
Références	152

Introduction du chapitre 3

Ce chapitre décrit les principaux résultats obtenus lors de la thèse et se divise en deux sections principales. Chaque section est associée à un lot de circuits et à ses objectifs respectifs.

La première section décrit les résultats des simulations et des mesures expérimentales de chaque bloc de base conçu dans le lot 1*. Ces blocs forment une bibliothèque de composants photoniques intégrés qui serviront à l'élaboration de circuits applicatifs complexes pour la suite du projet. L'efficacité de chaque composant est discutée et comparée à la littérature.

Dans la seconde section, la description du circuit du second lot que j'ai entièrement conçu est détaillée. Ce lot est dédié à l'interaction « guide d'onde – hologramme ». La fabrication du lot 2 n'a pas été complétée avant la fin de la thèse. La caractérisation expérimentale du circuit n'a donc pas été effectuée.

Dans ce travail, j'ai effectué les simulations numériques des composants du lot 1* et 2, parfois en me basant sur des codes MATLAB pré-existants en interne au CEA-LETI et permettant de générer automatiquement certains environnements de simulation RSoft. Les circuits actifs et les coupleurs à réseau de diffraction côneiques ont toutefois été conçus par des membres d'un autre laboratoire du CEA-LETI. J'ai également effectué la plupart des caractérisations issues du goniomètre, à l'exception de quelques mesures angulaires des réseaux de diffraction. De plus, les caractérisations et l'analyse de données issues de l'utilisation du système d'imagerie du goniomètre ont été effectuées en collaboration avec un stagiaire de Master 2 que j'ai encadré durant ma thèse. J'ai effectué l'analyse des données issues de l'ensemble des autres caractérisations à l'aide de MATLAB.

3.3 Etude des briques de base (lot 1*)

Les mesures expérimentales sur les circuits photoniques ont été effectuées en quasi-totalité sur le premier lot de thèse (lot 1*). Le masque de photolithographie du lot 1* contient des centaines de circuits photoniques individuels. Ces circuits, qu'on nommera aussi « structures de test », servent à étudier et à valider le fonctionnement et l'efficacité de nos briques de base photoniques. Cela comprend notamment l'étude des pertes de propagation dans les guides d'onde, l'efficacité des coupleurs MMIs, etc.

Le plan du masque de photolithographie du lot 1* s'insère dans un plan de masque plus large qui inclut des circuits d'un autre laboratoire. Ces circuits ne concernent pas notre projet. Toutefois, le partage de la surface du masque de photolithographie permet de réduire les coûts de fabrication de nos échantillons. Le plan global et la place du lot 1* dans celui-ci est présenté à la **Figure 3-1**.

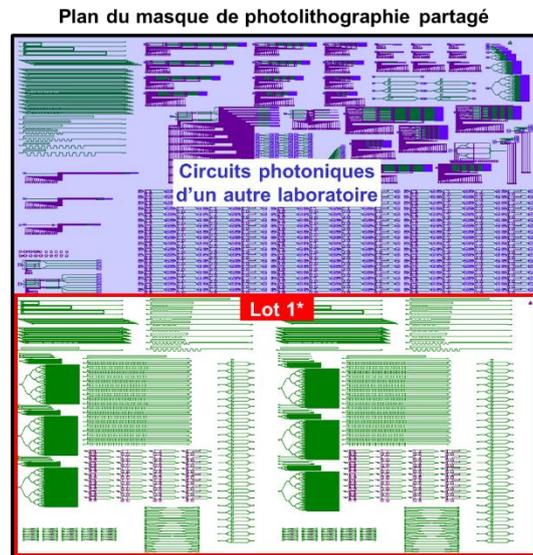


Figure 3-1 Plan global du masque de photolithographie sur lequel est inclut le lot 1*.

On remarque à la **Figure 3-1** que l'ensemble du plan des circuits du lot 1* est doublé en bas à gauche et à droite du plan global. A gauche, les guides d'onde sont de largeur nominale (300 nm) pour une propagation monomode prévue si les circuits sont faits de Si_3N_4 déposé par LPCVD ($n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2.03$ à $\lambda = 532$ nm). A droite, la largeur nominale des guides est supérieure (340 nm) afin qu'ils soient monomodes si le Si_3N_4 est plutôt déposé par PECVD ($n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 1.93$ à $\lambda = 532$ nm). En début de thèse, il y avait une incertitude sur la méthode de dépôt qui serait choisie, et donc sur l'indice du Si_3N_4 à prendre en compte pour dimensionner les composants photoniques, notamment pour la largeur des guides monomodes. Ceci explique le fait de prendre en compte les deux possibilités. Au final, les circuits ont été fabriqués en Si_3N_4 déposé par LPCVD. La grande majorité des caractérisations expérimentales se concentrent donc sur les composants dimensionnés aux indices correspondants à cette méthode de dépôt (i.e. partie gauche du lot 1*, guides monomodes ayant une largeur nominale de 300 nm).

Le détail des familles de structures de test dans le lot 1* sont présentées à la **Figure 3-2**.

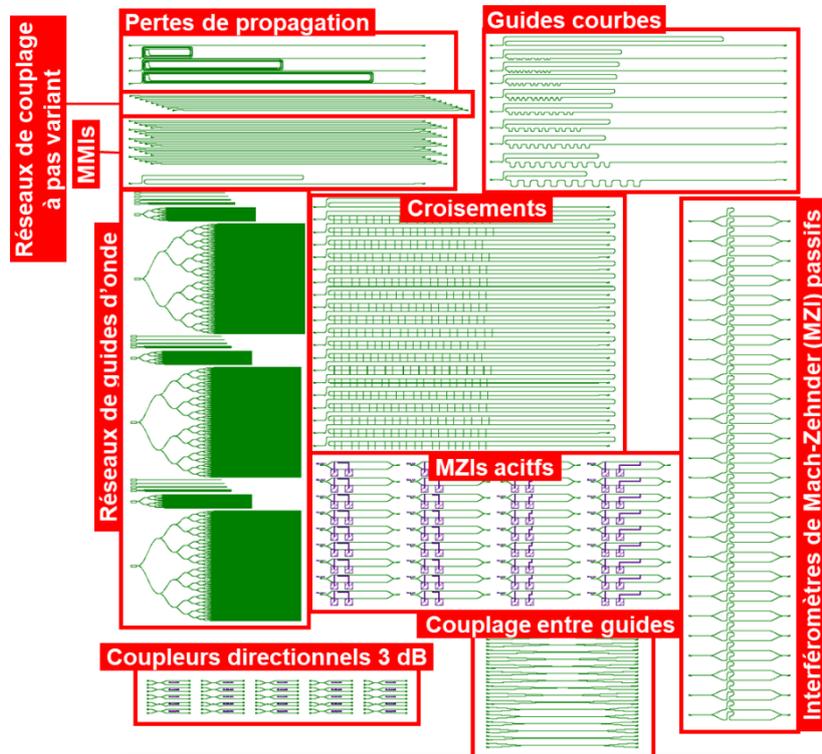


Figure 3-2 Plan du lot 1* et de ses différentes familles de structures de test.

Les sous-sections qui suivent détaillent des éléments de théorie et les simulations numériques utilisés pour concevoir les composants photoniques de base. Ceux-ci sont comparés aux résultats des mesures expérimentales des structures de test obtenues à l'aide du *prober* et du goniomètre. Ces résultats sont également comparés à la littérature et aux objectifs initiaux de thèse associés à chaque composant.

3.3.1 Guide d'onde monomode

Le guide d'onde représente le canal de base pour transporter la lumière dans le circuit photonique. Comme présenté au chapitre 1 **Contexte et objectifs**, nous avons choisi une architecture transversale *strip* pour concevoir nos guides d'onde monomodes.

Les guides d'onde en Si ont une épaisseur standard de 220 nm, notamment pour les *wafers* où plusieurs projets sont partagés [1]. Dans la littérature, on retrouve plusieurs guides d'onde monomodes en Si₃N₄ dont les épaisseurs sont voisines de 200 nm à notre longueur d'onde [2][3]. Des guides d'onde plus épais (> 300 nm) peuvent être sensibles aux contraintes induites lors de leur dépôt à haute température par LPCVD [4][5]. De plus, l'épaisseur du guide d'onde doit généralement être inférieure à sa largeur afin de favoriser la propagation de modes en polarisation TE par rapport à la polarisation TM.

En se basant sur ces informations, nous avons dimensionné des guides d'onde monomodes à $\lambda = 532$ nm. On considère que l'indice du Si₃N₄ est de 2.03 dans la région spectrale autour de notre longueur d'onde et que l'indice de l'oxyde qui l'entoure est de 1.46. Ces indices sont ceux constamment utilisés dans l'ensemble des simulations numériques de la thèse.

En utilisant la théorie des guides diélectriques plans [6], on peut d'ailleurs confirmer qu'une épaisseur voisine de 200 nm correspond à l'épaisseur de coupure en polarisation TE pour une

propagation monomode en utilisant nos paramètres. En effet, la fréquence de coupure pour le fonctionnement d'un guide d'onde plan TE est donnée par l'équation suivante :

$$v_c = \frac{1}{NA} \frac{c}{2d} \quad (3.1)$$

Où l'ouverture numérique NA est définie telle que :

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.2)$$

Où n_1 est l'indice du guide (2.03) et n_2 celui de son environnement (1.46). On en détermine que l'ouverture numérique est de 1.41. L'équation (3.1) peut être réécrite en isolant d et en faisant intervenir λ plutôt que la fréquence :

$$d_c = \frac{\lambda}{2NA} \quad (3.3)$$

En utilisant $\lambda = 532$ nm, on trouve une épaisseur de coupure de 189 nm. Cette estimation analytique se rapproche des dimensionnements trouvés pour un guide monomode 3D en littérature.

Les méthodes analytiques de calcul de modes des indices effectifs [7][8], de Marcatili [9][10] et de Kumar [11] permettent d'estimer la largeur du guide d'onde monomode à l'aide de nos paramètres (voir chapitre 2 **Moyens**). En considérant un guide d'onde de 200 nm d'épaisseur, ces méthodes permettent d'estimer que la largeur monomode du guide d'onde est de l'ordre de 300 nm. Ce dimensionnement approximatif est utilisé comme base pour l'étude numérique des modes du guide d'onde par éléments finis dans le logiciel RSoft.

3.3.1.1 Simulations numériques

Le dimensionnement d'un guide d'onde *strip* monomode s'effectue en calculant les indices effectifs de ses différents modes de propagation. En posant une épaisseur de guide constante (ex : 200 nm), l'indice effectif de chaque mode est calculé en fonction de la largeur du guide. Un mode commence à être guidé dans le guide d'onde lorsque son indice effectif dépasse la valeur de l'indice de réfraction de l'environnement (i.e. 1.46 dans notre cas). Pour maximiser la largeur de notre guide d'onde monomode à une épaisseur donnée, il faut donc déterminer sa largeur au moment où l'indice effectif du second mode TE atteint l'indice de réfraction minimal dans l'environnement de simulation (i.e. 1.46). Il s'agit de la largeur de coupure à partir de laquelle le guide commence à devenir multimode. En sélectionnant la largeur monomode maximale d'un guide d'onde à une épaisseur donnée, on maximise son confinement.

L'encapsulation du guide d'onde permet de réduire les pertes de propagation et de protéger physiquement les circuits photoniques [2].

Les indices effectifs des guides d'onde sont calculés par simulation numérique dans RSoft à l'aide de la méthode FemSIM (méthode par éléments finis). Ces simulations sont effectuées pour des épaisseurs de guide de 180, 200 et 220 nm (i.e. $200 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$, correspondant aux variantes d'épaisseur des dépôts en fabrication). Elles sont effectuées à $\lambda = 532$ nm (longueur d'onde standard dans la thèse) et à $\lambda = 519$ nm (longueur d'onde de la diode laser de mesure pour la caractérisation). Les résultats sont présentés avec une encapsulation d'oxyde « infinie » et une encapsulation de 200 nm (épaisseur réaliste correspondant aux conditions finales de fabrication). Le terme d'encapsulation « infinie » fait simplement référence à une encapsulation du guide qui occupe tout l'espace de simulation ($\sim 1.5 \mu\text{m}$ de large par $1 \mu\text{m}$ de haut). Ces simulations sont présentées à la **Figure 3-3** pour une largeur de guide d'onde allant de 100 à 600 nm.

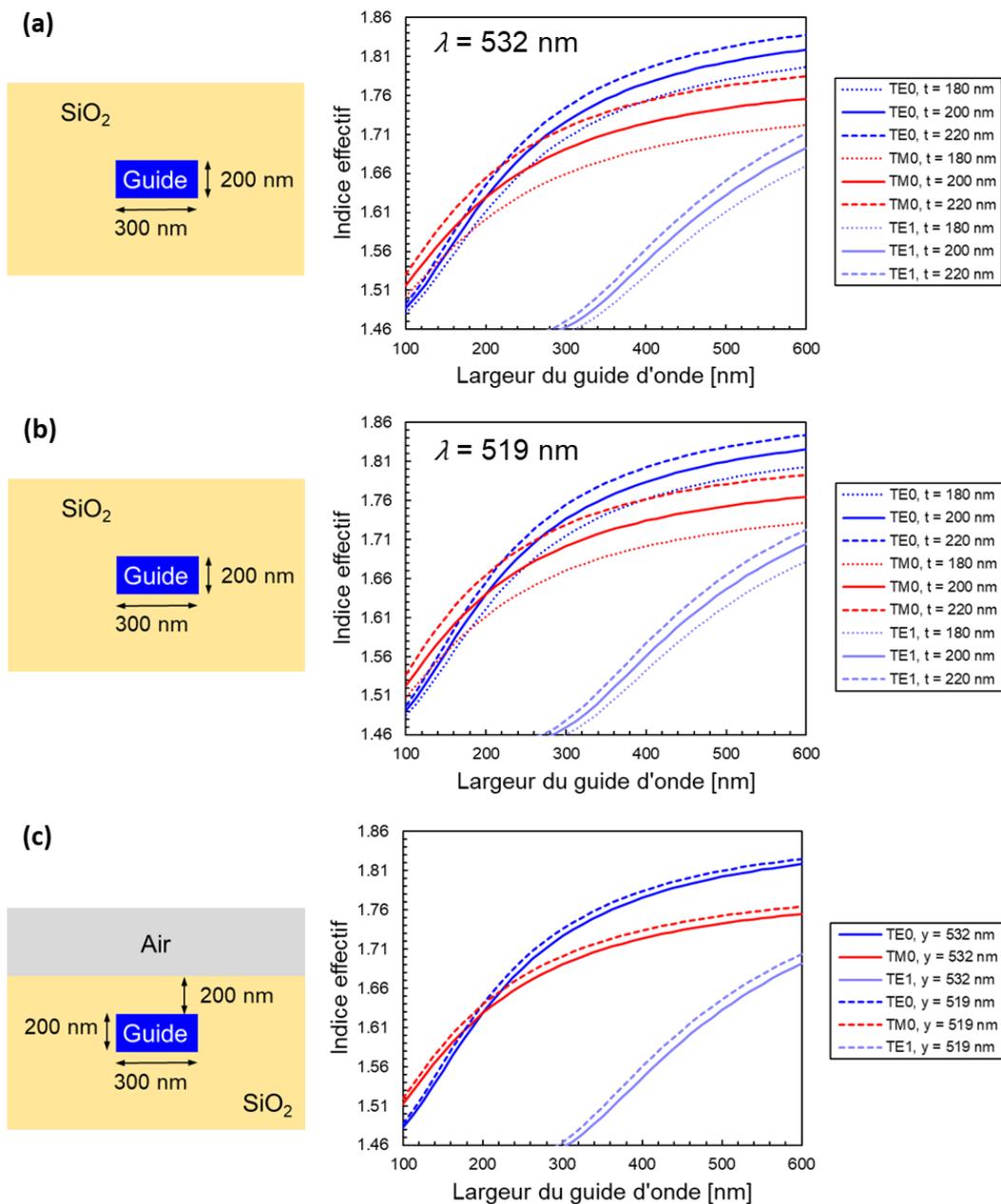


Figure 3-3 Calcul des indices effectifs pour des guide d'onde de différentes épaisseurs t à l'aide de simulations numériques FemSIM dans RSoft lorsque a) $\lambda = 532$ nm et l'encapsulation est « infinie », b) $\lambda = 519$ nm et l'encapsulation est « infinie », c) le guide a une épaisseur 200 nm (valeur nominale) et une encapsulation de 200 nm ($\lambda = 519, 532$ nm) correspondant aux conditions réelles de fabrication. Les schémas à gauche représentent l'environnement de simulation (pas à l'échelle) pour le guide aux dimensions nominales.

On observe que le mode TM₀ apparaît avant le mode TE₀ lorsque la largeur du guide d'onde est inférieure à son épaisseur dans l'ensemble des simulations de la **Figure 3-3**. Le mode TE₀ est ensuite favorisé lorsque la largeur du guide dépasse son épaisseur. Le changement d'épaisseur du guide d'onde a peu d'impact sur la largeur à laquelle le second mode TE (i.e. TE₁) apparaît. En effet, dans le cas d'une épaisseur infinie, les guides de 180, 200 et 220 nm d'épaisseur sont monomodes jusqu'à une largeur de 310, 295 et 280 nm respectivement (à $\lambda = 532$ nm) tel que montré à la **Figure 3-3 (a)**.

Lorsque la longueur d'onde est réduite à 519 nm (**Figure 3-3 (b)**), la largeur de coupure des guides d'onde est réduite d'environ 10 nm.

A la **Figure 3-3 (c)**, les simulations de calcul de modes sont effectuées pour un cas plus réaliste. Celui-ci considère que l'encapsulation au-dessus des guides d'onde est limitée à 200 nm. Une couche d'air ($n \approx 1$) recouvre l'encapsulation d'oxyde. Dans ce cas, la largeur de coupure des guides d'onde augmente de 10 nm par rapport au cas de la **Figure 3-3 (a)**. Celle-ci est donc comprise entre 295 et 305 nm pour une longueur d'onde comprise entre 519 nm et 532 nm.

Pour la suite des simulations, on considère que le dimensionnement de notre guide d'onde monomode nominal est de 200 nm x 300 nm. Ce guide a une largeur de coupure qui représente la moyenne entre les différentes conditions de simulation de la **Figure 3-3**. Lorsque ce guide est encapsulé par 200 nm d'oxyde, il a un indice effectif de 1.736 à $\lambda = 519$ nm.

La distribution du champ électrique majoritaire en polarisation TE (i.e. E_x) est montrée à la **Figure 3-4** pour le guide nominal, avec une encapsulation de 200 nm et $\lambda = 519$ nm.

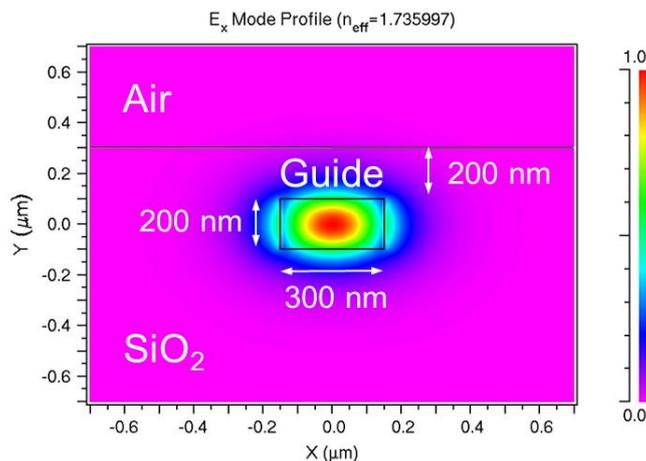


Figure 3-4 Représentation graphique du champ électrique majoritaire (E_x) dans la coupe transversale du guide d'onde nominal 200 nm x 300 nm à $\lambda = 519$ nm.

La simulation des pertes de propagation le long des guides d'onde ne peut pas être effectuée de façon réaliste dans RSoft sans données expérimentales préalables. En effet, des modèles théoriques existent [12] mais nécessitent un apport de données expérimentales. Par exemple, Jaberansary *et al.* [13] utilisent un modèle 3D FDTD pour estimer ces pertes en se basant sur les rugosités de surface des guides déterminées expérimentalement.

En général, les pertes de propagation le long des guides d'onde proviennent de deux facteurs principaux dans le régime linéaire: les pertes intrinsèques des matériaux (i.e. absorption) et les pertes par diffusion causées par la rugosité de surface présente sur les flancs des guides d'onde. Dans notre cas, les pertes intrinsèques du Si_3N_4 sont très faibles à notre longueur d'onde (voir **1.1.4.2 Propriétés du Si_3N_4** au chapitre 1). Les pertes vont donc provenir majoritairement de la rugosité de surface, un paramètre imprédictible en simulation. En effet, celui-ci change en fonction des conditions de fabrication. Il peut varier d'une *die* à une autre sur un même *wafers*. Ainsi, les pertes de propagation le long des guides droits sont généralement caractérisées expérimentalement après fabrication et non avec des logiciels de simulation.

La sous-section suivante porte sur les mesures expérimentales des pertes de propagation de nos guides d'onde.

3.3.1.2 Mesures expérimentales

Les structures de test utilisées dans le lot 1* pour mesurer les pertes de propagation le long des guides d'onde sont présentées à la **Figure 3-5**.

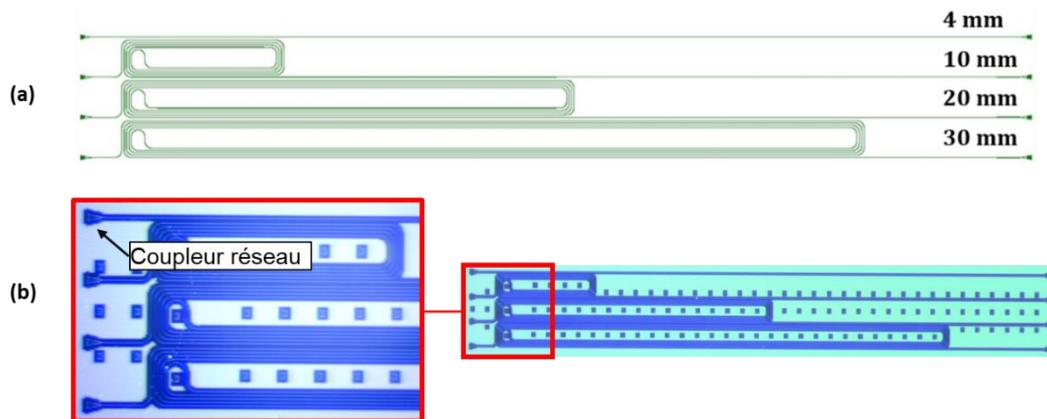


Figure 3-5 Structures de test de différentes longueurs pour la mesure des pertes de propagation le long des guides d'onde, a) schéma des circuits sur le masque de photolithographie, b) photo des circuits au microscope optique après fabrication.

À la **Figure 3-5**, quatre structures de test sont présentées. La longueur des guides est de 4, 10, 20 et 30 mm. Ces guides ont une largeur nominale (300 nm).

Un réseau de diffraction à l'entrée et à la sortie des guides permet d'injecter et d'extraire la lumière dans les structures de tests. Ces réseaux de diffraction sont de taille standard pour toutes les structures de test du masque, à l'exception des réseaux partiellement gravés dans les réseaux de guides d'onde et des structures de test étudiant spécifiquement les réseaux de diffraction. Les réseaux de diffraction standards ont un facteur de remplissage de 0.5, un pas de 400 nm, 40 périodes et une gravure totale.

Les mesures de transmission dans ces circuits de test ont été effectuées à l'aide de plusieurs instruments de mesure. D'abord, les mesures ont été effectuées au *prober* sur des *wafers* complets. Plusieurs mesures ont été répétées au goniomètre pour comparer et valider les mesures effectuées au *prober*.

Le traitement des données de transmission dans les spirales a été effectué à l'aide d'un programme MATLAB. Ce programme effectue une régression linéaire sur la transmission mesurée en sortie des spirales de différentes longueurs. La pente de la régression permet de déterminer les pertes de propagation en dB/cm.

Ce calcul a été répété pour l'ensemble des *dies* testées sur un même *wafer*. La médiane et l'écart-type (mesure de la distribution statistique) de ces pertes sont calculées pour chaque *wafer*. Pour rappel, chaque *wafer* correspond à un dimensionnement de guide d'onde précis (ex : épaisseur des guides de 180, 200 et 220 nm). Le programme MATLAB élimine le bruit de fond mesuré au photodétecteur et élimine automatiquement du calcul toutes les mesures de transmission qui ont échouées (i.e. puissance mesurée inférieure au seuil de détection de -70 dBm) ainsi que les points aberrants.

Les mesures de pertes de propagation au *prober* sont résumées au **Tableau 3-1**.

Tableau 3-1 Pertes de propagation mesurées au *prober* (laser à $\lambda = 519$ nm).

Masque	Plaque	Polarisation	Épaisseur des guides d'onde [nm]	Largeur des guides d'onde [nm]	Encapsulation [μm]	Pertes médianes [dB/cm]	Pertes maximales [dB/cm]	Pertes minimales [dB/cm]	Écart-type σ [dB/cm]	Nombre de puces testées
Lot 1 (lot avec défaut de gravure)	P05	TE	200	300	0.2	-13.3	-14.1	-13.0	0.46	5
		TE	200	340	0.2	-11.5	-12.0	10.3	0.71	5
Lot 1*	P10	TE	200	300	0.2	-15.8	-16.9	-14.6	1.14	4
		TM	200	300	0.2	-15.0	-15.2	-14.9	0.17	2
		TE	200	340	0.2	-16.1	-17.3	-12.1	2.39	4
	P04	TE	180	300	0.2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	P06	TE	220	300	0.2	-14.1	-16.6	-12.5	1.46	8

Au **Tableau 3-1**, on observe que les pertes de propagation de l'ensemble des circuits testés au *prober* sont très élevées, que ce soit dans le lot 1 ou le lot 1*. La différence entre les résultats du lot 1* et 1 – provenant notamment de conditions de fabrication différentes – est discutée en Annexe B à la sous-section I. **Comparaison lots 1 et 1***. La suite de l'analyse des résultats se concentre sur les circuits du lot 1*.

On remarque au **Tableau 3-1** que la différence entre les pertes de propagation des guides d'onde de 300 nm ou 340 nm de large est très faible. Les pertes minimales des guides de 340 nm sont toutefois inférieures jusqu'à 2.5 dB/cm par rapport aux pertes minimales des guides 300 nm. En contrepartie, la variation entre les résultats médians des deux types de guides est plus faible et est comprise dans l'intervalle [-1.8, +0.3] dB/cm en polarisation TE. Cette variation entre les deux types de guides est à la limite de la marge d'erreur définie par les écart-types.

De plus, les pertes de propagation en polarisation TE ou TM n'ont pas de différence notable. On mesure une différence de pertes inférieure de 0.8 dB/cm en polarisation TM par rapport à la polarisation TE sur la plaque P10. Toutefois, cette différence est également comprise dans l'intervalle d'incertitude défini par l'écart-type.

Des mesures comparatives effectuées au goniomètre sont montrées au **Tableau 3-2**. Le tableau inclut des mesures additionnelles sur des circuits en spirales d'un autre projet partagé sur nos puces (guides 200 nm x 600 nm) et des mesures sur des guides d'onde fabriquées précédemment par une autre équipe au CEA-LETI. Ces derniers guides d'onde ont des dimensions très proches de nos guides d'onde nominaux.

Tableau 3-2 Mesures au goniomètre (laser à $\lambda = 519$ nm).

Masque	Plaque	Polarisation	Épaisseur des guides d'onde [nm]	Largeur des guides d'onde [nm]	Encapsulation [μm]	Pertes médianes [dB/cm]	Pertes maximales [dB/cm]	Pertes minimales [dB/cm]	Écart-type σ [dB/cm]	Nombre de puces testées
Lot 1*	P09	TE	200	300	0.2	-13.5	-14.7	-13.1	0.82	3
		TM	200	300	0.2	-14.1	-16.0	-13.6	1.31	3
		TE	200	600	0.2	-6.2	-7.2	-4.9	0.80	5
	P02	TE	200	300	0.2	-12.8	-13.4	-12.5	0.50	3
	P03	TE	180	600	0.2	-5.5	-6.8	-4.4	1.09	4
	P11	TE	200	300	1	-13.7	-14.2	-13.2	0.51	3
Comparaison autre équipe CEA-LETI	-	TE	200	320	1	-4.5	N/A	N/A	N/A	1

Les pertes médianes mesurées sur les guides nominaux (200 nm x 300 nm) au goniomètre (plaques P09 et P02) sont comprises dans l'intervalle [-12.8, -13.7] dB/cm en polarisation TE. Ces pertes sont inférieures de ~2-3 dB/cm par rapport à celles déterminées par les mesures au *prober* pour un dimensionnement de guide d'onde équivalent. Cette différence provient de la méthode de mesure utilisée et est détaillée en Annexe **B** à la sous-section **II. Comparaison des méthodes de mesure entre le prober et le goniomètre**. L'analyse des données au goniomètre permet toutefois de valider des résultats obtenus au *prober*.

Au goniomètre, la différence de pertes de propagation entre les polarisations TE et TM n'est pas clairement distinguable, tout comme l'indiquaient les résultats au *prober*.

Au **Tableau 3-2**, la plupart des plaques sont encapsulées à l'aide de 200 nm d'oxyde. Les pertes de propagation d'une plaque avec une encapsulation supérieure (1 μm) ont une valeur médiane de -13.7 dB/cm pour les guides d'onde nominaux. Une encapsulation plus épaisse ne permet donc pas de réduire les pertes de propagation dans notre cas.

Des guides beaucoup plus larges (200 nm x 600 nm et 180 nm x 600 nm) ont également été testés au goniomètre. La forte augmentation de la largeur des guides les rend multimodes à notre longueur d'onde. Ils permettent de réduire efficacement les pertes de propagation dans les zones linéaires du circuit. En effet, les pertes médianes de ces guides sont comprises entre -5.5 et -6.2 dB/cm pour les guides de 180 nm et 200 nm d'épaisseur respectivement. La différence entre les deux épaisseurs de guide est toutefois comprise à l'intérieur des marges d'incertitudes déterminées par les écart-types.

Finalement, nous avons mesuré les pertes de propagation de guides d'onde d'une autre équipe au CEA-LETI. Ces guides correspondent à un autre lot et ont suivi une fabrication légèrement différente. Les matériaux composant les guides (Si_3N_4 LPCVD) et l'encapsulation (SiO_2) sont identiques et leurs dimensions (200 nm x 320 nm) sont très similaires à celles de nos guides nominaux (200 nm x 300 nm). Le goniomètre a permis de mesurer des pertes de -4.5 dB/cm pour ces guides. Cela représente une amélioration de presque 9 dB/cm par rapport aux mesures de nos guides d'onde au goniomètre.

3.3.1.3 Comparaison à la littérature

Dans la littérature, les pertes de propagation dans le spectre visible sont généralement données pour des guides d'onde *strip* compacts (i.e. la largeur des guides est du même ordre de grandeur que leur épaisseur) ou des guides quasi-plans (i.e. largeur \gg épaisseur) avec un faible confinement de mode.

Dans la catégorie des guides d'onde compacts du spectre visible, Subramanian *et al.* [2] présentent des pertes de propagation de -1.5 dB/cm pour des guides de 180 nm x 300 nm en Si₃N₄ PECVD (polarisation TE). Sacher *et al.* [3] quant à eux présentent des pertes comprises entre -5.4 et -7.2 dB/cm pour des guides 200 nm x 280 nm (Si₃N₄ PECVD pour $\lambda = [502, 550]$ nm, polarisation TE). Ils étudient également des guides dont le Si₃N₄ est déposé par LPCVD. Dans ce cas, les pertes sont de -4.7 à -7.1 dB/cm pour un guide 200 nm x 290 nm ($\lambda = [502, 550]$ nm, polarisation TE).

Dans la littérature, il est montré que les guides quasi-plans permettent de réduire drastiquement les pertes de propagation au détriment des pertes de courbure [14]-[17]. Chauhan *et al.* [15] obtiennent ainsi des pertes de -0.08 dB/cm à $\lambda = 450$ nm (polarisation TE) à l'aide d'un guide d'onde de 20 nm x 1.3 μ m et un rayon de courbure minimal de 400 μ m. Les modes qui se propagent dans ce guide sont très déconfinés. Cela réduit leur absorption dans le matériau composant le guide d'onde. De plus, les pertes par rugosité de surface sont généralement concentrées sur les flancs des guides. La forte réduction de l'épaisseur de leur guide permet de diminuer drastiquement la contribution de la rugosité de ces flancs sur les pertes de propagation.

Les pertes de propagation généralement mesurées pour nos guides nominaux (environ de -13 à -16 dB/cm) sont donc très supérieures à celles retrouvées en littérature pour des guides *strip* compacts aux dimensions, matériaux et longueurs d'onde similaires tel que détaillé ci-haut. On considère généralement que des guides Si₃N₄ dans le spectre visible ont de faibles pertes si celles-ci sont inférieures à -1 dB/cm [2].

Plusieurs raisons permettent d'expliquer les fortes pertes de propagation obtenues sur nos guides par rapport à la littérature :

- 1) Plusieurs gravures consécutives (BARC, masque dur puis guides d'onde) ont dû cumuler une erreur sur le dimensionnement et la rugosité des flancs des guides d'onde. En effet, chaque gravure possède une marge d'erreur sur le dimensionnement des tranchées générées et cause des irrégularités sur les flancs des couches gravées. Les irrégularités (rugosité, dimensionnement) causées par la gravure du masque dur se répercutent sur les guides d'onde lorsque ceux-ci sont ensuite gravés. Il est donc possible que plusieurs gravures consécutives cumulent une erreur qui participe à fabriquer des guides d'onde mal dimensionnés et à forte rugosité de surface. La gravure partielle du masque dur peut également générer une fine couche à forte rugosité de surface qui peut interférer avec le champ évanescent au-dessus des guides d'onde.

Dans le cas des mesures effectuées au goniomètre, on observe qu'une autre équipe au CEA-LETI ayant des guides d'onde de dimensionnement presque équivalent aux nôtres affichent des pertes de -4.5 dB/cm à notre longueur d'onde. Les trois différences principales lors de la fabrication de ce lot par rapport aux nôtres sont qu'il n'utilise pas de masque dur, qu'une seule étape de gravure est effectuée (BARC et guides d'onde gravés simultanément) et que l'encapsulation est plus épaisse (1 μ m) par rapport à notre encapsulation standard (200 nm). Toutefois, les mesures au goniomètre ont montré qu'une épaisseur d'encapsulation plus élevée de nos guides d'onde n'a pas d'effet sur les pertes de propagation. Ainsi, la gravure et l'utilisation d'un masque dur sont les seules différences subsistant avec nos lots. Cela tend à confirmer que nos conditions de gravure (i.e. gravures multiples et utilisation du masque dur) ont

contribué à générer des rugosités néfastes pour les pertes de propagation de nos guides d'onde. Cette hypothèse est également appuyée par les photos CDSEM du masque dur du lot 2 (chapitre 2 **Moyens**), dont les flancs ont subi une forte sur-gravure et arborent une grande rugosité de surface suite à de légères modifications de l'épaisseur du BARC. Cela montre que le respect du dimensionnement du masque dur et sa rugosité de surface – qui se répercutent sur les guides d'onde – sont très sensibles aux conditions de gravure.

- 2) Dans l'article de Subramanian *et al.*, la méthode de dépôt utilisée pour former la couche de guidage est du PECVD. L'indice du Si₃N₄ déposé est donc autour de 1.93 à $\lambda = 532$ nm. La différence d'indice avec le milieu environnant ($n_{SiO_2} = 1.46$) est donc moins élevée qu'avec le Si₃N₄ déposé par LPCVD dont l'indice est de 2.03 comme dans notre cas. Sachant qu'on peut estimer que les pertes de propagation augmentent proportionnellement selon Δn^2 (i.e. $n_{guide}^2 - n_{encapsulation}^2$) [17], l'utilisation de dépôts PECVD est favorable à la réduction des pertes de propagation par rapport au LPCVD.
- 3) Il est possible que des erreurs lors de la gravure n'aient pas été répertoriées lors de la fabrication du lot 1* en salle blanche. Pour appuyer cette hypothèse, les photos FIB du lot 1* (voir chapitre 2 **Moyens**) montrent une sur-gravure des réseaux de couplage. En contrepartie, les guides d'onde semblent bien dimensionnés. Le FIB ne permet toutefois pas d'observer clairement la rugosité de surface sur les flancs des guides.

D'autres pistes ont été écartées pour expliquer les fortes pertes de propagation de nos guides d'onde :

- 1) Le dimensionnement des guides d'onde correspond à ceux trouvés en littérature, notamment dans les articles de Subramanian *et al.* et de Sacher *et al.*. Un mauvais design de guides a donc été écarté.
- 2) Dans la littérature [18], on observe parfois des recuits pour éliminer les liens N-H et Si-H, tel que présenté par Rahim *et al.* [17]. Ceux-ci proviennent de l'usage de précurseurs tels que le SiH₄ et le N₂ lors de la création de la couche de dépôt de Si₃N₄. Toutefois ceux-ci sont surtout connus pour une forte absorption dans l'IR à $\lambda = 1.52$ μ m. Dans l'article de Subramanian *et al.* il n'y a pas de recuit ou de traitement thermique apporté après le dépôt de Si₃N₄ car ce matériau et les précurseurs de dépôts utilisés ne possèdent pas de forte bande d'absorption dans le visible. L'absorption intrinsèque des matériaux formant le guide d'onde est donc un facteur négligeable dans notre cas.
- 3) L'épaisseur du BOX (2 μ m) est suffisante pour éviter la fuite du signal vers le substrat de Si.

Enfin, quelques autres pistes permettraient d'améliorer les pertes de propagation :

- 1) Un recuit de consolidation peut être effectué après les dépôts d'oxyde encapsulant les guides d'onde. En effet, si le mode dans le guide d'onde n'est pas bien confiné, alors une partie du champ interagit avec l'oxyde environnant. L'oxyde peut contenir de l'eau ou des interstices (i.e. des trous) qui en font un oxyde de mauvaise qualité. Ces défauts représentent une rugosité additionnelle interagissant avec le champ évanescent du guide et peuvent ainsi accentuer les pertes de propagation. Il peut alors être utile de faire un recuit de consolidation d'oxyde après l'avoir déposé afin d'éliminer ces défauts. Au sein du CEA-LETI, les recuits thermiques pour lisser les flancs des guides d'onde n'ont pas été recommandés car ils sont mal maîtrisés pour le Si₃N₄. Il existe toutefois des recuits de lissage à base de H₂ pour les guides en Si [19]-[21].

- 2) Tel que montré par de récents travaux du CEA-LETI [19], des polissages systématiques après chaque dépôt et une génération de l'encapsulation d'oxyde en plusieurs étapes de dépôts contrôlés permet de minimiser la rugosité de surface entourant la surface des guides d'onde. L'article de Dirani *et al.* [19] propose également d'étudier l'impact des précurseurs de dépôts utilisés pour la formation des couches de Si₃N₄ pour minimiser les résidus aux bords des guides. Ces résidus peuvent participer à l'augmentation de la rugosité de surface perçue par les guides d'onde.
- 3) L'optimisation des ratios des gaz de dépôt PECVD pour le Si₃N₄ dans le visible dans le but de minimiser les pertes de propagation est répertorié dans la littérature [22]. Ces travaux pourraient être utilisés si les conditions de dépôt du nitrure sont modifiées.
- 4) L'utilisation de guides d'onde élargis (multimodes) permet de réduire les pertes de propagation, tel que montré au **Tableau 3-2**. Toutefois, les guides multimodes sont généralement limités aux zones de propagation linéaire. En effet, comme le rapporte Shin *et al.* [23], si ces guides multimodes sont courbés, cela peut générer des effets indésirables tel que la conversion vers des modes d'ordre supérieurs. De plus, dans notre application de projection rétinienne la qualité d'image est dépendante de la densité de guides d'onde dans le circuit photonique. Pour éviter une réduction de la densité de guides, l'utilisation de guide élargis est limitée.

3.3.2 Guide courbe

Les guides d'onde peuvent être courbés afin de déplacer la lumière à la surface des circuits photoniques. Ces courbes peuvent engendrer des pertes optiques supplémentaires le long du circuit. Généralement, les pertes de courbure augmentent exponentiellement lorsque le rayon de courbure diminue. Les rayons de courbure critiques sont de l'ordre des microns en photonique intégrée lorsque les guides d'onde ont une forme transversale de type *strip* compact. En se basant sur les guides courbes compacts et à faibles pertes retrouvés en littérature [24]-[26], on pose que les pertes critiques de courbure sont définies par le seuil de -0.1 dB/90° (i.e. ~ 2 % de pertes).

Dans notre cas, nous nous intéressons à minimiser les pertes de courbure des guides d'onde. Nous souhaitons également minimiser le rayon de courbure afin de maximiser la compacité du circuit.

3.3.2.1 Simulations numériques

Dans notre cas, la simulation numérique des pertes des guides d'onde courbes s'effectue en 2D par éléments finis (FEM) à l'aide de FemSIM dans RSoft [27][28]. Ce type de simulation permet de fortement réduire le temps de calcul par rapport aux simulations en FDTD. De plus, on cherche davantage à estimer un rayon de courbure critique (i.e. à partir duquel les pertes de courbure sont supérieures au seuil de -0.1 dB/90°) plutôt qu'à obtenir un résultat exact par FDTD. En pratique, le rayon de courbure choisi est supérieur au rayon critique pour compenser les approximations des simulations et les défauts de fabrication en salle blanche.

Dans le principe général de ce type de simulations par FEM, le guide courbe est représenté par un guide droit « équivalent ». Pour ce faire, la distribution de l'indice de réfraction dans l'espace du guide droit est modifiée pour simuler la courbure du guide [29][30]. L'indice de réfraction n'est donc pas uniforme dans l'espace de simulation. Le logiciel calcule les modes guidés dans cet espace de simulation. Les modes sont radiatifs là où leur indice de mode (n_{eff}) est inférieur à l'indice de réfraction local.

Les modes se propageant dans cette structure sont décrits par des indices effectifs complexes de la forme $n + ik$. La partie imaginaire (k) est associée aux pertes de courbure. Ces pertes

sont traduites par une relation entre l'indice imaginaire et un coefficient d'absorption décrit à l'équation (3.4) [1].

$$\alpha[\text{m}^{-1}] = \frac{\alpha[\text{dB/m}]}{10\log_{10}(e)} \quad (3.4)$$

Où :

$$\alpha[\text{dB/m}] = -\frac{4\pi k * 10\log_{10}(e)}{\lambda} \approx -\frac{4\pi k * 4.34}{\lambda} \quad (3.5)$$

On peut en déduire que les pertes par courbure de 90° pour un arc de cercle de rayon constant sont données par l'équation (3.6).

$$\alpha_{90^\circ}[\text{dB}/90^\circ] = \alpha[\text{dB/m}] \frac{\pi}{2} R \quad (3.6)$$

Où R est le rayon de courbure.

Dans notre cas, nous nous intéressons à l'étude des guides courbes pour des guides d'onde de dimensions nominales (i.e. 200 nm d'épaisseur et 300 nm de largeur). Un exemple de simulation FEM des guides courbes dans l'espace 2D est montré à la **Figure 3-6** pour le guide nominal avec un rayon de courbure très faible. On observe que la distribution du champ électrique du mode qui se propage dans la coupe transversale du guide n'est pas symétrique de part et d'autre de celui-ci. En effet, le champ électrique semble davantage sortir du côté droit du guide, i.e. vers l'extérieur de la courbure du guide.

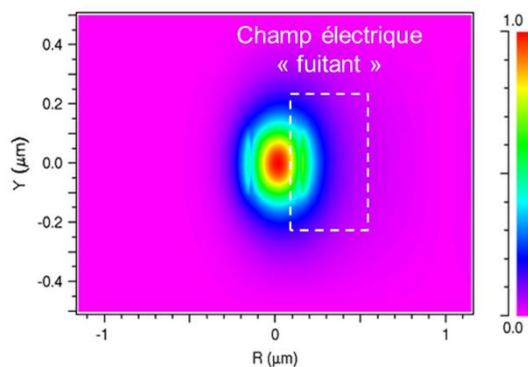


Figure 3-6 Simulation FEM sur RSoft d'un guide d'onde nominal à faible rayon de courbure.

Les résultats des simulations FEM des pertes en fonction du rayon de courbure sont présentés à la **Figure 3-7**. Le rayon de courbure est constant le long de chaque guide courbe.

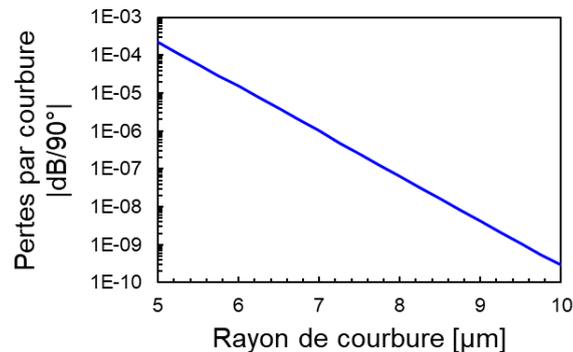


Figure 3-7 Calcul des pertes de courbure (dB/90°) en fonction du rayon de courbure du guide d'onde nominal (200 nm x 300 nm). Les simulations sont effectuées par FemSIM dans RSoft.

Dans notre cas, un guide ayant un rayon de courbure constant de 5 μm a des pertes de courbure de -2.2 E-4 dB/90°. Ces pertes sont très en-dessous du seuil de faibles pertes de courbure (-0.1 dB/90°).

Toutefois, en pratique il y a trois sources de pertes d'insertion dans un guide courbe [24]. La première est liée aux pertes des modes radiatifs. Celle-ci est quantifiée par les simulations FemSIM de RSoft. La seconde provient de l'erreur de recouvrement du mode guidé à l'intersection entre les parties droites et courbes du guide. La troisième est liée aux pertes de diffusion provenant de la rugosité de surface des guides d'onde.

On considère que les pertes liées à la rugosité de surface des guides sont identiques aux pertes de propagation dans les zones droites des guides d'onde. Celles-ci ont été caractérisées à la sous-section précédente.

Les pertes liées au recouvrement de mode à l'intersection droite-courbe du guide peuvent être importantes. Celles-ci peuvent être fortement réduites en faisant varier graduellement le rayon de courbure plutôt qu'en utilisant un rayon de courbure constant [31]. Pour ce faire, les guides courbes suivent une fonction sinusoïdale au CEA-LETI. Des guides courbes à rayon constant ou suivant une fonction sinusoïdale sont montrés à la **Figure 3-8**.

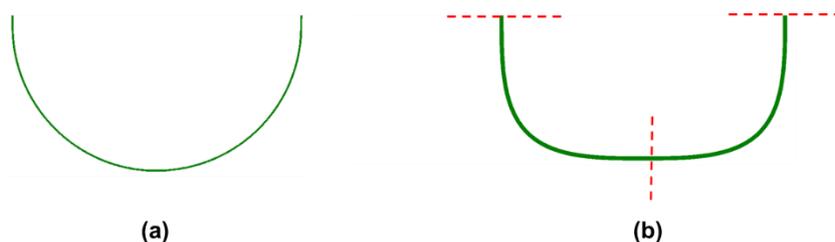


Figure 3-8 Guide d'onde dont la courbure a) est de rayon constant, b) suit une fonction sinusoïdale. Dans ce dernier cas, 2 fonctions sinusoïdales (intervalle de 0 à π) sont connectées et délimitées par des traits pointillés rouges.

La fonction sinusoïdale définissant le parcours du guide courbe est de la forme :

$$f(x) = a \sin(bx - d) + c \quad (3.7)$$

Dans notre cas, nous avons que $a = r_{min}$, $b = 1/r_{min}$ et c et d sont nuls. Les valeurs de x sont comprises dans l'intervalle $[0, \pi r_{min}]$. La variable r_{min} correspond au rayon de courbure minimal de la fonction sinusoïdale.

Les pertes des courbes sinusoïdales peuvent être déterminées à l'aide des données de la **Figure 3-7** ajustées en dB/cm (équation (3.6)) puis en les intégrant avec la longueur de propagation et le rayon de courbure le long de la fonction sinusoïdale définie à l'équation (3.7). Un exemple est donné en Annexe C pour un r_{min} de 5 μm . Le résultat final permettant de comparer les pertes des courbes à rayon constant ou sous forme de sinus est présenté à la **Figure 3-9**.

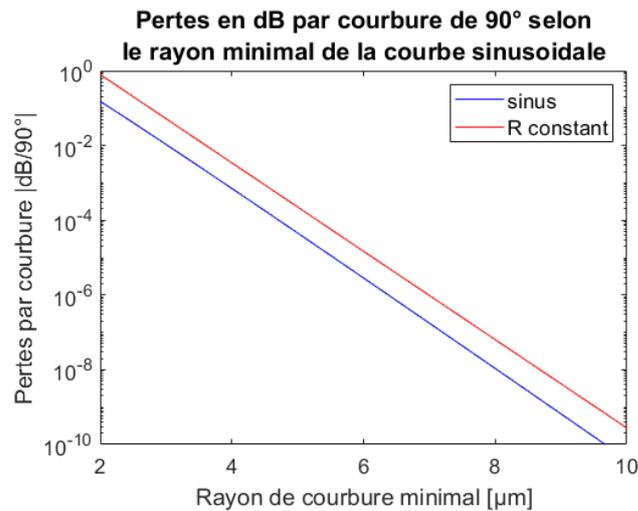


Figure 3-9 Comparaison des pertes de courbure entre des courbes sinusoïdales et des courbes à rayon constant.

On remarque à la **Figure 3-9** que les pertes de courbure des fonctions sinusoïdales sont généralement inférieures d'un facteur 10 par rapport aux courbes à rayon constant pour un rayon de courbure minimal donné. Toutefois, la taille d'une courbe de 90° est bien plus grande en suivant un sinus plutôt qu'un rayon constant. En effet, une courbe sinus ayant un r_{min} de 5 μm a une largeur de $\pi r_{min} \cos(\pi/4)$ dans notre cas (soit $\sim 11\mu\text{m}$). Cela est nettement supérieur aux courbes à rayon constant dont les courbes de 90° ont une largeur égale au rayon de courbure. En contrepartie, les courbes suivant une fonction sinusoïdale permettent de réduire fortement les pertes aux intersections droite-courbe des guides.

Une photo à la **Figure 3-10** permet de démontrer qualitativement les pertes importantes aux intersections droite-courbe d'un guide pour des courbes à rayon constant (ici $r_{min} = 30\mu\text{m}$).

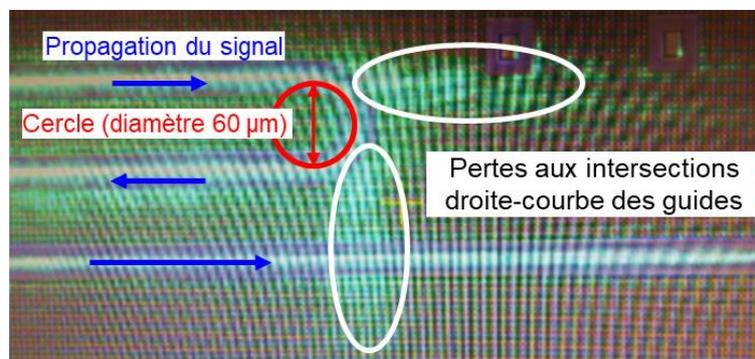


Figure 3-10 Pertes aux intersections droite-courbe d'un guide nominal (entouré en blanc) ayant une courbe à rayon constant de 30 μm (rouge). Le sens de propagation du signal est montré par les flèches bleues.

3.3.2.2 Mesures expérimentales

Dans le lot 1*, plusieurs circuits de test permettent d'étudier les pertes de courbes sinusoïdales en fonction de r_{min} . Ceux-ci sont composés d'une série de 40 courbes sinusoïdales identiques. La mise en série de plusieurs courbes identiques doit permettre de cumuler des pertes suffisantes pour qu'elles soient mesurables en fin de circuit. Le rayon minimal est varié d'un circuit à l'autre de 5 μm à 20 μm , tel que présenté à la **Figure 3-11**.

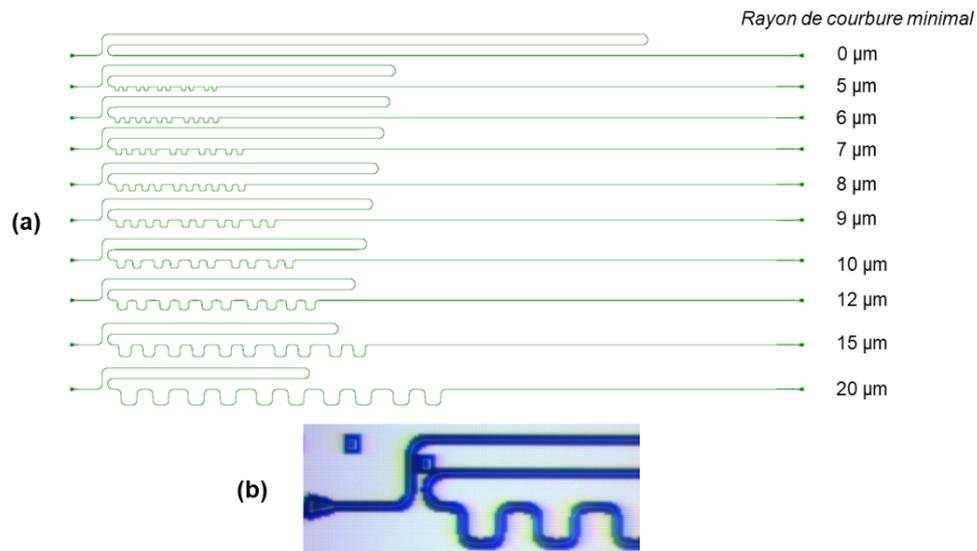


Figure 3-11 Structures de test pour la mesure des pertes en fonction du rayon de courbure minimal de courbes sinusoïdales dans le lot 1*. En a) le rayon de courbure minimal est varié d'un circuit à l'autre, b) observation des plus petites courbes (5 μm) au microscope optique.

Les pertes des courbures ont été mesurées au *prober* sur 5 puces de la plaque P10 (épaisseur nominale des circuits de 200 nm). Ces résultats sont présentés à la **Figure 3-12** pour la polarisation TE.

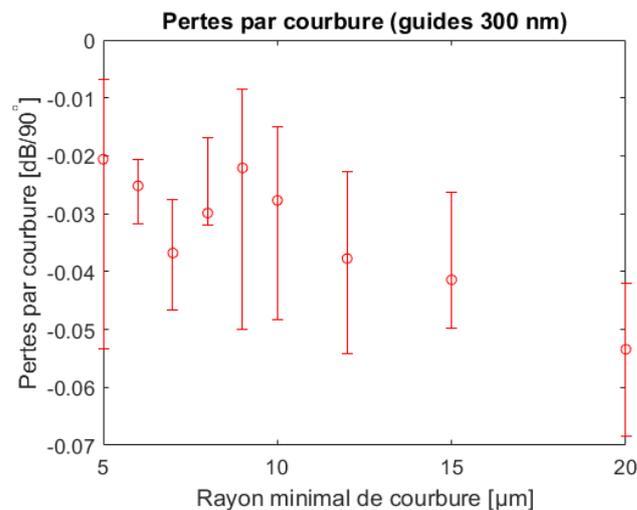


Figure 3-12 Mesures au *prober* des pertes par courbure en fonction des rayons minimaux de chaque courbe sinusoïdale. Les ronds représentent les valeurs médianes de 5 puces sur la plaque P10 (lot 1*, polarisation TE). Les barres d'erreur représentent les valeurs maximales et minimales mesurées.

On observe d'abord à la **Figure 3-12** que les pertes par courbure sont très faibles pour l'ensemble des circuits testés. Celles-ci sont généralement inférieures à -0.05 dB/90° (~ 1 %). Les pertes évaluées expérimentalement sont toutefois un peu plus élevées que celles déterminées par simulations numériques. Par exemple, pour un rayon minimal de $5 \mu\text{m}$, on mesure des pertes médianes de ~ -0.02 dB/90° (~ 0.5 %) alors que les simulations indiquaient $\sim -3.4 \times 10^{-5}$ dB/90° (courbe sinusoïdale) et -2.2×10^{-4} dB/90° (courbe à rayon constant). Cette différence pourrait provenir des faibles pertes à l'intersection droite-courbe des guides d'onde. Dans l'ensemble, les pertes d'insertion dans les guides courbes sont majoritairement dominées par la diffusion due à la rugosité de surface. Dans la sous-section précédentes (voir **Tableau 3-1**), celles-ci sont de -15.8 dB/cm pour les guides nominaux droits en polarisation TE. Cette contribution a été soustraite aux données à la **Figure 3-12**.

On remarque également que les pertes varient peu selon le rayon de courbure. Selon les résultats des simulations précédentes, on se serait attendu à une augmentation forte des pertes lorsque le rayon de courbure diminue. Toutefois, puisque l'ensemble des pertes sont très faibles et que les barres d'erreur sont très élevées par rapport aux valeurs médianes, il est difficile d'obtenir une relation rigoureuse entre les points de données en fonction du rayon minimal de courbure.

Pour voir les pertes de courbure augmenter significativement en réduisant R , il aurait fallu caractériser des circuits avec des rayons de courbures minimaux nettement inférieurs à $5 \mu\text{m}$. En effet, on observe aux simulations de la **Figure 3-9** que des pertes augmentent au-dessus de -0.1 dB/90° lorsque le rayon minimum d'une courbe sinusoïdale est inférieur à $2 \mu\text{m}$.

3.3.2.3 Comparaison à la littérature

Les pertes de courbure obtenues sont faibles dans l'ensemble, ce qui correspond au résultat attendu. Celles-ci sont en-dessous du seuil de faibles pertes de courbure établi à -0.1 dB/90°. De plus, les courbes sinusoïdales avec un r_{min} de $5 \mu\text{m}$ permettent de compacifier fortement notre circuit, ce qui est important pour la suite du projet de projecteur rétinien. Il serait toutefois intéressant de tester jusqu'à quelle limite de r_{min} il est possible de descendre expérimentalement pour augmenter la compacité du circuit tout en conservant des pertes inférieures à -0.1 dB/90°.

Dans la littérature, Sacher *et al.* [31] s'intéressent aux pertes de courbure pour des guides d'onde Si₃N₄ LPCVD de $200 \text{ nm} \times 290 \text{ nm}$ à $\lambda = 532 \text{ nm}$. Ces paramètres se rapprochent fortement de ceux dans notre conception. Dans son cas, ils obtiennent des pertes de -0.05 ± 0.03 dB/90° pour des courbes ayant un rayon constant de $20 \mu\text{m}$. Ces pertes sont similaires à celles obtenues à la **Figure 3-12**.

Dans de futures itérations de conception des briques photoniques du projet, il pourrait également être intéressant d'étudier l'élargissement local du guide dans la courbure pour réduire davantage le rayon minimal et les pertes des courbures liées aux modes radiatifs [31][32].

3.3.3 Couplage entre guides

Lorsque 2 guides d'onde ou plus sont très rapprochés (moins de quelques microns), leurs modes de propagation peuvent interagir. Cette interaction prend la forme d'un échange d'énergie graduel et cyclique. Par exemple, on peut injecter une onde dans un guide 1 et ne rien injecter dans un guide 2. Les deux guides suivent ensuite un parcours linéaire pendant lequel ils sont rapprochés. L'énergie de l'onde du guide 1 sera alors graduellement transférée au guide 2. Après une certaine distance de propagation, toute l'énergie de l'onde du guide 1 est transférée au guide 2. C'est ce qu'on appelle la longueur de couplage. Lorsque le parcours

de propagation s'allonge au-delà de cette longueur, le guide 2 injecte à son tour l'énergie de l'onde dans le guide 1 et ainsi de suite.

Plus rigoureusement, au lieu de parler d'un mode qui circule d'un guide à l'autre, il faut plutôt parler de deux super-modes qui se superposent : le super-mode symétrique et le super-mode antisymétrique. Les deux guides rapprochés sont alors considérés comme une structure unique dans laquelle ces deux super-modes se propagent [1][33]. Le logiciel RSoft permet l'étude de ces super-modes à l'aide des éléments finis (FEM).

La distance séparant les guides d'onde centre à centre est définie comme la distance inter-guide. La longueur de couplage est la longueur nécessaire pour que toute l'énergie guidée se propageant dans un guide soit transférée au guide adjacent. Dans notre cas, nous nous intéressons au couplage entre des guides d'onde identiques (200 nm x 300 nm).

3.3.3.1 Simulations numériques

Les effets de couplage peuvent être simulés précisément à l'aide de simulations numériques dans RSoft ou à l'aide de modèles analytiques approximatifs.

Pour déterminer la longueur de couplage, RSoft calcule les indices effectifs des super-modes symétrique et antisymétrique partagés entre les deux guides d'onde. Les indices effectifs de ces modes dépendent de la distance entre les deux guides et de leurs dimensions. La différence entre les indices effectifs des super-modes est liée à la longueur de couplage $L_{100\%}$, tel que décrit à l'équation (3.8).

$$L_{100\%} = \frac{\lambda_0}{2\Delta n} \quad (3.8)$$

Où Δn est la différence entre les indices effectifs des super-modes.

En supposant que la puissance initiale injectée dans le guide 1 est P_0 , la puissance P_2 dans le guide 2 après une longueur de propagation L s'exprime grâce à l'équation (3.9). On suppose que les guides sont parallèles pendant tout le parcours de propagation et que $P_2(0) = 0$ W dans notre cas.

$$P_2(L) = P_0 \sin^2\left(\frac{\pi L \Delta n}{\lambda_0}\right) \quad (3.9)$$

La puissance dans le guide 1 s'obtient de façon triviale à l'équation (3.10) à l'aide de la conservation de l'énergie.

$$P_1(L) = P_0 - P_2(L) \quad (3.10)$$

RSoft permet d'observer le champ électrique (en valeur absolue) partagé entre les 2 guides d'onde dans leur coupe transversale, comme montré à la **Figure 3-13**.

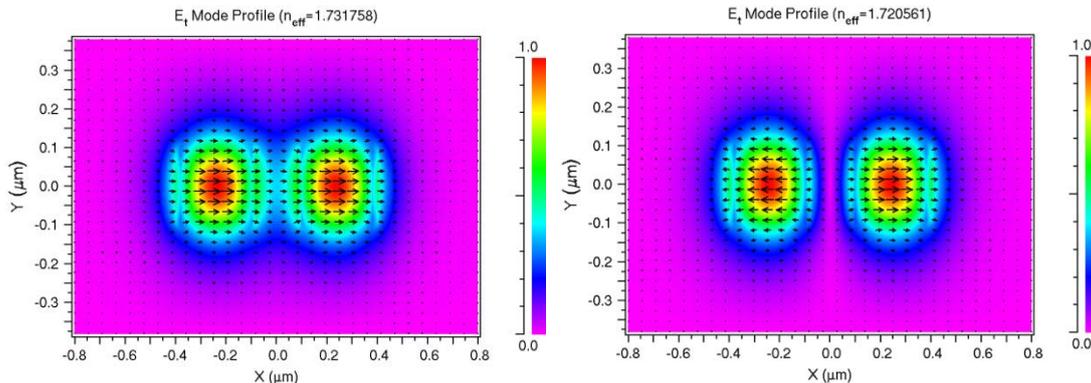


Figure 3-13 Couplage entre 2 guides d'onde (200 nm x 300 nm) espacés de 500 nm centre à centre dans RSoft a) champ électrique total du premier super-mode symétrique en polarisation TE, b) champ électrique total du premier super mode anti-symétrique en polarisation TE. L'état de symétrie des modes est observable à l'orientation des champs sur la figure (flèches noires).

La théorie des modes couplés permet également de déterminer la longueur de couplage de manière analytique [34][7]. K. Okamoto [7] décrit l'équation (3.11) qui permet de déterminer approximativement le coefficient de couplage κ entre deux guides d'onde parallèles et identiques.

$$\kappa = \frac{\sqrt{2\Delta} (k_x a)^2 (\gamma_x a)^2}{a (1 + \gamma_x a) v^3} \exp[-\gamma_x (D - 2a)] \quad (3.11)$$

Où

$$v = k n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (3.12)$$

$$\gamma_x^2 = k^2 (n_1^2 - n_0^2) - k_x^2 \quad (3.13)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2n_1^2} \quad (3.14)$$

Le coefficient κ peut donc être simplement déterminé en connaissant les paramètres physiques du milieu de simulation (dimensions des guides d'onde, indices de réfraction ...) présentés à la **Figure 3-14** et connaissant la valeur de la variable k_x . Cette dernière est déterminée à l'aide du calcul de l'indice effectif de l'un des guides d'onde à l'aide de la méthode de Marcatili. Dans notre cas, $k_x = 8.49 \text{ E}6 \text{ m}^{-1}$ pour un guide d'onde de 200 nm x 300 nm à $\lambda = 532 \text{ nm}$ (calcul effectué sur MATLAB). De plus, k est le nombre d'onde donné par $2\pi/\lambda$.

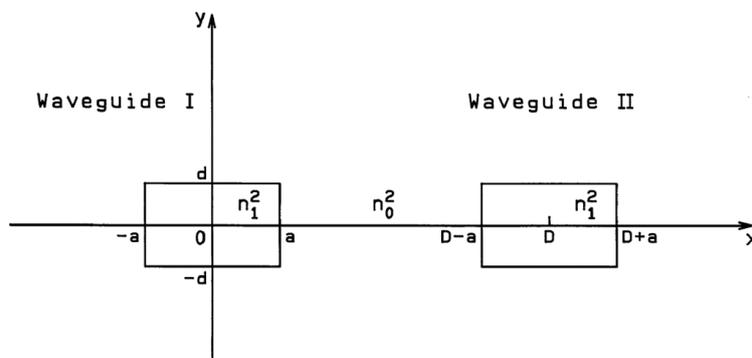


Figure 3-14 Paramètres physiques pour l'étude du couplage par la théorie des modes couplés. La figure est tirée du manuel de K. Okamoto.

Le coefficient de couplage est alors lié à la longueur de couplage par l'équation (3.15).

$$L_c = \pi / 2\kappa \quad (3.15)$$

Dans notre projet, nous souhaitons maximiser la longueur de couplage afin d'éviter les transferts d'énergie d'un guide à l'autre dans le circuit photonique. En effet, nous souhaitons utiliser les guides d'onde pour transporter la lumière vers des points d'émission qui généreront les pixels rétinien. Si le réseau de guides d'onde a des effets de couplage trop importants, certains points d'émission pourraient être plus ou moins éteints ou allumés, sans que l'on puisse maîtriser leur intensité. Nous souhaitons donc maximiser la longueur de couplage pour que le signal transporté dans chaque guide d'onde soit indépendant et n'interfère pas par couplage avec ses voisins.

En contrepartie, il faut également maximiser la compacité des guides dans le circuit photonique afin de maximiser le nombre de pixels du projecteur rétinien. Pour faire un compromis entre un minimum de couplage et une densité de guides élevé, nous avons posé que la longueur de couplage à viser est de 1 m. Cette valeur correspond à un échange d'énergie inférieur à 0.1% entre des guides parallèles sur 1 mm de longueur.

Les résultats des simulations RSoft pour le couplage entre des guides nominaux (200 nm x 300 nm) sont présentés à la **Figure 3-15**. La longueur de couplage est obtenue en déterminant les indices effectifs des super-modes pour chaque distance inter-guide puis en utilisant l'équation (3.8). Le graphique inclut également une comparaison par rapport au modèle théorique des modes couplés qui se base sur les équations (3.11) à (3.15).

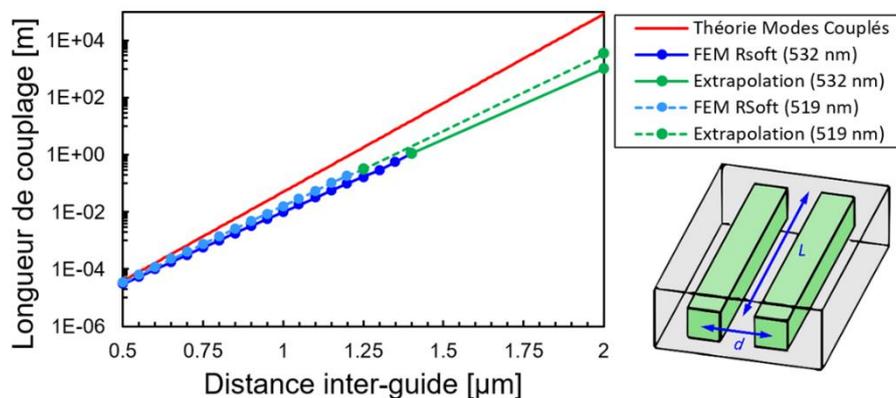


Figure 3-15 Simulations numériques FEM par RSoft pour le couplage entre deux guides nominaux. Les données sont comparées à $\lambda = 532$ nm et $\lambda = 519$ nm ainsi qu'avec le modèle théorique des modes couplés. Sur le schéma 3D des deux guides couplés, la variable d représente la distance inter-guide et la variable L représente la longueur pendant laquelle les guides d'onde sont rapprochés.

On remarque à la **Figure 3-15** que la théorie des modes couplés surestime la distance de couplage par rapport aux simulations RSoft. L'une des sources de cette différence peut venir de la variable k_x dans la théorie des modes couplés. Celle-ci est associée à un calcul approximatif de l'indice effectif (méthode de Marcatili) qui est déterminé en considérant l'existence d'un seul guide d'onde, au lieu de considérer les deux guides adjacents comme une seule structure unique.

Dans le cas des simulations RSoft, la différence entre les indices effectifs des super-modes symétriques et anti-symétriques est trop faible pour être déterminée avec précision numériquement lorsque la distance inter-guide est trop élevée. La distance de couplage est

alors obtenue par extrapolation des résultats issus d'une distance inter-guides plus faible. De plus, la différence de longueur de couplage entre les deux longueurs d'onde étudiées est similaire. La longueur de couplage à $\lambda = 519$ nm est toutefois légèrement supérieure à celle à $\lambda = 532$ nm.

Selon les simulations RSoft de la **Figure 3-15**, la longueur de couplage est de 1 m pour une distance inter-guide de $1.4 \mu\text{m}$. Cette distance augmente rapidement à 10 m pour une distance inter-guide de $1.6 \mu\text{m}$. Dans la suite du projet, nous utilisons une distance inter-guide de $1.5 \mu\text{m}$, ce qui devrait procurer une marge pour s'assurer que la longueur de couplage soit supérieure à 1 m.

3.3.3.2 Mesures expérimentales

Plusieurs structures de test sont utilisées pour l'étude du couplage dans le lot 1*. Chaque structure de test possède 2 guides d'onde qui sont rapprochés à 600 nm , 800 nm , $1 \mu\text{m}$, $1.3 \mu\text{m}$, $1.8 \mu\text{m}$ ou $2.3 \mu\text{m}$ (centre-centre). Ensuite, la distance sur laquelle les 2 guides sont rapprochés est variée de 10 , 100 et $1000 \mu\text{m}$, ce qui fait un total de 18 structures de test.

On peut mesurer la puissance transmise en sortie du premier guide et la puissance couplée en sortie du deuxième guide. Ces structures de test sont présentées à la **Figure 3-16**.

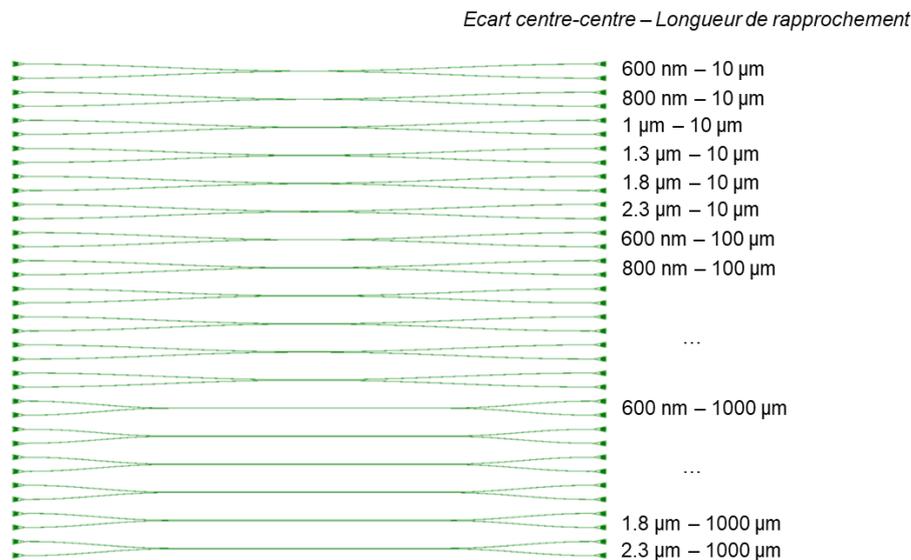


Figure 3-16 Structures de test dans le lot 1* pour l'étude des effets de couplage pour différentes distances inter-guide et longueurs pendant lesquelles les guides sont rapprochés.

Les résultats des mesures au *prober* en transmission (sortie 1) et de couplage (sortie 2) sont présentés à la **Figure 3-17**. Ces mesures ont été obtenues sur 3 puces de la plaque P10 en polarisation TE.

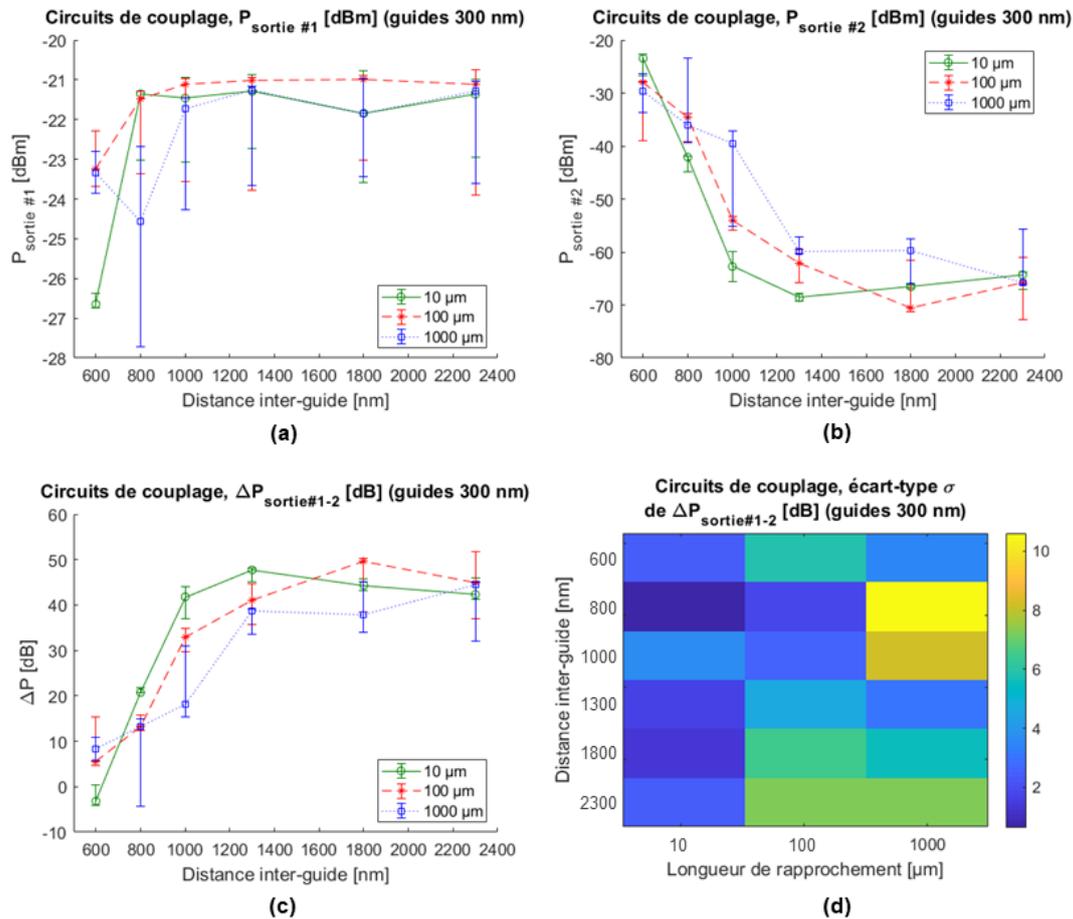


Figure 3-17 Mesures au *prober* de la puissance mesurée à chacune des deux sorties de chaque circuit de test pour l'étude du couplage sur le lot 1*, a) première sortie, b) deuxième sortie, c) différence de puissance entre les deux sorties, d) écart-type de ΔP_{1-2} correspondant pour chaque structure de test.

A la **Figure 3-17 (a)**, on remarque que la transmission dans P_1 converge vers une valeur maximale (~ -21 dBm) lorsque la distance inter-guide est supérieure à $1 \mu\text{m}$. Au niveau de la transmission dans P_2 , on voit que celle-ci tend vers une valeur minimale (~ -65 dBm) pour une distance inter-guide un peu plus grande, soit $\sim 1.4 \mu\text{m}$. On remarque également que le plateau de convergence de chaque circuit est atteint plus tardivement (i.e. pour des distances inter-guide plus élevées) lorsque la longueur de propagation augmente.

Les graphiques de la **Figure 3-17** montrent bien que pour une distance inter-guide supérieure ou égale à $1.5 \mu\text{m}$ le couplage est négligeable entre les deux guides d'onde ($\Delta P_{1-2} \approx 40$ dB). Ceci est valide au moins jusqu'à la longueur de propagation maximale mesurée, i.e. 1 mm.

A la **Figure 3-17 (c)**, la différence de puissance ΔP entre les sorties est calculée en effectuant la soustraction $P_1 - P_2$ en dB. Cela correspond au ratio des puissances en W.

La puissance P_2 mesurée ne peut pas descendre en-dessous du seuil de sensibilité du capteur (~ -70 dBm). Cela limite la différence mesurable entre les puissances aux deux sorties et génère les plateaux observés à la **Figure 3-17 (b)** et **(c)** pour une distance inter-guide supérieure à $\sim 1.4 \mu\text{m}$. En théorie, la différence ΔP entre les deux sorties devrait continuer à augmenter linéairement sur l'échelle des dB.

Les données issues des simulations numériques RSoft sont comparées aux mesures expérimentales à la **Figure 3-18**. Les valeurs de Δn issues des simulations sont combinées à la longueur L dans l'équation (3.9) pour en déterminer P_2 . La différence ΔP est alors calculée en posant que $P_0 = 1$ mW.

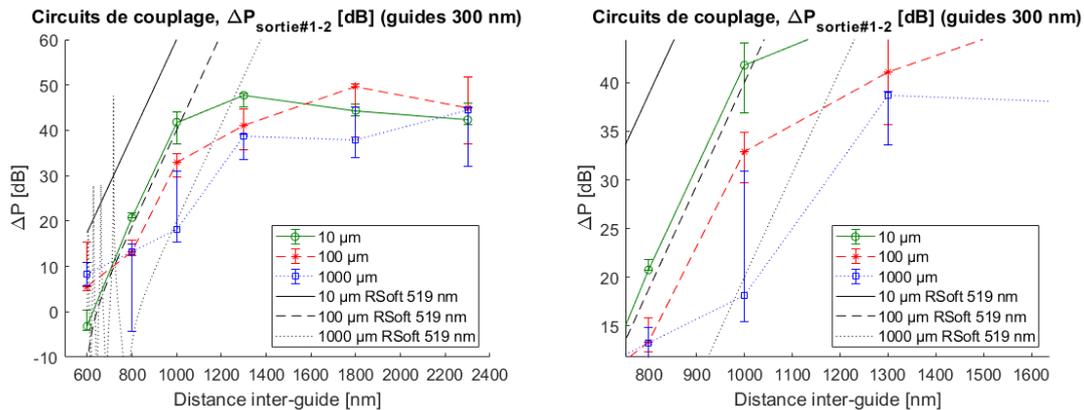


Figure 3-18 Comparaison des résultats de ΔP entre les mesures expérimentales au *prober* et les résultats des simulations numériques sur RSoft. A droite le graphique se concentre sur les zones linéaires (échelle dB).

On remarque à la **Figure 3-18 (a)** que le modèle dans RSoft indique que ΔP fluctue beaucoup (fort couplage) pour une distance inter-guide inférieure à 800 nm et une longueur de couplage de 1000 μm . Il y a ensuite une zone où ΔP augmente linéairement sur l'échelle en dB. A la **Figure 3-18 (b)**, on voit que les zones linéaires entre le modèle numérique de simulation et les mesures expérimentales sont relativement rapprochées. Toutefois, le modèle numérique surestime la valeur ΔP par rapport aux mesures. En pratique, le couplage entre les guides est donc un peu plus fort que ce qui était attendu avec les simulations. L'interprétation de ces résultats est toutefois limitée par les grandes barres d'erreur obtenues lors des mesures. Le modèle et les résultats expérimentaux divergent ensuite grandement lorsque les données expérimentales convergent vers un plateau. Comme expliqué précédemment, cela est dû à la limite de sensibilité du photodétecteur.

Le modèle numérique se rapproche davantage des données pour une longueur de propagation élevée (100 μm ou 1000 μm). Toutefois, il surestime fortement ΔP dans les zones linéaires pour $L = 10$ μm (**Figure 3-18 (b)**). Cela est dû au fait qu'en pratique, les guides d'onde sont rapprochés sur une « distance effective » plus grande que 10 μm . En effet, ils sont graduellement courbés pour être rapprochés. Ces courbes ajoutent une zone de couplage supplémentaire qui n'est pas prise en compte dans les modèles théoriques et de simulation numérique.

De plus, le léger écart dans les zones linéaires entre le modèle de simulation avec les données expérimentales pour $L = [100, 1000]$ μm peut provenir des erreurs de dimensionnement des guides d'onde (ex : largeur après gravure ou épaisseur des guides d'onde de ± 5 nm).

3.3.4 Coupleur MMI

Dans le circuit photonique final du projecteur rétinien, il est prévu que les signaux de lumière se propagent dans plusieurs milliers de guides d'onde. Suivant notre principe d'auto-focalisation, les guides ne sont pas adressés individuellement mais par groupes pour former les DPEs. Le signal d'un laser individuel doit donc être distribué vers une série de guides. Il faut alors avoir recours à des coupleurs qui permettent de diviser le signal initialement injecté dans un guide d'onde vers plusieurs autres guides.

Pour ce faire, nous avons recours à un coupleur MMI (*MultiMode Interference*). Le MMI représente un type de coupleur facile à fabriquer et compact par rapport à d'autres solutions, telles que les coupleurs 3 dB et les jonctions « Y » [35][36][37]. En effet, le coupleur MMI a une bonne répétabilité et est peu sensible aux erreurs de dimensionnement lors de la fabrication. Ces dimensions critiques peuvent être plus élevées que les coupleurs 3 dB, ce qui rend sa fabrication moins contraignante en termes de résolution.

Dans notre cas, nous nous intéressons aux coupleurs MMIs $1 \rightarrow 2$, i.e. à une entrée et deux sorties. Lorsque n séries de MMIs $1 \rightarrow 2$ sont connectés les uns à la suite des autres, ils permettent de diviser également un signal initial en 2^n signaux.

Le MMI nominal doit être bien dimensionné afin de s'assurer qu'il divise également le signal d'entrée en deux parties égales. Son dimensionnement doit également permettre de minimiser les pertes de transmission du composant. La bonne efficacité du MMI est validée si ses pertes de transmission sont inférieures à -0.1 dB ($\sim 2\%$). De plus, le débalancement des puissances aux deux bras de sorties doit être inférieur à 1% (i.e. $P = [49, 51]\%$ dans chaque bras de sortie) [18].

Les 4 principaux paramètres de dimensionnement à optimiser pour les MMIs sont les suivants :

1. Largeur du MMI
2. Longueur du MMI
3. Distance séparant les 2 guides d'onde de sortie
4. Élargissement des guides d'onde à l'approche du MMI

Le schéma du MMI et ses paramètres de dimensionnement sont présentés à la **Figure 3-19**.

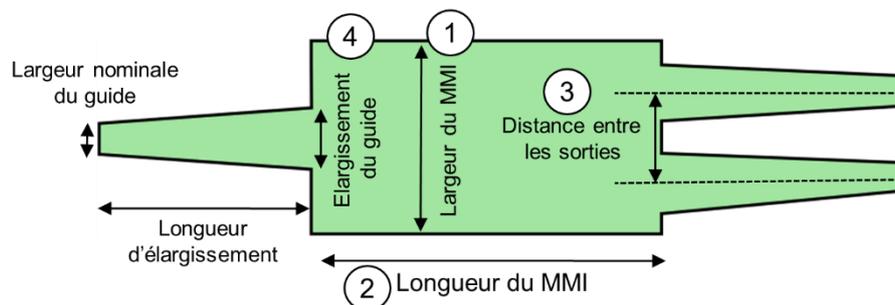


Figure 3-19 Exemple de MMI $1 \rightarrow 2$ (1 guide d'entrée et 2 guides de sortie).

Le fonctionnement d'un MMI se base sur le principe d'auto-imagerie (*self-imaging*) [38]. Selon ce principe, le champ initial en entrée d'un guide multimode est reproduit en une ou plusieurs images à intervalles réguliers le long de l'axe de propagation du guide d'onde. Les guides d'onde entrée et en sortie du MMI sont généralement monomodes.

3.3.4.1 Simulations numériques

Le dimensionnement d'un MMI peut se faire approximativement à l'aide d'équations analytiques, tel que détaillé par Soldano *et al.* [38]. Celles-ci montrent qu'une infinité de solutions existent pour dimensionner un MMI $1 \rightarrow 2$. En effet, le dimensionnement d'un MMI est surtout dicté par le ratio entre sa longueur et sa largeur. En général, pour qu'un MMI soit efficace et bien balancé, sa largeur doit lui permettre de supporter au moins $N + 1$ modes, où N est le nombre de sorties du MMI. Dans notre cas, le corps du MMI doit donc être suffisamment large pour avoir la capacité de guider au moins 3 modes.

Les équations analytiques permettent de dimensionner un MMI en utilisant la notion de largeur effective, W_e . Celle-ci tient compte de la profondeur de pénétration du champ à l'extérieur du corps du MMI. Celle-ci est environ équivalente à celle du mode fondamental se propageant dans la cavité du MMI, W_{e0} . Cette dernière est définie comme suit [38]:

$$W_e \approx W_{e0} = W_M + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_e}{n_g}\right)^{2\sigma} (n_g^2 - n_e^2)^{-1/2} \quad (3.16)$$

Où W_M est la largeur réelle du MMI, n_g est l'indice du guide et n_e est l'indice de l'encapsulation autour du guide. La variable σ est de 0 pour la polarisation TE et de 1 pour la polarisation TM.

La largeur W_e est liée à la longueur de battement L_π du faisceau initial dans la cavité du MMI.

$$L_\pi \approx \frac{4n_g W_e^2}{3\lambda} \quad (3.17)$$

Dans le cas d'un MMI symétrique, on pose qu'on a une seule entrée et un nombre N de sorties. L'entrée est centrée sur le corps du MMI. Les sorties sont espacées régulièrement et leur position moyenne est également centrée sur le corps du MMI. Dans ce cas, la longueur réelle L du MMI pour produire N sorties (i.e. N images du champ en entrée) est donnée par l'équation suivante :

$$L = \frac{p}{N} \left(\frac{3L_\pi}{4}\right) \quad (3.18)$$

Où $p = 0, 1, 2, \dots$

Pour un MMI $1 \rightarrow 2$, sa longueur minimale est donc donnée par :

$$L_{min1-2} = \frac{3pL_\pi}{8} \quad (3.19)$$

Pour obtenir le MMI $1 \rightarrow 2$ le plus court possible (et donc le plus compact), il faut poser que $p = 1$. En se basant sur le dimensionnement de MMIs précédemment conçus en interne au CEA-LETI à des longueurs d'onde proches de la nôtre, on a estimé qu'une largeur de MMI proche de $1.4 \mu\text{m}$ doit permettre de concevoir un composant efficace. En se basant sur cette valeur, on détermine que $W_e \approx 1.52 \mu\text{m}$, $L_\pi \approx 11.8 \mu\text{m}$ et $L_{min1-2} = 4.41 \mu\text{m}$.

Le MMI peut aussi être étudié numériquement à l'aide de RSoft. L'efficacité de transmission du MMI dans RSoft peut se faire par deux méthodes : les simulations BeamPROP (simulations physiquement approximatives) et FullWAVE (simulations FDTD physiquement précises mais longues en temps de calcul). Les simulations FullWAVE permettent également d'obtenir l'efficacité du MMI sur un intervalle de longueurs d'onde autour de la longueur d'onde centrale (ex : $532 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm}$).

Pour optimiser le temps de conception des MMIs, les différents paramètres de dimensionnement sont testés en premier sur les simulations BeamPROP. Lorsque BeamPROP permet de trouver des dimensionnements de MMIs efficaces, ceux-ci sont testés à l'aide de FullWAVE pour être validés. Les 4 paramètres listés ci-haut sont ainsi optimisés pour maximiser la transmission de notre MMI.

La largeur du MMI est conservée à $W_M = 1.4 \mu\text{m}$ comme dans le modèle analytique. La valeur de $L_{min1-2} = 4.41 \mu\text{m}$ est prise comme donnée initiale pour optimiser les paramètres du MMI dans les simulations numériques.

Dans l'espace de simulation la largeur des guides d'onde devrait varier pour représenter leur élargissement graduel jusqu'aux jonctions du corps du MMI. Toutefois, on approxime que la largeur de ces guides est constante car l'élargissement s'effectue sur une longueur très supérieure à la variation de largeur des guides (plusieurs microns à dizaines de microns contre $\sim 100\text{-}200\text{ nm}$ respectivement).

Les dimensions qui optimisent l'efficacité du MMI pour des guides d'onde $200\text{ nm} \times 300\text{ nm}$ ($n_{SiN} = 2.03$, $n_{SiO2} = 1.46$, $\lambda = 532\text{ nm}$) sont une largeur du MMI de $1.4\text{ }\mu\text{m}$, une longueur de $3.6\text{ }\mu\text{m}$, un élargissement des guides à 470 nm et une distance de 740 nm entre les deux guides de sortie. Cela correspond à une efficacité de transmission de 98.4% (i.e. 49.2% dans chaque guide de sortie) selon les simulations FDTD dans RSoft (soit -0.07 dB de pertes).

Une simulation BeamPROP sur RSoft avec ce dimensionnement de MMI nominal est présentée à la **Figure 3-20**. Elle permet de facilement observer visuellement la séparation du signal en deux parties égales dans ce MMI.

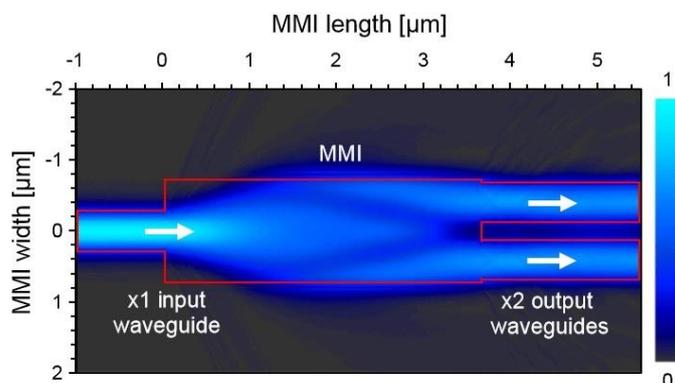


Figure 3-20 Simulation BeamPROP de RSoft montrant l'intensité du champ électrique normalisé se propageant dans le MMI nominal. La forme du MMI est représenté par le contour rouge.

La **Figure 3-21** montre la transmission du MMI nominal en fonction de la longueur d'onde pour les polarisations TE et TM.

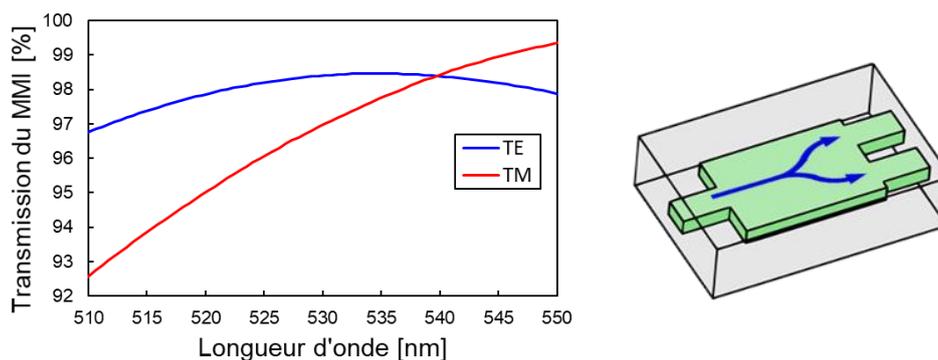


Figure 3-21 Transmission du MMI nominal en fonction de la longueur d'onde pour les polarisations TE et TM.

A la **Figure 3-21**, on observe que l'efficacité du MMI a une bonne tolérance au changement de longueur d'onde en polarisation TE. En effet, sa transmission reste supérieure ou égale à $\sim 97\%$ sur un intervalle de 40 nm ($\lambda = 532\text{ nm} \pm 20\text{ nm}$). Toutefois, le MMI perd rapidement en efficacité

de transmission pour des longueurs d'onde inférieures à $\lambda = 532$ nm en polarisation TM. En effet, celle-ci tombe à $\sim 92.5\%$ à $\lambda = 510$ nm.

3.3.4.2 Mesures expérimentales

Dans le lot 1*, plusieurs circuits de test permettent d'étudier des MMIs dont les dimensions varient par rapport au MMI nominal.

Les structures de test permettent de faire varier la longueur des MMI de 3.5 à 3.7 μm par incréments de 50 nm. Pour chaque longueur, la distance entre les deux guides de sortie est variée de 720 à 760 nm par incréments de 10 nm. La largeur des MMIs est constante à 1.4 μm . En effet, c'est le ratio entre la longueur et la largeur qui permet d'optimiser l'efficacité d'un MMI. Pour déterminer le ratio optimal, il suffit de ne modifier que l'un des deux paramètres. Ces circuits de test sont présentés à la **Figure 3-22**.

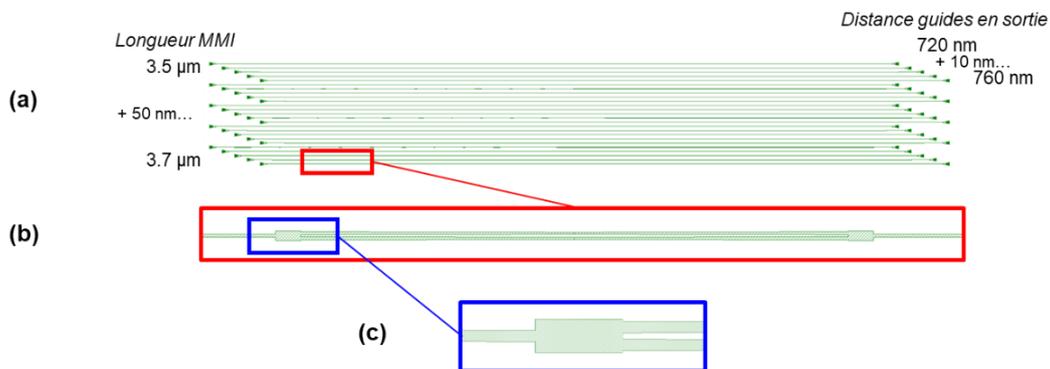


Figure 3-22 Structures de test composées de variantes du MMI nominal sur le lot 1*, a) ensemble des structures de test, b) MMIs connectés en série, c) MMI nominal individuel.

Les pertes des MMIs simulés sont très faibles. Pour pouvoir les mesurer, il est plus facile mesurer les pertes cumulées par plusieurs MMIs en série puis d'en déduire les pertes individuelles par composant. Les structures de test contiennent donc chacune 20 MMIs identiques en série. Le sens de chaque MMI en série est alterné (la sortie d'un MMI est l'entrée du suivant), tel que montré à la **Figure 3-22 (b)**. Chaque structure de test est donc composée de façon alternative par 1 et 2 guides : $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \dots$. Cela permet de connecter plusieurs MMIs les uns à la suite des autres sans avoir à multiplier le nombre de guides de la structure de test (ex : $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \dots$).

Les pertes des MMIs ont été mesurées au *prober* sur 5 puces de la plaque P10 (épaisseur nominale des circuits de 200 nm). Ces résultats sont présentés à la **Figure 3-23** pour la polarisation TE. Chaque mesure est effectuée en mesurant la puissance transmise par le circuit (en dBm) et en connaissant la puissance dans la fibre d'injection. La différence entre la puissance dans la fibre d'injection et le signal mesuré provient des pertes dans le circuit. Les pertes associées à la série de MMIs sont obtenues en soustrayant à cette valeur les pertes connues de propagation, des réseaux de couplage et des connexions entre les fibres optiques en sortie. Le signal résiduel est divisé par le nombre de MMIs dans le circuit pour obtenir les pertes par MMI.

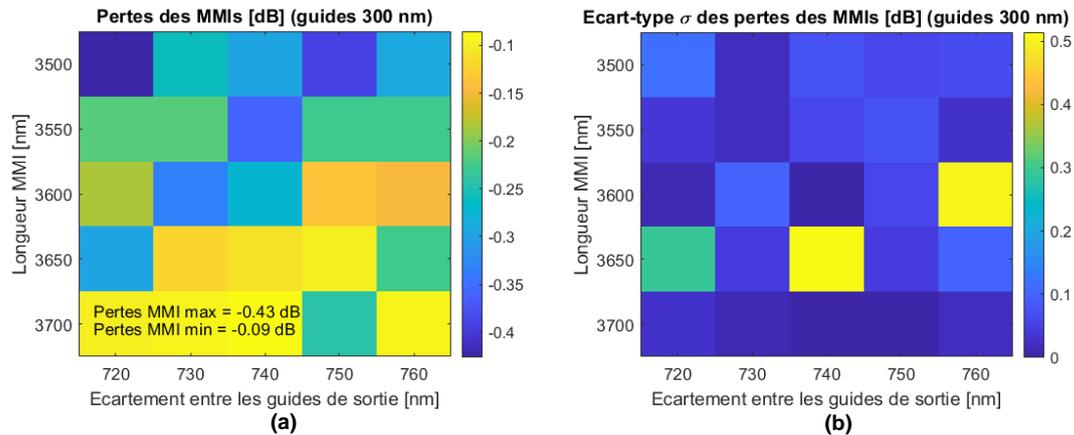


Figure 3-23 Mesures au *probe* des pertes de transmission des MMIs sur le lot 1* (polarisation TE), a) pertes médianes pour chaque dimensionnement de MMI, b) écart-type sur les mesures de pertes de transmission des MMIs.

Les pertes médianes du MMI nominal sont de -0.27 dB avec un écart-type de 0.05 dB. Les pertes médianes maximales et minimales de l'ensemble des MMIs testés sont de -0.43 dB et -0.09 dB respectivement.

Le léger décalage de l'efficacité du MMI nominal entre les simulations (-0.07 dB, soit 98.4%) et les mesures expérimentales (-0.27 dB, soit 94%) peut être partiellement expliqué par le fait que la longueur d'onde de mesure soit différente ($\lambda = 519$ nm) de celle utilisée pour optimiser la conception du MMI ($\lambda = 532$ nm). En effet, on observe à la **Figure 3-21** que l'efficacité de transmission du MMI décroît lorsque la longueur d'onde s'éloigne du maximum de transmission observé à $\lambda = 532$ nm en polarisation TE. La transmission du MMI nominal à $\lambda = 519$ nm est de 97.5% (~ -0.11 dB) selon les simulations FDTD. Le décalage en longueur d'onde n'est donc pas suffisant pour expliquer complètement les pertes plus élevées mesurées expérimentalement. Un autre facteur tel qu'une faible erreur de dimensionnement du MMI lors de sa fabrication pourrait permettre de compléter l'explication de cette différence d'efficacité. En effet, l'écart entre les faces des deux guides de sortie est de 270 nm. Cette valeur se rapproche de la limite de résolution de la machine de photolithographie utilisée (~ 150 nm).

De plus, il a été démontré durant la fabrication du premier lot que les coins droits des composants sont arrondis durant la fabrication, comme par exemple dans les MMIs (voir motifs de test au chapitre 2 **Moyens, 2.3.1 Fabrication du lot 1**). Cet effet et la rugosité des flancs du MMI nominal pourraient contribuer à réduire son efficacité de transmission par rapport à ce qui était attendu par simulation.

Les pertes des MMIs nominaux ont également été évaluées sur 2 puces en polarisation TM sur la plaque P08 (épaisseur du circuit nominale à 200 nm). La médiane de ces pertes est de -0.51 dB ($\sigma = 0.24$ dB). Ces pertes sont plus élevées que le MMI nominal en polarisation TE, tel qu'attendu à l'aide des résultats des simulations numériques de la **Figure 3-21**.

Les pertes des MMIs nominaux à une épaisseur plus élevée ont aussi été mesurées en polarisation TE sur 8 puces (plaque P06, épaisseur du circuit de 220 nm). La médiane de ces pertes est de -0.35 dB ($\sigma = 0.12$ dB). Celles-ci sont légèrement plus élevées que celles obtenues sur les MMIs nominaux de 200 nm d'épaisseur en polarisation TE.

Le déséquilibre d'énergie entre les deux guides de sortie des MMIs nominaux est étudié expérimentalement à la sous-section **3.3.8 Réseaux de guides d'onde**.

3.3.4.3 Comparaison à la littérature

Le MMI nominal a une bonne efficacité de transmission tant dans les simulations numériques qu'expérimentalement. Les résultats de la **Figure 3-23** montrent également qu'une légère variante de notre MMI nominal permet de réduire ces pertes de transmission à -0.09 dB, soit en-dessous du seuil de faible pertes établi à -0.1 dB. Ce MMI a une longueur de 3700 nm et une distance inter-guide de 740 nm.

Dans l'article de W. D. Sacher *et al.*^[3], plusieurs dimensionnements de MMIs sont conçus dans le bleu à $\lambda = 488$ nm. Les dimensionnements de ces MMIs sont similaires à notre MMI nominal. Leur longueur varie de 4 à 5 μm pour une largeur de 1.5 à 1.6 μm . Les pertes qu'il obtient sont similaires aux nôtres, soit de -0.19 à -0.47 dB. Notre MMI optimal nous permet toutefois de réduire légèrement ces pertes par rapport à la conception des MMIs dans cet article.

3.3.5 Coupleur directionnel 3dB

Une autre manière de diviser le signal en deux parties égales est à l'aide d'un coupleur directionnel 3 dB (CD 3dB). Il s'agit de deux guides d'onde rapprochés sur une courte distance. En injectant de la lumière dans le premier guide, une partie de celle-ci est couplée dans le second. En maîtrisant précisément la distance inter-guide et la longueur de couplage, une division égale du signal peut s'effectuer entre les deux guides d'onde.

Pour concevoir un coupleur 3 dB compact la distance inter-guide doit être très faible. Dans notre cas, elle est égale à la précision de fabrication (i.e. ~ 150 nm). Une faible variation de la distance inter-guide peut rapidement modifier le ratio de signal injecté dans chaque sortie du composant. Le principe de fonctionnement du CD 3 dB et ses dimensions critiques proches de la résolution limite de fabrication rendent ce composant moins tolérant aux imperfections de fabrication par rapport au coupleur MMI. Il est donc difficile de diviser de façon homogène un signal initial à l'aide d'une longue série de coupleurs 3 dB. En effet, l'erreur sur le facteur de couplage est cumulée d'un CD 3 dB à l'autre. La proportion d'énergie aux sorties d'une série de CD 3 dB souffrira de ces déséquilibres successifs.

En contrepartie, les coupleurs 3 dB ont deux entrées, ce qui leur confère un avantage par rapport aux MMIs que nous avons conçus précédemment qui n'ont qu'une seule entrée. Le signal divisé dans le CD 3 dB peut donc venir de deux sources différentes. Cet atout est notamment utilisé pour la conception du circuit du lot 2.

3.3.5.1 Simulations numériques

La zone de couplage dans un coupleur 3 dB n'est pas tout à fait régulière. En effet, les deux guides formant le coupleur sont d'abord rapprochés avant d'être parallèles. Les guides sont courbés dans la zone de rapprochement. Cette zone contribue au coefficient de couplage global du composant. Cette contribution est complexe à décrire analytiquement. L'optimisation de la distribution d'énergie dans les deux sorties du coupleur s'effectue donc plutôt à l'aide de simulations numériques FDTD dans RSoft (FullWAVE).

Dans les simulations, on considère que la distance bord-à-bord des guides au centre du coupleur est fixée à 150 nm. La longueur de la zone linéaire de couplage est variée jusqu'à ce qu'on obtienne bien un ratio de 50/50 dans les deux sorties du coupleur.

Les simulations FDTD ont permis de déterminer que le coupleur 3 dB nominal distribuant équitablement le signal à $\lambda = 532$ nm a une zone linéaire de 5.2 μm de long. La division du signal dans ce coupleur est montrée à l'aide d'une simulation BPM à la **Figure 3-24**.

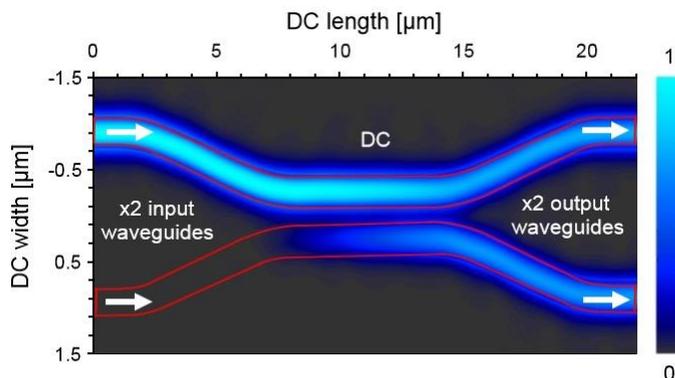


Figure 3-24 Simulation BPM dans RSoft montrant l'intensité du champ électrique normalisé se propageant en deux parties égales dans le coupleur directionnel 3 dB nominal du lot 1*.

La distribution du signal dans ce coupleur est très sensible à la longueur d'onde, tel que montré à la **Figure 3-25**.

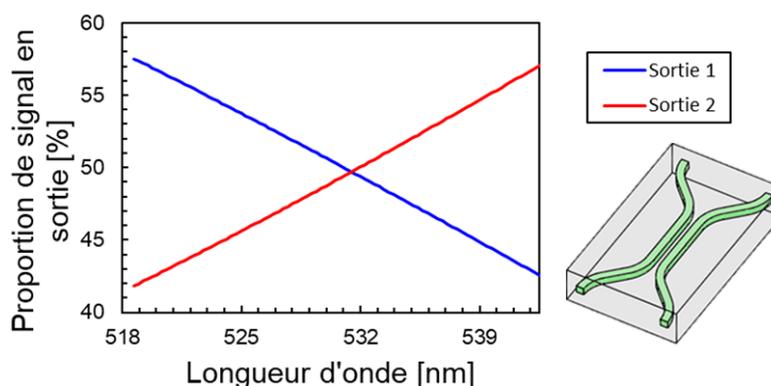


Figure 3-25 Proportion de signal dans les deux sorties du coupleur 3 dB nominal en fonction de la longueur d'onde.

3.3.5.2 Mesures expérimentales

Les structures de test du lot 1* pour des coupleurs directionnels 3dB possèdent différentes longueurs et distances bord-à-bord entre les guides de la zone de couplage linéaire. La longueur du coupleur (i.e. la zone linéaire de couplage) est variée de 4.5 µm à 6.5 µm par incréments de 500 nm. La distance inter-guide (bord-à-bord) est variée de 150 nm à 190 nm par incréments de 10 nm. Ces structures de test sont présentées à la **Figure 3-26**.

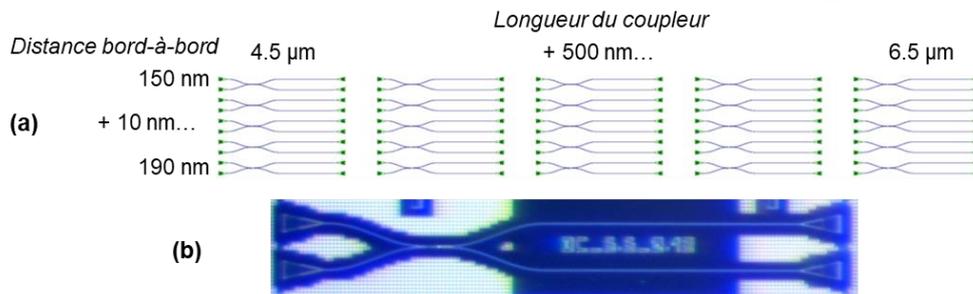


Figure 3-26 Structures de test pour les coupleurs directionnels 3 dB dans le lot 1*, a) plan des variantes des coupleurs 3 dB sur le masque de photolithographie du lot 1*, b) photo au microscope optique de l'une des structures de test

Les mesures au *prober* de l'ensemble de ces variantes du CD 3 dB nominal sont présentées à la **Figure 3-27**. Ces mesures ont été effectuées sur 5 puces de la plaque P10 (circuits d'épaisseur nominale, 200 nm) en polarisation TE.

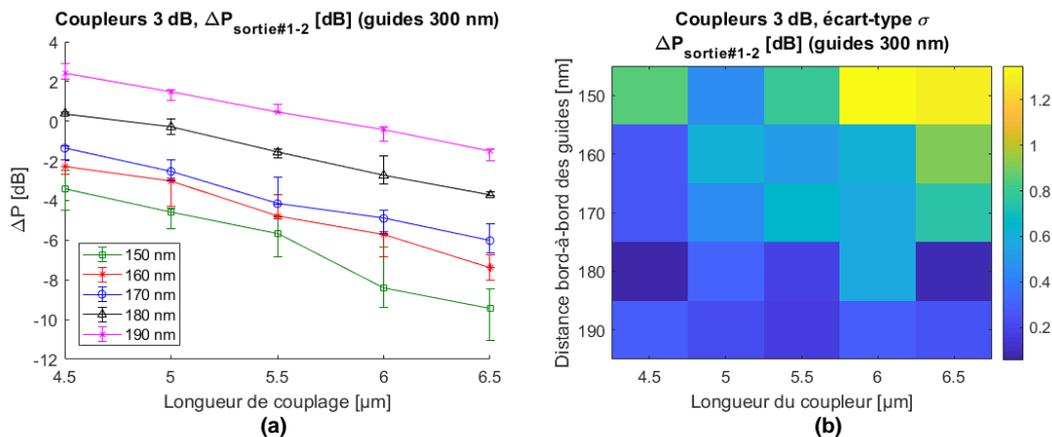


Figure 3-27 Différence de signal mesuré au *prober* (en dB) entre les deux sorties des coupleurs 3 dB du lot 1*. En a) ΔP selon les différents dimensionnements de coupleurs 3 dB, b) écart-type des données en (a).

Les données de la **Figure 3-27** permettent de voir qu'il y a un débalancement d'environ 5 dB entre les deux sorties du coupleur 3 dB nominal. Cette forte différence peut notamment s'expliquer par la sensibilité en longueur d'onde du composant.

En effet, les circuits ont été testés à $\lambda = 519$ nm au lieu de 532 nm. Cela engendre donc un fort débalancement de la puissance mesurée dans chaque sortie du coupleur 3 dB nominal. Selon les données de simulation de la **Figure 3-25**, la sortie 1 devrait capter 58 % du signal et la sortie 2 devrait capter 42 % du signal lorsque $\lambda = 519$ nm. Ce ratio correspond à une différence de 1.4 dB. Cette différence est inférieure à celle mesurée expérimentalement. Les erreurs de fabrication doivent donc contribuer à augmenter le débalancement expérimentalement. En effet, on observe qu'une différence de quelques dizaines de nanomètres dans l'espace bord-à-bord dans la zone linéaire de couplage peut avoir un impact de plusieurs dB dans le débalancement de la puissance en sortie du composant, tel que montré à la **Figure 3-27**.

Les résultats expérimentaux permettent également de déterminer un dimensionnement de coupleur 3 dB avec une distribution de puissance quasi-homogène aux deux sorties lorsque $\lambda = 519$ nm. Il s'agit du coupleur de 5 μm de long et avec une distance bord-à-bord de 180 nm. Celui-ci a un débalancement de seulement 0.27 dB (i.e. $\sim 6\%$) entre ses deux bras de sortie avec un écart-type $\sigma = 0.32$ dB. Ce faible débalancement est toutefois supérieur au seuil établi (1 %, i.e. équivalent seuil de débalancement des MMIs) pour obtenir un coupleur 3 dB avec une bonne homogénéité. De plus, l'écart-type est supérieur au débalancement mesuré et au seuil de 1 %. Cela démontre bien la difficulté de pouvoir fabriquer un coupleur 3 dB avec une bonne répétabilité au niveau du coefficient de couplage.

3.3.6 Réseaux de diffraction

Nous utilisons des réseaux de diffraction pour coupler la lumière de la fibre d'injection vers le circuit puis pour extraire le signal de ce dernier [71][39]-[42]. Le réseau de diffraction a l'avantage de permettre le couplage de la lumière partout sur le plan d'un échantillon, sans le limiter à la bordure de celui-ci comme dans le cas des coupleurs par la tranche [35]. Cela permet également l'analyse automatique d'un grand nombre de circuits sur les plaques à l'aide du *prober*.

De plus, les réseaux de diffraction permettent d'extraire la lumière du circuit afin de former les points d'émission du projecteur rétinien. À terme, les hologrammes sont déposés au-dessus de ces réseaux pour modifier l'angle et la phase d'émission du signal extrait.

Plusieurs paramètres des réseaux de diffraction ont été optimisés pour notre projet :

- 1) Facteur de remplissage.
- 2) Pas.
- 3) Nombre de périodes.
- 4) Profondeur de gravure.
- 5) Épaisseur du BOX.

Ces paramètres ont chacun une influence plus ou moins grande sur les facteurs suivants :

- 1) Angle d'émission du faisceau extrait par le réseau (thêta en degrés).
- 2) FWHM (*Full Width at Half Maximum*, correspondant à la largeur angulaire du faisceau extrait en degrés).
- 3) La directivité d'émission du réseau, soit la proportion d'énergie émise vers le haut (direction de l'œil) et le bas (sens opposé à l'observateur, i.e. environnement extérieur). Les valeurs haut/bas sont identiques lorsque le réseau de diffraction est symétrique (i.e. gravure complète).
- 4) Proportion d'énergie émise vers la gauche du réseau (réflexion vers l'entrée du guide) et vers la droite (faisceau transmis à la sortie du guide).

Les paramètres de simulation sont décrits schématiquement à la **Figure 3-28**.

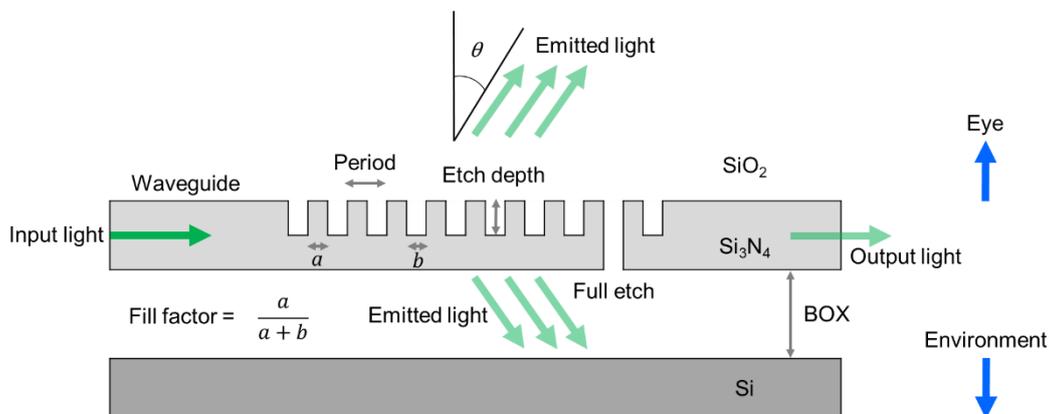


Figure 3-28 Paramètres de dimensionnement des réseaux de diffraction utilisés pour le couplage et l'extraction de signal dans le circuit photonique.

3.3.6.1 Simulations numériques

Les simulations des réseaux de diffraction sont effectuées par FDTD (2D) à l'aide du logiciel RSoft. Celles-ci se concentrent sur l'étude des réseaux de diffraction en extraction pour la longueur centrale $\lambda = 532 \text{ nm}$ et les indices de réfraction standards des matériaux ($n_{SiN} = 2.03$ et $n_{SiO2} = 1.46$).

Les résultats des simulations ont été obtenus pour un réseau de diffraction gravé dans un guide aux dimensions nominales 200 nm x 300 nm. Toutefois, puisque les simulations sont effectuées en 2D dans la coupe longitudinale du guide d'onde, seule l'épaisseur du guide est considérée dans l'espace de simulation (différentes largeurs de guides n'ont donc pas

d'incidence sur les résultats). Généralement, les simulations sont présentées pour la polarisation TE uniquement.

Les angles d'émission dans les simulations RSoft sont donnés dans le milieu de l'oxyde. Il faut utiliser la loi de la réfraction de Snell-Descartes pour en déduire l'angle dans l'air.

Le dimensionnement d'un coupleur par réseau de diffraction peut initialement être estimé analytiquement à l'aide d'une adaptation de la loi de Bragg ^{[1][43][44]}, tel que décrit à l'équation (3.20).

$$n_{eff} - n_c \sin(\theta) = \frac{\lambda_0}{\Lambda} \quad (3.20)$$

Où θ est l'angle d'émission du réseau (calculé à partir de la normale au plan du circuit), Λ est le pas du réseau, n_c est l'indice de l'environnement (encapsulation et BOX) et n_{eff} l'indice effectif du mode du réseau. Cet indice effectif est donné par l'équation (3.21).

$$n_{eff} = f n_{eff1} + (1 - f) n_{eff2} \quad (3.21)$$

Où n_{eff1} est l'indice effectif d'un mode se propageant dans un guide d'onde plan dont l'épaisseur correspond aux zones hautes du réseau (i.e. la partie du guide qui n'est pas gravée) et n_{eff2} aux zones basses du réseau (i.e. la partie du guide qui est gravée). La variable f correspond au facteur de remplissage.

Dans notre cas, nous avons $n_{eff1} = 1.86$, $n_{eff2} = 1.46$ et on pose $f = 0.5$ (valeur standard). En visant un angle d'émission dans l'oxyde de 10° (soit $\sim 15^\circ$ dans l'air), on trouve un pas du réseau de ~ 380 nm. Cette valeur nous permet d'orienter les paramètres pour entamer la conception numérique du réseau de diffraction. Les réseaux de diffraction sont typiquement conçus à des angles de couplage et d'extraction compris entre 10 et 30 deg dans l'air ^[1]. Il s'agit d'un faible décalage angulaire par rapport à la normale (0°) afin d'éviter des phénomènes indésirables dus à la réflexion de signal entre la fibre et le réseau de couplage ou lors de l'extraction du signal par un réseau de sortie.

Le détail des simulations 2D FDTD dans RSoft pour étudier et optimiser chaque paramètre du réseau de diffraction sont présentés à l'Annexe **D**.

Celles-ci permettent de dimensionner le réseau de diffraction nominal du projet. Celui-ci a un facteur de remplissage de 0.5, un pas de 400 nm, 40 périodes, une gravure totale (i.e. 200 nm pour un circuit d'épaisseur nominale) et un BOX de 2 μ m. Le nombre de périodes a été légèrement augmenté sur le lot 1* (40) par rapport au nombre de périodes en simulation (i.e. 25 périodes, voir Annexe **D**) afin de s'assurer de pouvoir capter et émettre l'ensemble du signal à l'aide des réseaux.

3.3.6.2 Mesures expérimentales

Dans le lot 1*, plusieurs structures de test permettent d'étudier des réseaux de diffraction de différents pas. Hormis le pas qui varie, les dimensions des réseaux correspondent à ceux du réseau nominal. Les structures de test sont détaillées schématiquement à la **Figure 3-29**.

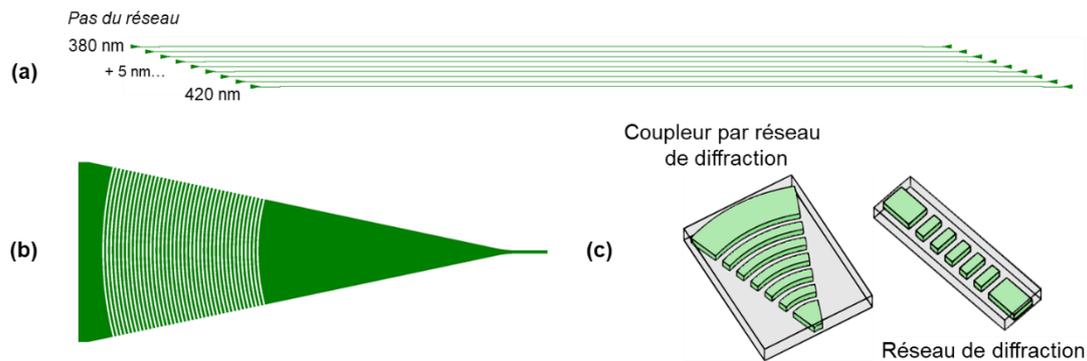


Figure 3-29 Structures de test du lot 1* pour l'étude des réseaux de diffraction en fonction de leur pas, a) ensemble des structures de test, b) gros plan sur un coupleur réseau, c) schémas 3D des coupleurs réseau et d'un réseau de diffraction simple.

A la **Figure 3-29 (b)**, on remarque que la conception du coupleur réseau (réseau courbé en forme de cône) est plus complexe que les réseaux 2D simulés en FDTD sur RSoft. Le composant de couplage cône a été conçu par une autre équipe du CEA-LETI. Ceux-ci ont utilisé un modèle numérique préétabli et se sont basés sur mes paramètres de base (facteur de remplissage, pas, profondeur de gravure, épaisseur du BOX) et sur les caractéristiques de la fibre optique d'injection utilisée expérimentalement pour concevoir ce composant de couplage.

La courbure du coupleur par réseau permet de réduire la taille de ce composant par rapport à des réseaux droits. Notamment, cela permet de fortement réduire la longueur du *taper* entre le réseau de diffraction et le guide monomode à l'extrémité du coupleur ^[1]. Toutefois, la courbure du réseau a peu d'effet sur l'efficacité de couplage. Les coupleurs par réseau courbés sont davantage détaillés dans la littérature ^{[45][46]}.

Dans cette série de structures de test, le pas du réseau de diffraction varie de 380 nm à 420 nm par incréments de 5 nm. La variation du pas permet d'étudier l'angle d'émission des réseaux de diffraction ainsi que leur efficacité de couplage pour un angle de couplage et une polarisation donnés.

Les pertes de couplage des réseaux de diffraction en fonction du pas sont présentées à la **Figure 3-30**. Les mesures ont été effectuées au *prober* sur 5 puces de la plaque P10 (épaisseur nominale du circuit de 200 nm) en polarisation TE. Les angles des fibres optiques en entrée et en sortie sont de 16.5 ° par rapport à la normale à la surface des circuits.

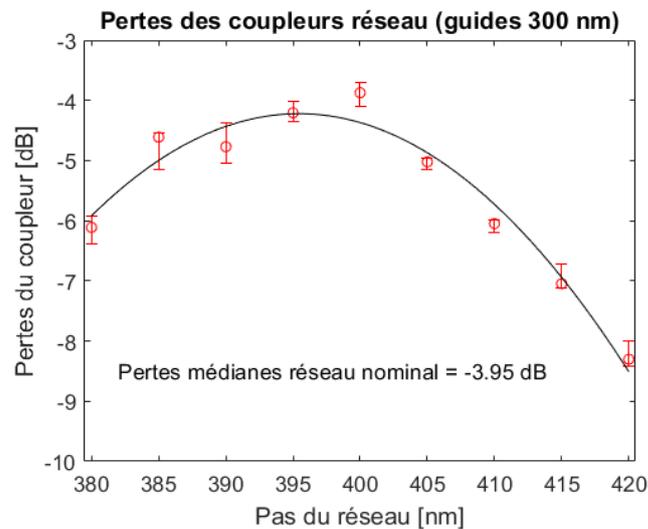


Figure 3-30 Mesures au *prober* des pertes de couplage des réseaux de diffraction sur le lot 1* (polarisation TE). Les pertes sont données pour plusieurs pas de réseaux. La valeur médiane pour chaque pas est représentée par un cercle et les barres d'erreur indiquent les valeurs maximales et minimales mesurées.

On observe à la **Figure 3-30** que les pertes de couplage sont minimisées pour un réseau avec un pas de 400 nm (réseau nominal), tel qu'attendu selon l'angle des fibres du montage. La valeur médiane des pertes du réseau de 400 nm est de -3.95 dB avec un écart-type de $\sigma = 0.12$ dB. La courbe de tendance (fonction de degré deux) semble toutefois orienter le minimum des pertes de couplage vers un pas de 395 nm, ce qui reste très proche de la valeur nominale. De plus, les barres d'erreur des extremums indiquent que les résultats obtenus changent peu d'une puce à l'autre.

Les pertes de couplage augmentent rapidement lorsque la valeur du pas du réseau s'écarte de la valeur nominale. En effet, ces pertes augmentent jusqu'à -8 dB pour un réseau ayant un pas de 420 nm. L'efficacité du réseau est donc très sensible au respect de son dimensionnement lors de la fabrication.

Généralement, on considère que les pertes d'un coupleur par réseau de diffraction standard sont d'environ -3 dB [35]. Cette valeur se rapproche de celle obtenue expérimentalement (- 3.95 dB). Nos coupleurs par réseau ont donc une bonne efficacité de couplage.

Les réseaux de diffraction ont également été étudiés au goniomètre. Ce dernier permet notamment d'en obtenir les caractéristiques angulaires.

La **Figure 3-31** montre l'effet du changement d'angle de couplage en insertion sur l'angle d'émission en sortie pour le circuit de test nominal (pas de 400 nm en entrée et en sortie). La sortie de fibre est polarisée en TE. Les mesures ont été effectuées sur 3 puces de la plaque P09 (épaisseur nominale du circuit à 200 nm).

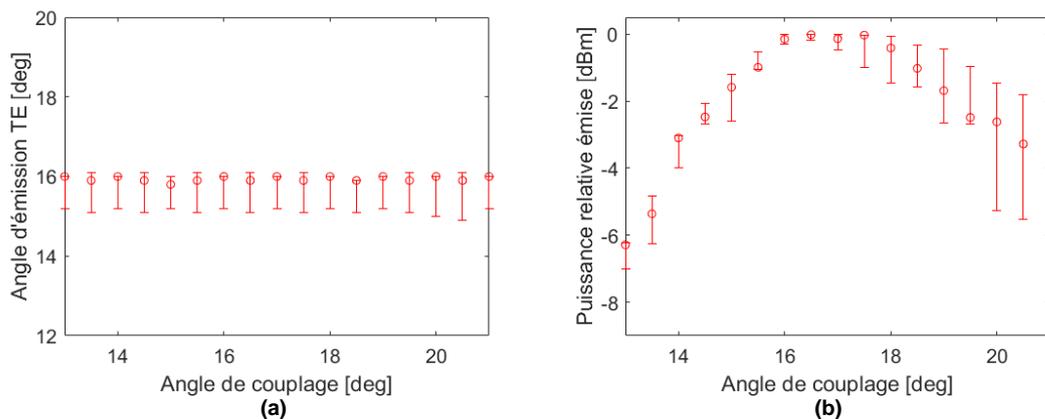


Figure 3-31 Variation de l'angle d'insertion dans le réseau de diffraction nominal (pas de 400 nm) des puces du lot 1* et son effet sur a) l'angle d'émission en sortie du réseau d'extraction, b) la puissance émise par le réseau d'extraction.

A la **Figure 3-31 (a)**, on observe que l'angle d'émission du réseau est indépendant de l'angle de couplage, tel qu'attendu. A la **Figure 3-31 (b)**, on remarque toutefois que l'angle d'insertion a un fort impact sur la puissance mesurée en sortie du circuit. Les mesures ont été effectuées pour des angles d'insertion qui varient par incréments de 0.5° . Le maximum est obtenu entre 16° et 17° . Ces angles se rapprochent de l'angle mesuré en sortie ($15\text{-}16^\circ$) en polarisation TE. La puissance mesurée diminue rapidement pour des angles d'insertion inférieurs à 16° ou supérieurs à 18° .

L'angle d'émission des réseaux en fonction de leur pas a également été étudié au goniomètre. Les résultats des mesures en polarisation TE sont présentés à la **Figure 3-32**. L'angle de couplage en insertion est constant à 16° . Les mesures ont été effectuées sur 3 puces de la plaque P09 (épaisseur nominale du circuit à 200 nm).

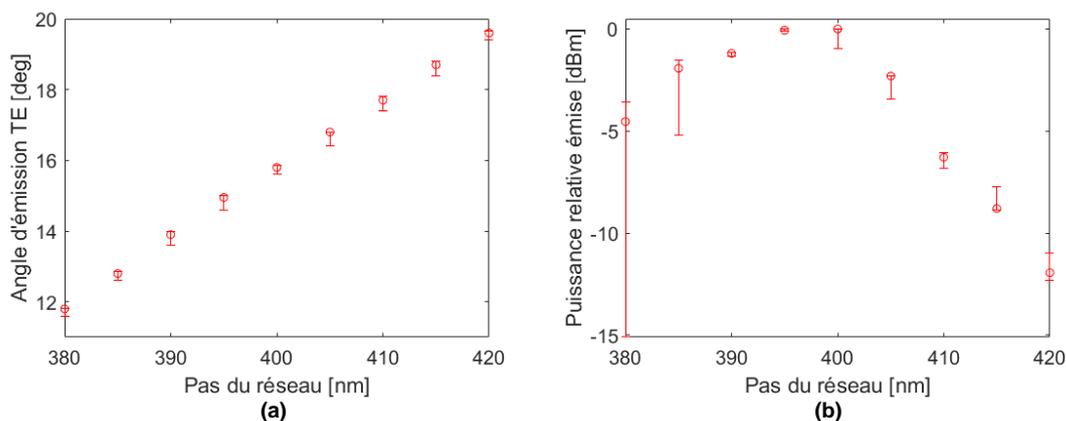


Figure 3-32 Variation du pas des réseaux de diffraction et son effet sur a) l'angle d'émission en sortie du réseau d'extraction, b) la puissance émise par le réseau d'extraction.

On remarque à la **Figure 3-32 (a)** que l'angle d'émission augmente proportionnellement au pas du réseau.

Pour un pas de 410 nm l'angle d'émission est de 18° alors qu'il est de 16° pour un pas de 400 nm . Une faible erreur de gravure sur les réseaux peut donc mener à un changement important de l'angle d'émission en sortie.

A la **Figure 3-32 (b)**, on remarque tout comme au *prober* que le pas a un fort impact sur l'efficacité de couplage, et donc sur le signal extrait du circuit. A un angle d'insertion constant de 16 deg, le coupleur a une efficacité maximale lorsque le réseau a un pas entre 395 nm et 400 nm. Cet intervalle correspond à celui obtenu sur la courbe des mesures du *prober*. L'efficacité de couplage diminue rapidement lorsque le pas s'éloigne de cette valeur centrale.

L'angle d'émission en fonction de l'épaisseur du réseau de diffraction a été étudié pour les polarisations TE et TM. La **Figure 3-33** présente les scans angulaires en intensité des réseaux de diffraction sur des circuits de 180, 200 et 220 nm d'épaisseur.

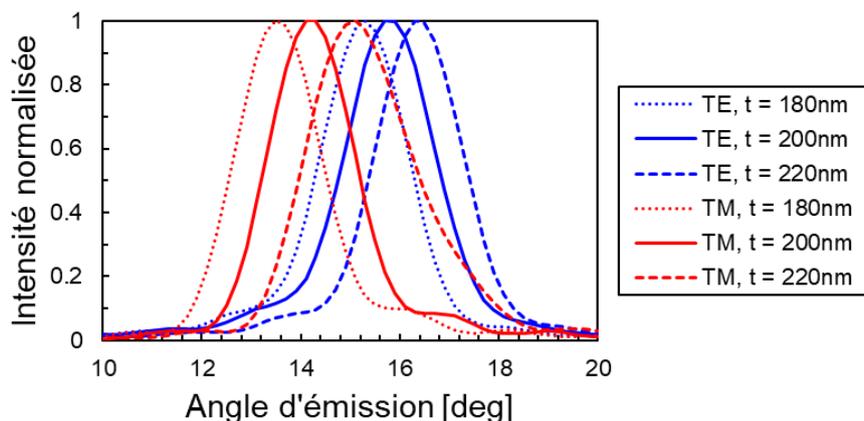


Figure 3-33 Courbes d'émission angulaire des réseaux de diffraction de différentes épaisseurs pour les polarisations d'injection TE ou TM. Les courbes ont été obtenues à l'aide du goniomètre sur les plaques P03, P05 et P09 du lot 1*.

On remarque que l'épaisseur des réseaux a un faible impact sur l'angle d'émission. Une augmentation de l'épaisseur augmente les angles d'émission TE et TM. Inversement, une réduction de l'épaisseur du réseau diminue les angles d'émission TE et TM.

Les angles d'émission mesurés au goniomètre peuvent être comparés à ceux attendus à l'aide des simulations FDTD tel que présenté au **Tableau 3-3**. Ces simulations sont effectuées pour le réseau de diffraction nominal en considérant une épaisseur de BOX de 2 μm . La couche de substrat de Si sous le BOX est également incluse dans l'espace de simulation.

Tableau 3-3 Angles d'émission du réseau nominal en fonction de la longueur d'onde de conception du réseau ($\lambda = 532$ nm) ou de celle des mesures expérimentales ($\lambda = 519$ nm), en considérant une encapsulation « infinie » ou de 200 nm (réaliste par rapport aux conditions de fabrication).

Polarisation	Longueur d'onde [nm]	Épaisseur de l'encapsulation [nm]	Angle d'émission dans l'oxyde [deg]	Angle d'émission dans l'air [deg]	Différence d'angle d'émission dans l'air entre TE et TM [deg]
TE	532	200	11.4	16.8	2.4
TM			9.8	14.4	
TE		Infinie	11.2	16.5	2.1
TM			9.8	14.4	
TE	519	200	12.6	18.6	2
TM			11.3	16.6	
TE		Infinie	12.4	18.3	1.5
TM			11.4	16.8	

On peut observer au **Tableau 3-3** que l'écart observé entre les pics d'émission en polarisation TE et TM est de 2° dans le cas du réseau d'encapsulation de 200 nm à la longueur d'onde des mesures expérimentales ($\lambda = 519$ nm). Cet écart correspond approximativement à celui mesuré expérimentalement (1.6°) entre les pics d'émission des réseaux d'épaisseur nominale (200 nm) en polarisation TE et TM à la **Figure 3-33**.

Expérimentalement, on observe à la **Figure 3-33** que les pics d'émission du réseau d'épaisseur nominale (200 nm) sont à 15.9° et $14.3^\circ \pm 0.2^\circ$ pour les polarisations TE et TM respectivement. Ces pics sont de 2.7° et 2.3° inférieurs à ceux déterminés au **Tableau 3-3** pour un réseau dont les conditions de simulation correspondent aux paramètres expérimentaux. L'angle attendu par simulation en polarisation TE (18.6°) correspond davantage à celui mesuré pour le réseau dont le pas est de 415 nm (18.7°) tel que montré à la **Figure 3-32 (a)**.

Les données angulaires combinées aux images FIB à la sous-section **2.3.1 Fabrication du lot 1** au chapitre 2 peuvent nous permettre de déterminer l'indice effectif équivalent à notre guide d'onde en Si_3N_4 (n_{eff1}). En considérant un pas de 400 nm, $\lambda = 519$ nm, $n_c = 1.46$ et $\theta = 10.8$ deg dans l'oxyde (soit 15.9 deg dans l'air), on peut déterminer à l'aide de l'équation (3.20) que l'indice effectif du mode du réseau est de 1.57. Les images FIB du chapitre précédent permettent de déterminer que le facteur de remplissage de nos réseaux est de ~ 0.42 . En utilisant l'équation (3.21) et en considérant $n_{\text{eff2}} = 1.46$ (données de simulation), on peut déterminer que $n_{\text{eff1}} = 1.72$. Cette valeur est très proche de celle obtenue par simulation ($n_{\text{eff1}} = 1.74$) à la sous-section **3.3.1 Guide d'onde monomode**. Une méthode plus classique pour mesurer l'indice effectif est décrite à la sous-section suivante à l'aide des interféromètres de Mach-Zehnder.

3.3.7 Interféromètre de Mach-Zehnder

Des interféromètres de Mach-Zehnder (MZIs) passifs ont été conçus pour déterminer les valeurs des indices effectifs des guides d'onde nominaux.

Précédemment, les valeurs des indices effectifs étaient obtenues à l'aide des simulations ou d'une série de mesures sur les réseaux de diffraction (sous-section précédente). Les indices effectifs sont déterminés en fonction du dimensionnement du guide d'onde et des indices de réfraction des matériaux qui le composent et qui l'entourent. Toutefois, la valeur de l'indice effectif lors de la fabrication peut varier légèrement des simulations, en fonction du respect des dimensionnements des guides d'onde et des conditions et méthodes de dépôt utilisées. La mesure expérimentale de l'indice effectif du guide nominal permet de valider les paramètres utilisés dans la conception numérique de nos composants. Il peut aussi servir à affiner de futures simulations.

Un interféromètre de Mach-Zehnder est composé d'un guide d'onde séparé en 2 bras. Dans notre cas, la séparation s'effectue à l'aide d'un coupleur MMI. Il y a interférence entre les faisceaux des 2 bras lorsqu'ils sont couplés de nouveau à l'aide d'un second coupleur MMI. Le premier bras a une longueur constante. Le second bras du MZI a une longueur égale ou supérieure à celle du premier. La différence de longueur entre les 2 bras détermine s'il y a une interférence constructive ou destructive entre leurs 2 faisceaux. La différence de longueur entre deux extrêmes d'interférence (constructif ou destructif) permet de déterminer l'indice effectif du guide d'onde.

Les MZIs sont des éléments simples et connus et dont la description est répandue dans la littérature [\[1\]\[6\]\[7\]](#). L'équation de base des MZIs permet de déterminer qu'il y a une interférence constructive entre les ses 2 bras lorsque [\[47\]](#) :

$$\frac{\lambda_0}{n_{eff}} = m * \Delta L \quad (3.22)$$

Où n_{eff} est l'indice effectif du guide d'onde, m est l'ordre d'interférence et ΔL est la différence de longueur entre les 2 bras de l'interféromètre.

À l'aide des simulations précédentes, on sait que $n_{eff} = 1.736$ pour notre guide d'onde nominal à $\lambda = 519$ nm. De plus, on peut simplement poser qu'on s'intéressera au premier ordre d'interférence, soit $m = 1$. On peut donc estimer à l'aide de l'équation ci-haut que $\Delta L \approx 300$ nm. Pour déterminer l'indice effectif expérimentalement, nous avons conçu une série de MZIs passifs ayant un décalage des bras qui varie de 0 à 500 nm (i.e. de 0 à $\sim 1.7 \Delta L$) par incréments de 20 nm. Cela devrait permettre de trouver au moins deux maximums ou minimums d'interférence en mesurant le signal transmis à la sortie de chacun des MZIs. La distance entre ceux-ci pourra nous permettre de déterminer n_{eff} .

Le décalage maximal des bras des MZIs est inférieur à la longueur de cohérence du laser utilisé expérimentalement (300 μ m).

Il est également possible d'obtenir n_{eff} à l'aide de l'intervalle spectral libre (FSR, *Free Spectral Range*) [47]. Pour ce faire, il faut toutefois étudier la transmission en sortie d'un MZI en fonction de la longueur d'onde. Dans notre cas, nous n'avons pas de laser accordable dans la gamme spectrale autour de 532 nm au moment de la thèse. Cette méthode n'a donc pas été utilisée pour caractériser nos MZIs et le n_{eff} .

La courbe attendue de l'intensité transmise I en sortie de la série des MZIs est définie par l'équation suivante [1] :

$$I = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{n_{eff} \Delta L}{\lambda} \right) \right] \quad (3.23)$$

Où I_0 est l'intensité en entrée du MZI (i.e. $I_0 = 1$ dans le cas normalisé). L'équation est représentée graphiquement à la **Figure 3-34** ($\lambda = 532$ nm).

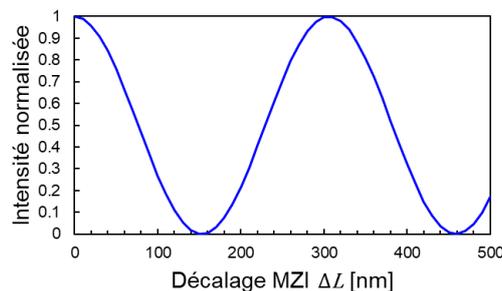


Figure 3-34 Intensité théorique en sortie du MZI en fonction du décalage entre ses bras ($\lambda = 532$ nm).

3.3.7.1 Mesures expérimentales

La série d'interféromètres de Mach-Zehnder passifs pour des guides de 300 nm de large sur le lot 1* est présentée à la **Figure 3-35**.

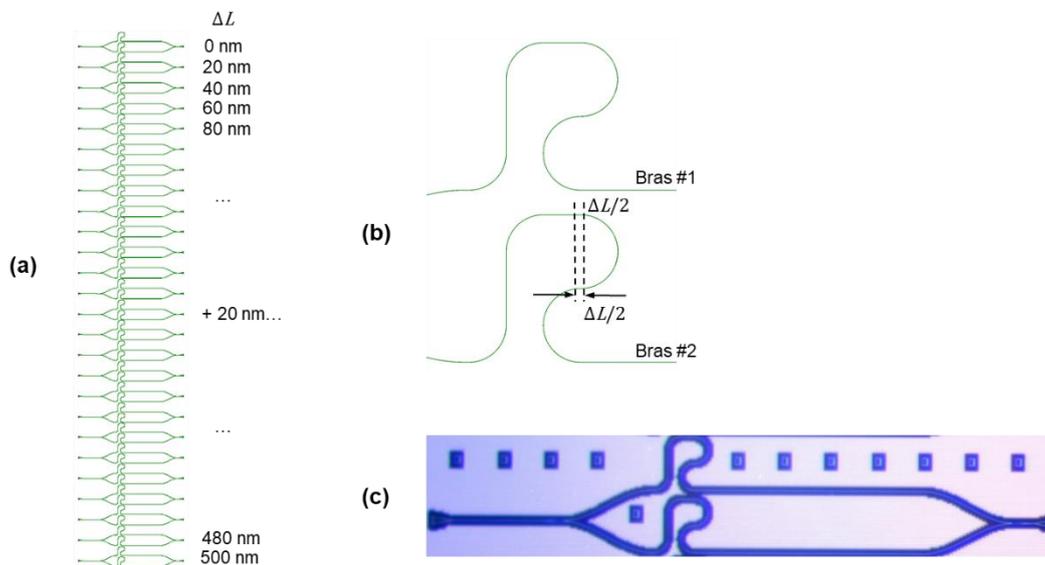


Figure 3-35 Structures de test pour les interféromètres de Mach-Zehnder passifs sur le lot 1*, a) série complète des MZIs de décalage variant, b) décalage du bras #2 par rapport au bras #1, c) photo au microscope optique d'un MZI passif complet.

Il y a également des structures de test pour des MZIs actifs sur les plaques du lot 1*. Dans ce cas, des électrodes permettent d'alimenter une chaufferette sur chaque structure de test. La chaufferette permet de modifier l'indice effectif de l'un des deux bras d'un MZI (effet thermo-optique) afin de moduler la transmission du MZI en sortie [48][49]. Des MZIs avec des chaufferettes de différentes formes et dimensions sont fabriquées dans le lot 1*, tel que présenté à la **Figure 3-36**. Ces variantes ont pour but de déterminer le dimensionnement et la forme de la chaufferette qui permet d'effectuer un déphasage de 0 à π tout en minimisant sa consommation énergétique. Ces variantes sont basées sur des travaux précédents d'autres équipes au CEA-LETI et n'ont pas fait l'objet d'une conception spécifique pour ce projet de thèse. Ces chaufferettes étaient prévues initialement pour des MZIs dans le spectre IR.

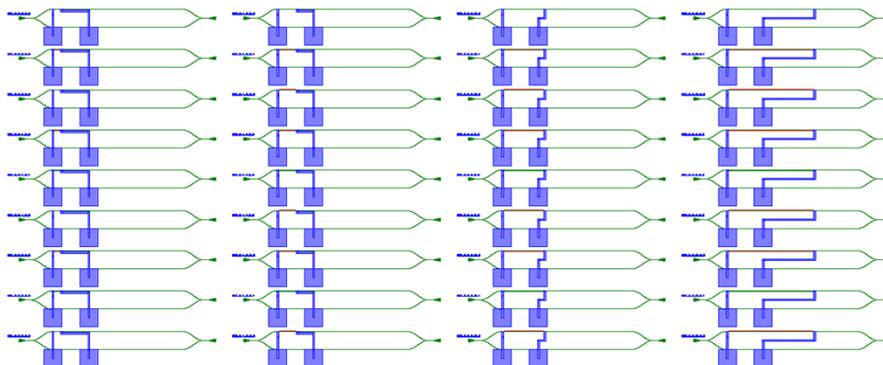


Figure 3-36 Structures de test pour les interféromètres de Mach-Zehnder actifs sur le lot 1* avec en vert les guides d'onde, en bleu les électrodes et les chaufferettes et en rouge les tranchées d'isolation thermique.

Le détail de l'un des MZI actif est présenté à la **Figure 3-37**.

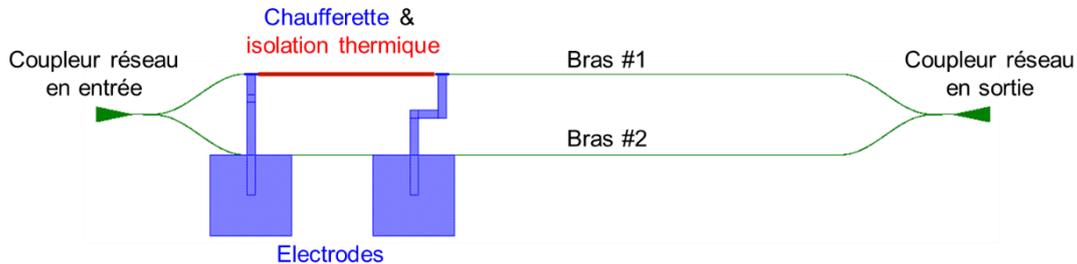


Figure 3-37 Détail des composants d'un Mach-Zehnder actif sur le lot 1*.

Les mesures du signal transmis en sortie des MZIs passifs en fonction du décalage des bras est présenté à la **Figure 3-38**. Ces mesures ont été effectuées au *prober* sur 5 puces sur la plaque P10 (circuits d'épaisseur nominale, i.e. 200 nm) en polarisation TE. Des mesures effectuées manuellement au goniomètre sur 2 puces de la plaque P09 sont montrées pour comparaison.

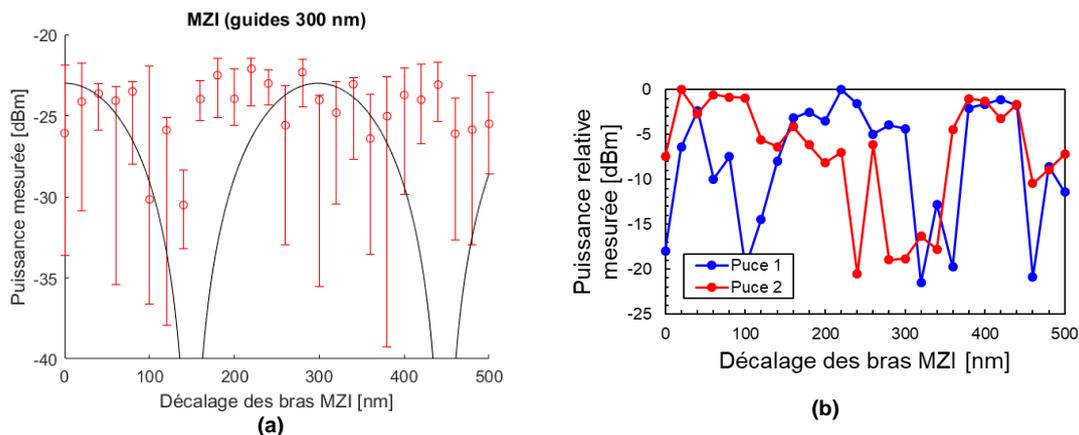


Figure 3-38 Mesures de transmission des MZIs passifs en fonction du décalage des bras des MZIs du lot 1*, a) mesures au *prober* sur 5 puces de la plaque P10. Les résultats sont comparés à la courbe théorique attendue à $\lambda = 519$ nm (noir). En b) mesures superposées de 2 puces de la plaque P09 effectuées au goniomètre.

A la **Figure 3-38 (a)**, les résultats sont comparés au modèle théorique de l'équation (3.23) pour $\lambda = 519$ nm. On pose dans ce modèle que $I_0 = -23$ dBm. Cette valeur correspond environ au plateau de puissance observé sur la figure. On observe que les résultats des mesures au *prober* ne permettent pas de distinguer la fonction d'interférence attendue théoriquement. Les points de mesure ont également une très grande marge d'erreur entre leurs extremums.

Les mesures ont été répétées au goniomètre, tel que montré à la **Figure 3-38 (b)**. Les mesures effectuées sur cet outil ne permettent pas non plus d'observer la fonction d'interférence attendue théoriquement. Le graphique permet toutefois d'identifier des zones hautes et basses qui correspondent à des interférences constructives et destructives. Les positions des zones hautes et basses semblent varier aléatoirement d'une puce à l'autre. Les mesures ont été répétées au goniomètre pour chacune des puces mais cela a eu peu d'impact sur la forme de leur courbe respective.

Dans notre cas, nous avons étudié des MZIs passifs dont les décalages des bras sont associés au premier ordre d'interférence ($m = 1$). Adar *et al.* [50] ont toutefois démontré que de faibles

variations aléatoires des conditions de fabrication (épaisseur des dépôts, homogénéité de gravure des guides) au sein d'une même plaque peuvent perturber le fonctionnement de MZIs de faible ordre d'interférence. Par exemple, la rugosité de surface le long d'un guide formant le bras d'un MZI fait varier son indice effectif de façon aléatoire le long de celui-ci. Cela engendre un déphasage du mode qui se propage, en plus du déphasage causé par la différence de longueur physique entre les bras du MZI. Le déphasage causé par une faible variabilité des conditions de fabrication sur la plaque peut perturber l'interférence en sortie des MZIs pour de faibles ordres d'interférence. Adar *et al.* proposent donc d'étudier des MZIs ayant plusieurs dizaines d'ordres d'interférence ($m > 30$) pour s'affranchir de l'impact des défauts de fabrication des guides sur les mesures d'interférence des MZIs.

L'hypothèse que la qualité et l'uniformité de fabrication aient eu un fort impact sur le bon fonctionnement de nos MZIs passifs est supportée par deux éléments. Le premier provient des grandes pertes de propagation mesurées sur nos guides d'onde (forte rugosité de surface). Le second est le faible décalage entre les bras des MZIs (0 à 500 nm) qui est du même ordre de grandeur que la précision de fabrication utilisée (~ 150 nm). Le décalage réel entre les bras des MZIs n'est donc probablement pas exactement le même que celui prévu lors de la conception du composant.

De plus, il est possible que la fonction d'interférence soit difficilement observable expérimentalement dans notre cas à cause du déséquilibre des bras des coupleurs MMIs utilisés dans les interféromètres. En effet, il est présenté à la sous-section **3.3.8 Réseaux de guides d'onde** que le fonctionnement de nos MMIs est très sensible à l'alignement de la fibre optique en entrée. Si celle-ci est faiblement désalignée, le premier MMI qui sépare en deux parties le signal d'injection est déséquilibré. Les deux sorties du MMI ne collectent donc pas la même quantité d'énergie (ex: 40 et 60 % au lieu de 50 % chacun). Cela peut être particulièrement problématique dans le cas de MZIs car l'énergie des deux bras qui interfèrent n'est pas égale. Si celle-ci varie aléatoirement en fonction de l'alignement de la fibre d'entrée, il peut être très difficile d'obtenir la fonction d'interférence théorique des MZIs. Ce phénomène peut être particulièrement présent au *prober* car l'appareil cherche à trouver un maximum en transmission lors de ses alignements automatiques. Il peut donc désaligner volontairement la fibre en entrée pour maximiser le signal en sortie alors que le MZI est prévu pour effectuer une interférence destructive (i.e. minimum de signal en sortie). Au goniomètre, les mesures manuelles se basaient sur une autre technique d'alignement et avaient une bonne répétabilité. Le phénomène de déséquilibre des MMIs est donc probablement moins présent dans ce cas.

Les interféromètres de Mach-Zehnder actifs ont également été testés au *prober* à l'aide de connecteurs électriques. Ceux-ci ont été étudiés sur 5 puces de la plaque P12 (lot 1*) en polarisation TE. Les mesures permettent d'observer la fonction d'interférence entre les deux bras de sortie en fonction de la puissance électrique injectée dans les chaufferettes.

La puissance électrique minimale permettant d'effectuer un déphasage de 0 à π est de 28 mW. Cela correspond à une chaufferette de 64 μm de long et d'une largeur comprise entre 500 nm et 1.15 μm . La chaufferette est positionnée au-dessus du guide d'onde formant l'un des bras du MZI actif. Celle-ci est entourée de deux tranchées d'isolation thermique segmentées de 1 μm x 28 μm de part et d'autre du guide. La même chaufferette constituée de tranchées d'isolation continues nécessite une puissance de 50 mW pour effectuer un déphasage de 0 à π . Les schémas de la chaufferette à tranchées segmentées et de son équivalent à tranchées continues sont présentés à la **Figure 3-39**.

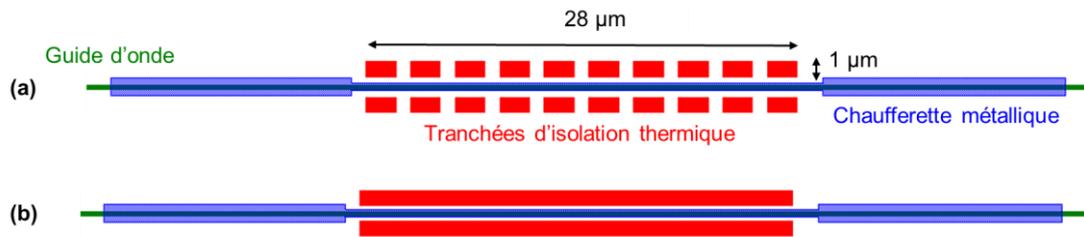


Figure 3-39 Chauffeuses métalliques des interféromètres de Mach-Zehnder actifs. Le guide d'onde est représenté en vert, la chauffeuse en bleu et les tranchées d'isolation thermique en rouge. En a) chauffeuse avec tranchées d'isolation thermique segmentées en blocs rectangulaires individuels, b) chauffeuse avec des tranchées continues.

Les données du *prober* associées à ces deux chauffeuses et aux Mach-Zehnder qu'elles modulent sont présentées à la **Figure 3-40**.

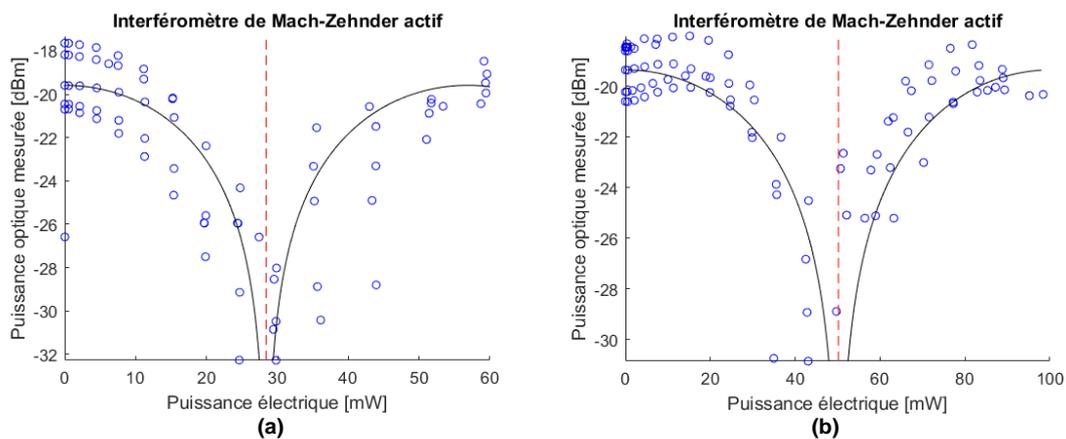


Figure 3-40 Mesures au *prober* de la transmission en sortie des MZIs actifs en fonction de la puissance électrique injectée dans la chauffeuse de déphasage, a) chauffeuse à tranchées segmentées, b) chauffeuse à tranchées continues. Les nuages de points sont associés aux mesures effectuées sur 5 puces sur la plaque P12 (lot 1*, polarisation TE). La position médiane des points dans le creux des courbes (interférences destructives) a été utilisée pour définir la position du déphasage de π (représentée par la ligne pointillée rouge). La fonction théorique d'interférence en cosinus (noir) correspondant à cette position est superposée aux données à titre indicatif.

On remarque à la **Figure 3-40** que le facteur d'extinction (i.e. la différence entre les maximums et minimums de transmission) des MZIs actifs est d'environ 13 dB. L'interférence destructive permet donc de réduire le signal à $\sim 5\%$ relativement au maximum obtenu par interférence constructive. Dans la littérature, on retrouve que le facteur d'extinction est généralement limité à 20-25 dB pour les MZIs [35].

Les chauffeuses présentées à la **Figure 3-40** sont relativement compactes pour les besoins du projet. Il serait également intéressant de tester des chauffeuses encore plus petites dans une prochaine itération de conception. Cela serait toujours dans l'objectif final de compacter le circuit afin d'augmenter la résolution du projecteur rétinien.

Des chauffeuses plus grandes ont également été testées (jusqu'à 466 μm de long). Toutefois, leur plus grande taille leur confère une résistance électrique plus élevée. La tension électrique nécessaire pour leur appliquer un déphasage de 0 à π est donc beaucoup plus importante que pour les chauffeuses de taille réduite à la **Figure 3-40**. Lors de nos mesures, la tension a été limitée à 10 V. Il n'a donc pas été possible d'observer un déphasage complet des chauffeuses plus grandes.

La fréquence de modulation des MZIs n'a pas été testée.

De plus, dans de prochaines itérations de conception, il pourrait être intéressant d'étudier d'autres phénomènes pour la modulation d'indice (ex : effet de dispersion plasma [51]) ou d'autres types de composant de modulation (ex : anneaux résonants [19],[52]-[56]). Selon Subbaraman *et al.* [35], l'effet de dispersion plasma permet de concevoir des modulateurs à haute fréquence et à faible consommation électrique. Les anneaux de résonance permettent quant à eux de réduire la surface du modulateur optique. En contrepartie, le fonctionnement de l'anneau de résonance est plus sensible en longueur d'onde par rapport au MZI [35].

3.3.8 Réseaux de guides d'onde

La majorité des blocs de base détaillés précédemment ont été combinés dans des réseaux de guides d'onde. Ces réseaux permettent de tester notre capacité à assembler et à faire fonctionner efficacement les blocs de base ensemble. Ces réseaux représentent de grandes surfaces de guides d'onde parallèles. Des réseaux partiels sont gravés le long des guides et permettent d'agir comme des points d'émission simples. Un circuit de réseau de guides d'onde représente donc une première étape de démonstrateur pour projeter des images à l'aide d'un circuit photonique.

Les réseaux de guides d'onde sont fabriqués et livrés sur un substrat opaque (Si). Les points d'émission distribués sur la « surface de guides » n'ont donc pas d'interaction avec des hologrammes. En effet, il est nécessaire que l'ensemble du circuit soit transparent pour pouvoir y enregistrer des hologrammes en réflexion, ce qui n'est pas le cas dans le lot 1*.

L'étude des réseaux de guides d'onde se concentre sur deux points majeurs:

- 1) Valider que la lumière est bien transportée et distribuée de façon homogène dans le réseau de guides d'onde à l'aide des MMIs.
- 2) Valider la proportion de lumière extraite par les réseaux partiels formant les premières distributions de points d'émission pour la formation d'image.

Dans notre cas, les réseaux de guides sont composés de plusieurs guides d'onde (de 2 à 1024 guides) qui s'étendent sur une longue distance (jusqu'à 1 mm). On obtient ainsi une « surface de guides ». Des points d'émission peuvent être créés sur cette surface en gravant des réseaux de diffraction le long des guides d'onde à différents endroits de celle-ci. Une image statique est formée par la distribution de points d'émission. La surface de guides agit donc comme un écran de projection dont les guides d'onde et les réseaux de diffraction formeraient les pixels.

Un réseau de guides d'onde avec 1024 guides est présenté à la figure suivante **Figure 3-41**. Dans le lot 1*, nous avons des réseaux de 2, 4, 8, 16, 128 et 1024 guides d'onde.

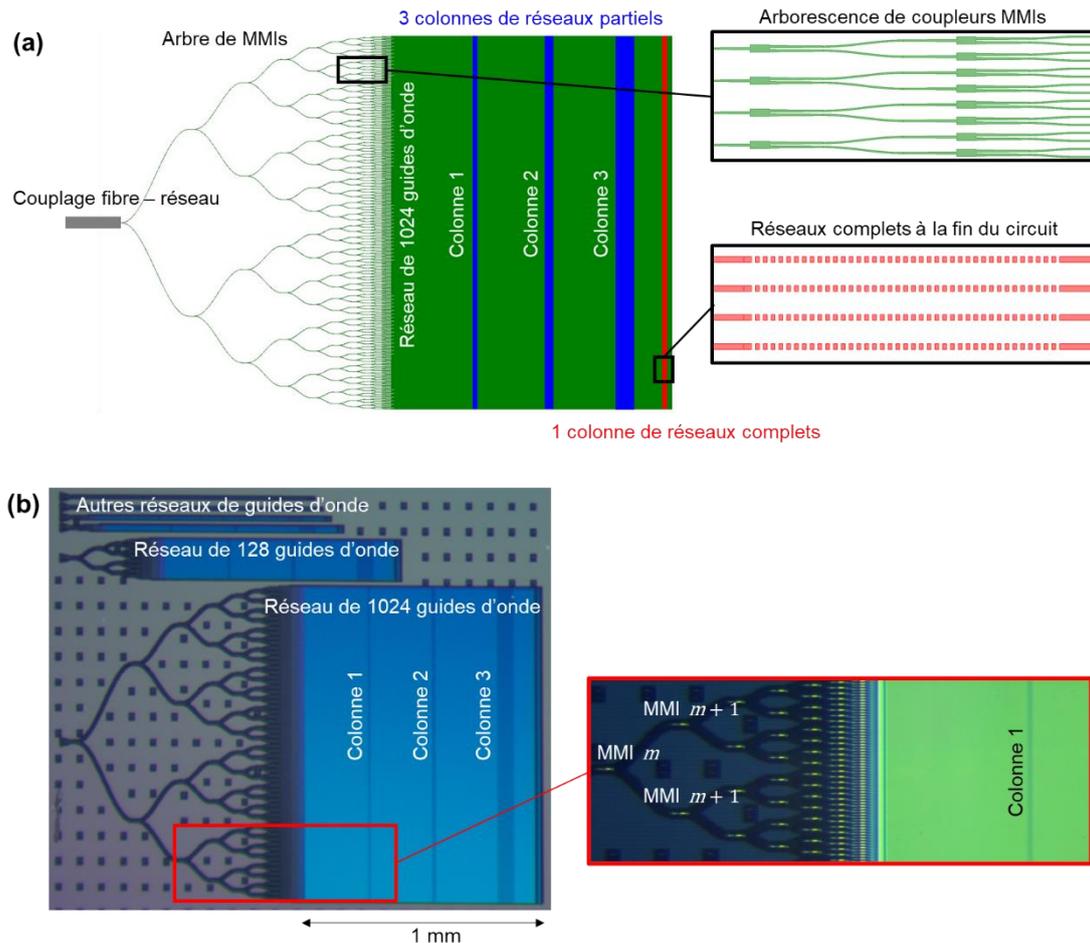


Figure 3-41 Réseau de guides d'onde avec 1024 guides et 3 colonnes de réseaux partiels dans le lot 1*, a) schéma du réseau tiré du masque de photolithographie, b) observation de l'ensemble des réseaux de différentes dimensions au microscope optique. Un zoom est effectué au début du réseau de 1024 guides d'onde pour mieux observer l'arborescence des coupleurs MMIs. La première colonne de MMIs observée est dénotée m , la suivante $m + 1$ et ainsi de suite.

A la **Figure 3-41**, on observe qu'il y a un réseau de diffraction au début des réseaux de guides. Il sert de coupleur d'entrée pour la lumière provenant de la fibre optique d'injection. Ensuite, une suite de MMIs en cascade ($m, m + 1 \dots n$) permet de multiplier le nombre de guides jusqu'à 2^n . Le plus grand réseau est composé de 1024 guides d'onde à la fin d'un arbre de 10 MMIs. Ces guides s'allongent linéairement sur 1 mm. Ils sont distants de $1.5 \mu\text{m}$ centre-à-centre afin d'éviter les effets de couplage.

Sur cette surface de guides, on observe 3 colonnes (lignes bleu foncé à la **Figure 3-41 (a)**). Elles représentent des réseaux de diffraction de différentes longueurs et gravés partiellement dans les guides. Chacun des 1024 guides possède donc 3 réseaux de diffraction partiels en série. Visuellement, cela permettrait de voir une image de 3 lignes verticales (décrites comme des « colonnes » sur les figures). La gravure partielle permet une faible extraction du signal par un réseau d'extraction, permettant de conserver de l'énergie à sa sortie pour l'entrée du réseau suivant. Les 3 réseaux de diffraction de chaque guide sont graduellement allongés (augmentation du nombre de périodes de chaque réseau de diffraction) afin d'émettre la même quantité d'énergie (émission homogène énergétiquement).

Le premier réseau de diffraction extrait $1/3$ de l'énergie d'entrée d'un guide. L'énergie d'entrée du 2^{ème} réseau de diffraction est donc égale à $2/3$ de celle à l'entrée du 1^{er} guide. Pour que ce

2^{ème} réseau émette une quantité d'énergie égale au 1^{er}, celui-ci doit extraire une plus grande quantité de l'énergie qu'il reçoit. Dans ce cas, il doit extraire 1/2 de son signal d'entrée ($1/2 \times 2/3 = 1/3$, soit la même énergie que celle émise par le 1^{er} réseau de diffraction). À terme, il devient complexe d'augmenter le nombre de réseaux de diffraction en série le long d'un même guide d'onde car les réseaux successifs doivent être de plus en plus longs pour être homogènes énergétiquement.

Avec une gravure partielle de 40 nm et pour une distribution quasi-équivalente d'énergie, le premier réseau doit avoir 26 périodes, le second 43 périodes et le troisième 200 périodes selon des résultats de simulation FDTD sur RSoft. En pratique, des réseaux partiels gravés de 30, 40 et 50 nm (variantes sur plusieurs plaques) sont fabriqués et testés expérimentalement.

La fin du réseau de guides d'onde est complétée par un réseau d'extraction complet (colonne rouge à la **Figure 3-41 (a)**). Cela signifie que le réseau de diffraction à la fin du circuit permet d'extraire tout le signal restant qui n'aurait pas été extrait éventuellement par les réseaux de diffraction servant à former une image (réseaux bleus). Le réseau d'extraction complet est formé de 40 périodes et est gravé complètement pour maximiser l'efficacité d'extraction du signal.

3.3.8.1 Mesures expérimentales

L'étude expérimentale des réseaux de guides d'onde se concentre sur les plus gros réseaux, i.e. ceux à 128 et 1024 guides. Ce sont les réseaux dont la grande taille s'apparente le plus à celle des circuits photoniques que l'on souhaite développer pour l'application finale du projet.

Ces grands réseaux ont un très grand nombre de sorties, égal au nombre de guides du réseau multiplié par le nombre de réseaux de diffraction le long de chacun de ceux-ci (ex : 1024 guides \times 4 réseaux = 4096 sorties pour le plus grand réseau testé). Il n'est pas réalisable de caractériser ces sorties de manière conventionnelle au *prober*. Nous avons plutôt opté pour une étude de l'émission des points à l'aide de l'imagerie des « colonnes de points d'émission » au goniomètre. Chaque colonne est formée d'une série de réseaux de diffraction gravés partiellement. Ce travail a été réalisé en collaboration avec Kyllian Millard que j'ai encadré lors de son stage de fin d'études¹.

Nous avons commencé par observer les réseaux à l'aide du microscope USB Dino-Lite, tel que présenté à la **Figure 3-42 (a)**. On a ainsi pu observer que la lumière semble correctement couplée, distribuée, guidée et extraite dans nos réseaux de guides d'onde. Toutefois, la résolution de cet instrument d'observation n'est pas suffisante pour quantifier la distribution d'énergie au sein des colonnes d'émission (1 pixel / 3 guides). Nous avons alors eu recours au montage optique utilisant la caméra CMOS de haute résolution (~ 10 pixels / guide) décrit au chapitre 2 **Moyens** pour caractériser précisément par imagerie la distribution de lumière dans les réseaux de guides d'onde. Un exemple d'acquisition à l'aide de cette caméra CMOS est présenté à la **Figure 3-42 (b)**.

Durant la caractérisation, les colonnes 1 à 3 sont observées tour à tour à l'aide de la caméra CMOS. Le montage optique de la caméra CMOS a toutefois quelques défauts qui ont été observés pendant la campagne de caractérisation. D'abord, le montage manque de stabilité mécanique. En effet, l'état de focalisation de l'image fluctuait rapidement en fonction du temps. Cela est probablement causé par la faible profondeur de champ de notre système optique et aux vibrations de la puce causées par la pompe d'aspiration qui la maintient. Ces défauts ont été en partie compensés en prenant 3 acquisitions d'images de l'émission de chaque colonne. Les images ont été moyennées sur MATLAB avant leur analyse.

¹ Kyllian Millard, *Étude de validation expérimentale de circuits d'optique intégrée pour des lunettes de réalité augmentée*, étudiant en 5^{ème} année de Génie Physique, INSA Toulouse (stage soutenu le 24 septembre 2020).

La caméra CMOS a été utilisée pour étudier les réseaux de guides d'onde de 128 guides. Son système optique et sa résolution permettent d'imager l'ensemble des 128 guides d'une colonne en une seule prise d'image. L'étude des réseaux de 1024 guides d'onde nécessite des prises multiples pour imaginer l'ensemble d'une colonne. Cela complique les acquisitions et le traitement numérique des données. Les réseaux de 1024 guides d'onde n'ont donc pas été étudiés à l'aide de la caméra CMOS.

Le calcul de l'intensité de chaque pixel observé se base sur une valeur de 0 à 255 (8 bits). Nous avons vérifié en amont que la réponse de la caméra est linéaire en fonction de l'intensité lumineuse (calibration précédant la campagne de mesure). Lors des mesures, un indicateur permet de vérifier que la caméra n'est pas saturée (i.e. aucun des pixels n'a une intensité égale ou supérieure à 255).

Sur les images obtenues, la matrice de pixels est divisée en 128 parties égales, correspondant à l'émission des 128 réseaux partiels d'une colonne de 128 guides d'onde. Les valeurs des pixels (0-255) de chacune des 128 zones sont intégrées. Cela permet de comparer l'intensité d'émission d'un guide à l'autre (et donc d'un réseau de diffraction à un autre).

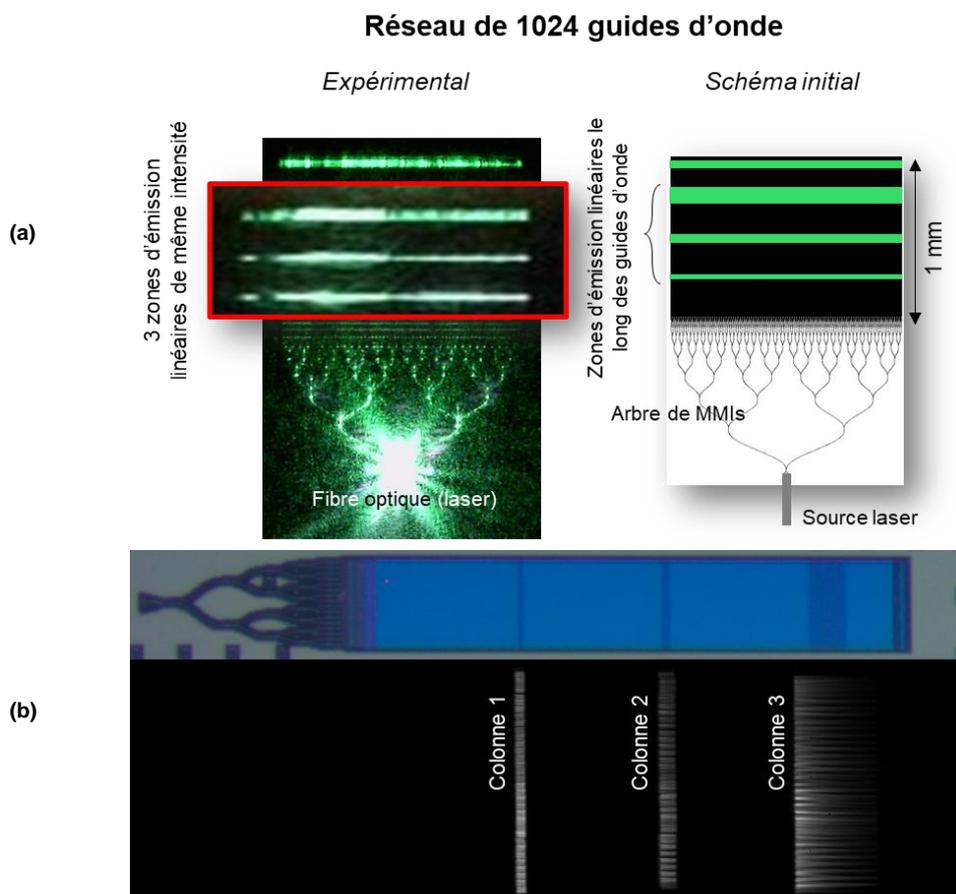


Figure 3-42 Acquisitions par imagerie des trois colonnes de réseaux de guides d'onde sur le lot 1*, a) réseau de 1024 guides d'onde observé au microscope USB Dino-Lite. Le zoom sur les 3 colonnes (encadré rouge) est extrait d'une autre photo à plus faible intensité. En b) réseau de 128 guides d'onde observé au microscope optique (haut) et à la caméra CMOS (bas). La photo CMOS est une combinaison de 3 photos individuelles (une photo par colonne) et n'est pas à l'échelle.

Les images moyennées acquises à l'aide de la caméra CMOS pour les trois colonnes de réseaux partiels nominaux (gravure de 40 nm) pour les réseaux de guides d'onde de 128 guides sont présentés à la **Figure 3-43**. Le traitement numérique permettant d'observer l'intensité relative émise depuis chaque réseau partiel est ensuite montré. Les circuits étudiés proviennent de plaques dont les circuits ont une épaisseur nominale (i.e. 200 nm).

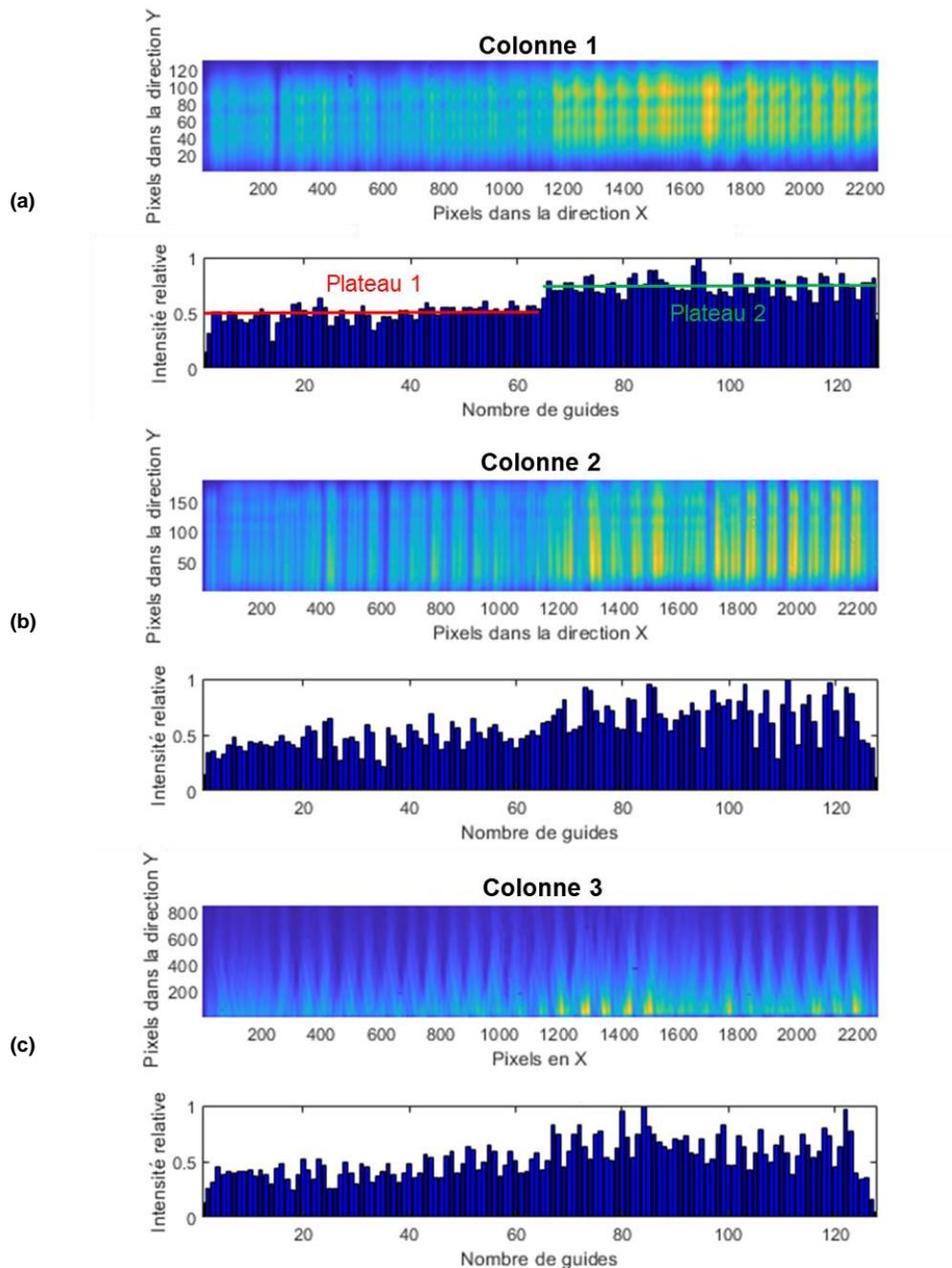


Figure 3-43 Images moyennées sur MATLAB des trois colonnes d'émission des réseaux partiels (gravure de 40 nm) sur le lot 1* pour des circuits de 200 nm d'épaisseur. L'intensité relative du réseau partiel de chaque guide est ensuite montrée après calcul pour chaque colonne, a) colonne 1, b) colonne 2, c) colonne 3.

On remarque d'abord à la **Figure 3-43 (a)** que l'intensité émise dans la première colonne forme deux plateaux principaux. Cela est causé par un désalignement de la fibre optique couplant le

signal en entrée du circuit. Ce désalignement se répercute sur le comportement du premier coupleur MMI. Ce dernier est débalancé (i.e. l'une des deux sorties capte davantage d'énergie que l'autre). En décalant volontairement la fibre en entrée, on observe expérimentalement que la distribution de lumière dans le circuit est modifiée. Au moment d'effectuer les acquisitions, l'alignement a été effectué manuellement au mieux en optimisant la puissance d'émission du réseau qui est captée sur un photodétecteur. Le débalancement en deux plateaux a été obtenu malgré cette méthode d'alignement. L'alignement est en effet difficile à ajuster à cause de la faible tolérance au désalignement du réseau de couplage (sensibilité du réseau de $\pm 1.5 \mu\text{m}$ par rapport à une précision d'alignement de $\pm 1 \mu\text{m}$ sur le goniomètre).

En étudiant individuellement les plateaux de la colonne 1, la lumière semble toutefois distribuée de façon relativement homogène.

Sur les autres colonnes, on observe que le profil d'intensité est de moins en moins homogène. Cela est dû à deux facteurs.

D'abord, les irrégularités d'intensité de la première colonne signifient que la lumière arrivant aux colonnes suivantes a également un profil irrégulier. Celles-ci se répercutent d'une colonne à l'autre.

Ensuite, la taille des réseaux de diffraction augmente (i.e. ils sont de plus en plus longs) après chaque colonne. Ceux-ci sont observés en angle ($\sim 20^\circ$) pour dégager physiquement le système d'imagerie de la fibre optique d'injection. Toutefois, la caméra CMOS a une profondeur de champ limitée. Elle ne permet pas de focaliser complètement sur les réseaux partiels d'une colonne dont les réseaux sont très longs. L'image observée correspond donc plutôt à une figure d'interférence (champ lointain) qu'à l'image réelle des réseaux partiels (champ proche). Ce phénomène s'accroît lorsqu'on observe des réseaux partiels plus longs. Celui-ci est particulièrement visible à la colonne 3 (réseau à 200 périodes, i.e. $80 \mu\text{m}$ de long). A la **Figure 3-43 (c)**, on observe que pour de faibles valeurs de Y , l'intensité le long des guides est beaucoup plus régulière pour les premières valeurs de Y que pour des valeurs de Y élevés (caméra délocalisée) et où l'image ressemble davantage à une figure d'interférence.

Les résultats de la colonne 1 sont donc les plus précis pour évaluer l'état d'homogénéité de la distribution du signal dans chaque guide d'onde suite à l'arborescence de MMIs. L'homogénéité des deux plateaux de chaque colonne est détaillée quantitativement au **Tableau 3-4**.

Tableau 3-4 Distribution des intensités relatives de chaque plateau des colonnes d'émission des réseaux de guides à 128 guides dans le lot 1* (épaisseur du circuit 200 nm et gravures partielles de 40 nm, polarisation TE).

	Plateau 1 (guides 1-64)		Plateau 2 (guides 65-125)	
	Médiane	Ecart-type (σ)	Médiane	Ecart-type (σ)
Colonne 1	0.51	0.08	0.76	0.08
Colonne 2	0.44	0.11	0.70	0.16
Colonne 3	0.41	0.11	0.63	0.14

On observe au **Tableau 3-4** que malgré l'homogénéité apparente de la colonne 1, l'écart-type de l'intensité relative de chaque plateau est élevée par rapport à la valeur médiane. Par exemple, au plateau 1, on obtient une intensité relative médiane de 0.51 avec un écart-type de 0.08. Cet écart-type représente $\sim 16\%$ de la valeur médiane. Au plateau 2 de la colonne 1, l'écart-type représente $\sim 11\%$ de la valeur médiane.

Ensuite, les proportions d'énergie émises d'une colonne à l'autre sont comparées entre elles au **Tableau 3-5**.

Tableau 3-5 Ratios d'intensité relatives entre les colonnes de réseaux partiels à différentes profondeurs de gravure pour les réseaux de guides d'onde d'épaisseur nominale (200 nm) sur le lot 1*.

Profondeur de gravure partielle [nm]	30	40	50
Rapport colonne 2 / colonne 1	0.93	0.92	0.95
Rapport colonne 3 / colonne 2	1.33	1.04	0.56
Rapport colonne 3 / colonne 1	1.24	0.96	0.53

Au **Tableau 3-5**, on observe que les colonnes avec des réseaux partiels ayant subi une gravure nominale (40 nm) émettent équitablement l'énergie, tel qu'attendu à l'aide des simulations FDTD sur RSoft. En effet, les ratios d'intensité entre chaque colonne sont très proches de 1.

Lorsque la gravure partielle est plus faible (30 nm), les premières colonnes extraient moins d'énergie. Une plus grande proportion d'énergie atteint la dernière colonne, ce qui explique que son ratio d'intensité avec les colonnes 1 et 2 augmente par rapport à la gravure de 40 nm.

Au contraire, pour une gravure partielle plus profonde (50 nm), les premières colonnes extraient davantage d'énergie. Moins de lumière atteint la dernière colonne, ce qui explique que son ratio d'intensité soit plus faible avec les colonnes précédentes.

A la sous-section **3.3.4 Coupleur MMI**, on avait posé que l'on vise un débalancement inférieur à 1% des bras de sorties du MMI (i.e. [49, 51] % dans chaque bras de sortie). Pour un réseau de guides d'onde de 128 guides, 7 colonnes de MMIs en série sont utilisées. Toutefois, en se limitant à l'étude d'un plateau individuel comme au **Tableau 3-4**, le premier MMI est ignoré. La distribution de signal d'un plateau du **Tableau 3-4** résulte donc d'une subdivision du signal dans une série de 6 colonnes de MMIs. Le signal maximum obtenu avec 6 subdivisions successives ayant un coefficient de 0.51 est ~13% plus élevé que le signal subdivisé équitablement avec un coefficient de 0.5 (i.e. signal distribué à 50/50 dans chaque bras de sortie). Le signal minimum obtenu avec 6 subdivisions successives avec un coefficient de 0.49 est ~11% inférieur au signal équitablement distribué.

Le pourcentage des écart-types sur les valeurs médianes des plateaux de la colonne 1 au **Tableau 3-4** (16 et 11% pour les plateaux 1 et 2 respectivement) sont du même ordre de grandeur que ces variations avec des MMIs débalancés de 1%. Les écart-types englobent toutefois moins de données que les extremums théoriques des MMIs débalancés de 1%. En pratique, le débalancement des bras des MMIs est donc légèrement supérieur à celui visé. Le plateau 1 est celui avec l'écart-type dont le pourcentage est le plus grand par rapport à sa valeur médiane à la colonne 1. Les valeurs extrêmes de ce plateau peuvent être approximées en considérant 2 écart-types, soit $2\sigma = 0.16$ en intensité normalisée. Cela correspond à 32% de variation par rapport à la médiane. Cette dernière valeur correspond à un débalancement des bras d'environ 2.4 %.

3.3.8.2 Comparaison à la littérature

Généralement, la distribution uniforme du signal dans un grand circuit photonique est difficile à obtenir. Dans l'article de Raval et al. [57], les auteurs tentent d'obtenir une émission uniforme le long d'un réseau de diffraction dont l'amplitude de gravure varie graduellement. Le long de leur réseau de 3 mm, l'intensité émise varie de $\pm 10\%$. Un autre exemple de Chiles et al. [4] présente un circuit à 10 entrées et 100 sorties. La distribution uniforme de signal s'effectue par des coupleurs adiabatiques. Dans leur cas, la puissance du signal émis aux sorties varie avec un écart-type d'environ 1 dB ($\sim 20\%$). Ces résultats se rapprochent de la variation d'uniformité obtenue dans notre réseau de guides d'onde de 128 guides.

3.3.9 Croisements

La forme du croisement entre deux guides d'onde peut être optimisée pour y minimiser les pertes de transmission et le couplage d'un guide à l'autre.

Plusieurs architectures permettent d'optimiser les croisements entre deux guides d'onde, notamment : les cavités résonantes [58], les élargissements de guides [18],[59]-[61] et les ponts multi-niveaux [62].

Les cavités résonantes sont complexes à concevoir et sont très sélectives en longueur d'onde. Elles sont également exigeantes en capacité de calcul numérique et en résolution de fabrication. Les ponts multi-niveaux demandent plusieurs niveaux de circuit, ce qui dépasse le degré de complexité de fabrication du lot 1*.

La solution sélectionnée pour optimiser les croisements est donc l'élargissement de guides. C'est une solution simple à concevoir numériquement et à fabriquer. De plus, elle peut fonctionner en utilisant une seule couche de circuit.

3.3.9.1 Simulations numériques

Dans notre cas, nous avons simplement conçu un croisement en forme « d'étoile ». Il s'agit d'une architecture simple où la largeur des guides est agrandie au croisement. Cette architecture est montrée à la **Figure 3-44**. Dans notre cas, nous nous sommes limités à l'étude de croisements perpendiculaires.

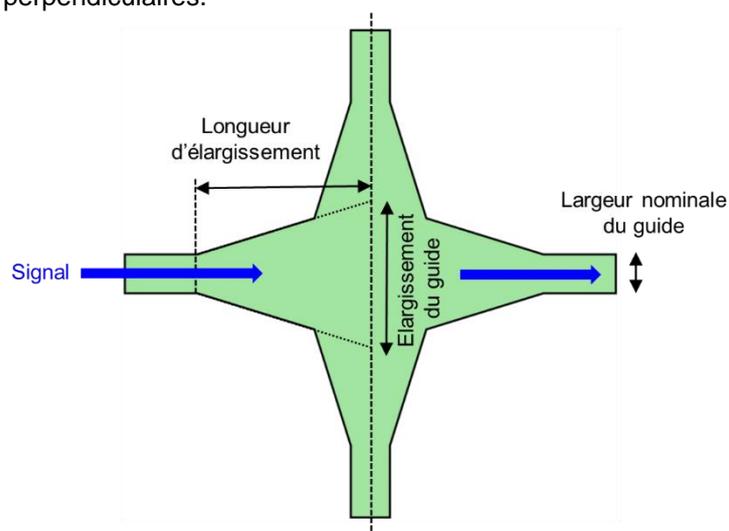


Figure 3-44 Croisement en architecture d'étoile, i.e. les guides d'onde sont élargis graduellement en direction du centre du croisement.

Nous avons simulé numériquement en FDTD sur RSoft plusieurs dimensions de croisements, tel que montré à la **Figure 3-45**. L'élargissement des guides est varié de 300 nm (largeur nominale des guides d'onde) à 1.2 μm . Dans tous les cas, on approxime dans les simulations que la longueur d'élargissement est infinie, et donc que les flancs des guides sont parallèles. Cela permet de réduire l'espace de simulation pour se centrer sur le cœur du croisement. Autrement, les simulations numériques peuvent être exigeantes en capacité de calcul si l'espace de simulation est agrandi pour prendre en compte la longueur d'élargissement des guides (plusieurs microns à dizaines de microns). On considère que notre approximation est réaliste car en pratique la longueur d'élargissement est plusieurs fois plus grande que l'élargissement des guides. En pratique, les flancs des guides sont donc quasi-parallèles à l'endroit où ils se croisent.

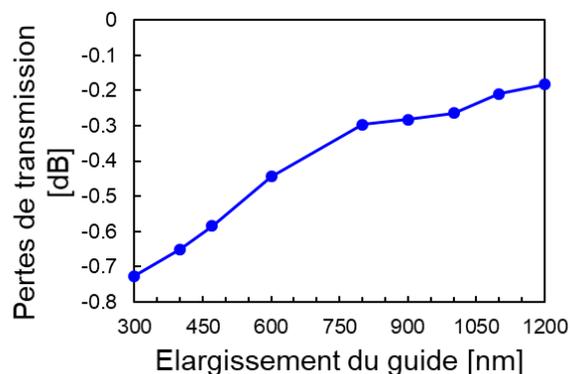


Figure 3-45 Simulations numériques FDTD sur RSoft des pertes en transmission pour des croisements de guides d'onde élargis à plusieurs dimensions.

A la **Figure 3-45**, on remarque qu'en élargissant les guides d'onde la transmission en sortie du croisement passe de 84.6% (~ -0.7 dB) à 95.7% (~ -0.18 dB) pour des guides de 300 nm et 1200 nm de large respectivement.

3.3.9.2 Mesures expérimentales

Dans le lot 1*, les pertes aux croisements sont étudiées à l'aide de structures de test comprenant plusieurs croix en série. Les pertes cumulées de plusieurs croix en série sont plus faciles à mesurer que les pertes d'une croix individuelle. Il y a 20 croix identiques en série sur chaque structure de test. Pour chaque structure de test, le centre des croix est élargi à 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 et 1500 nm. Chacun des élargissements s'effectue graduellement sur une longueur d'élargissement de 5, 10 ou 20 μm . Ces structures de test sont détaillées à la **Figure 3-46**.

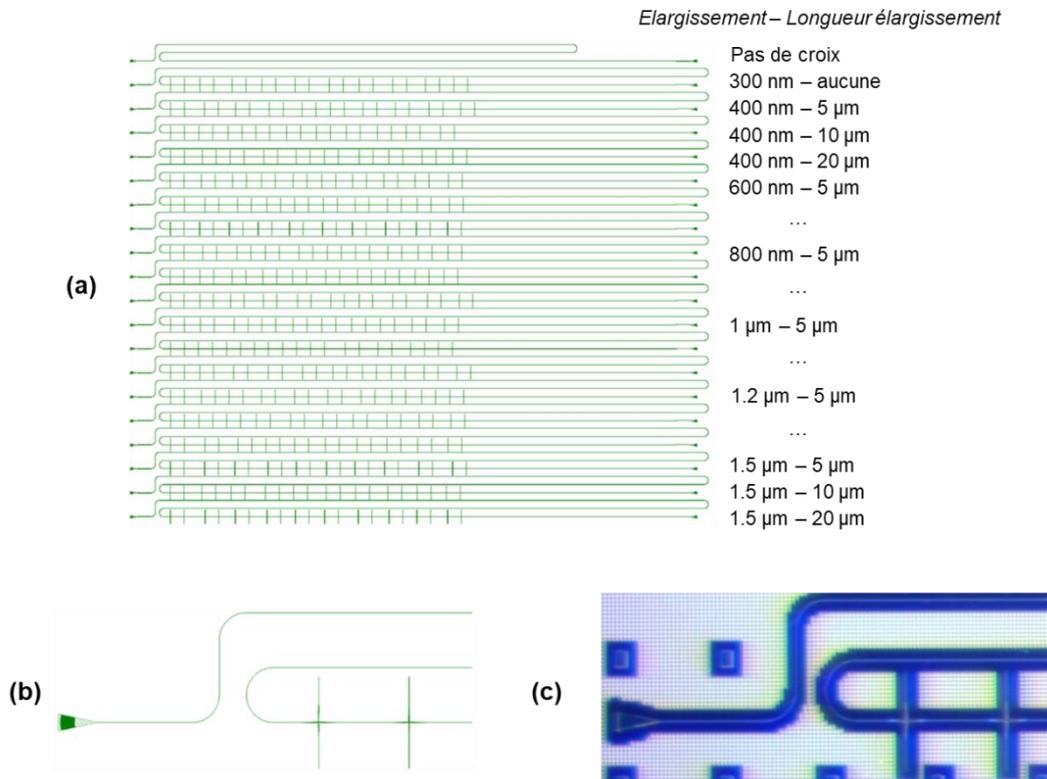


Figure 3-46 Structures de test des croisements sur le lot 1* ayant chacune 20 croisements en série, a) ensemble des variantes des croisements testés, b) exemple de deux croisements en série, c) équivalent des croisements en (b) observés au microscope optique.

Les pertes par croisement ont été mesurées au *prober* pour chacune des structures de test. Les mesures ont été faites sur 5 puces de la plaque P10 (épaisseur nominale, 200 nm) en polarisation TE. Les résultats sont présentés à la **Figure 3-47**.

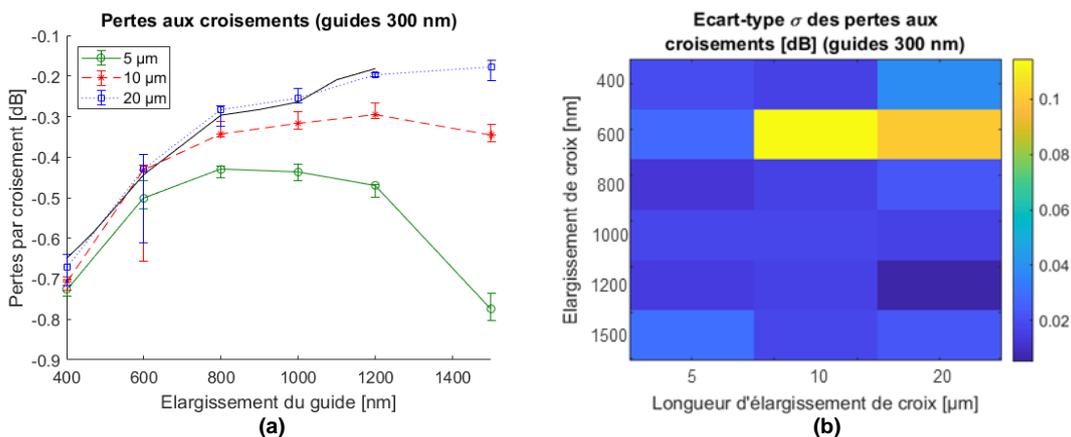


Figure 3-47 Mesures au *prober* des pertes de transmission des croisements pour différents élargissements des guides d'onde de la plaque P10 du lot 1* (épaisseur des guides de 200 nm), a) les trois courbes sont associées à chaque longueur d'élargissement. Les résultats sont comparés aux simulations numériques (noir), b) écart-types des mesures de pertes.

Les résultats de la **Figure 3-47** permettent d'observer que généralement, plus on augmente la longueur d'élargissement et plus il est possible de réduire les pertes aux croisements. On

remarque que les croix de 20 μm de long ont une bonne concordance avec les résultats numériques présentés à la **Figure 3-45**. En effet, plus la longueur d'élargissement est élevée et plus le résultat tend vers l'approximation de guides à flancs droits utilisés dans les simulations numériques précédentes.

3.3.9.3 Comparaison à la littérature

A la **Figure 3-47** on peut observer que le dimensionnement minimisant les pertes de transmission dans l'ensemble des croix testées correspond à une croix de 20 μm de long et de 1500 nm de large. Cette dernière permet de réduire les pertes de transmission à -0.18 dB (valeur médiane) avec un écart-type de 0.02 dB.

Il a aussi été mesuré au *prober* que les pertes de transmission pour les croisements simples (i.e. sans élargissement) entre les guides nominaux (300 nm de large) ont une valeur médiane de -0.81 dB et un écart type de 0.04 dB. Ces pertes se rapprochent de celles évaluées numériquement par FDTD (\sim -0.7 dB).

Le résultat de notre croisement optimal dépasse le seuil de faibles pertes des croisements (généralement -0.2 dB), ce qui est très bon. Notre résultat est également comparable à des architectures d'élargissement de guides plus complexes, tel que par exemple Bogaerts *et al.* [59] qui ont fabriqué une croix en plusieurs couches. Celui-ci démontre des pertes de transmission de -0.16 dB par croisement.

3.3.10 Edge-coupler (coupleur par la tranche)

La lumière peut être couplée dans un circuit photonique à l'aide d'un réseau de diffraction, tel que présenté précédemment. Le couplage par réseau donne la liberté d'effectuer le couplage à n'importe quel endroit de la surface de l'échantillon. Toutefois, le désavantage du couplage par réseau est que la fibre forme un grand angle avec la surface du circuit (proche de la normale à la surface). Dans un dispositif portable, cet angle limite la compacité du montage. De plus, dans un montage où la fibre est fixée de façon permanente au circuit (ex: dans un prototype comme pour la projection rétinienne), l'angle de la fibre la fragilise et est susceptible de provoquer sa cassure.

Pour un prototype où la fibre est fixée, il est plus pratique d'effectuer un couplage par la tranche de l'échantillon. La fibre est alors dans le même axe optique que les circuits photoniques. Le coupleur par la tranche est également utilisé pour les applications à forte puissance optique car il a généralement une meilleure efficacité de couplage que les coupleurs réseau [35].

Le coupleur par la tranche est le seul composant qui a été étudié par simulations numériques mais qui n'a pas été fabriqué ni testé dans le premier lot. Ce composant est présent dans le lot 2. Il est toutefois détaillé dans la bibliothèque de blocs de base du lot 1* pour des fins de simplification.

Les coupleurs inversés par la tranche (CIT) sont des composants photoniques communément utilisés dans l'IR pour collecter la lumière émise de la fibre d'injection au bord de l'échantillon. Il s'agit de guides d'onde dont la largeur varie graduellement (*tapers*). Celle-ci est réduite au bord de l'échantillon afin de déconfiner le mode guidé. Ce déconfinement permet d'augmenter la taille du mode afin qu'il corresponde au mieux à la taille du faisceau émis par la fibre optique (faisceau gaussien). L'efficacité de couplage η est donnée en calculant l'intégrale de recouvrement entre le mode de la fibre et le mode à l'extrémité du *taper* [63]. Cette intégrale est décrite à l'équation (3.24).

$$\eta = \frac{|\int E_1^* E_0 dA|^2}{\int |E_1|^2 dA \int |E_0|^2 dA} \quad (3.24)$$

Où E_1 et E_0 sont les champs électriques complexes de chacun des deux modes qui se recouvrent.

Dans le spectre visible, les longueurs d'onde sont plus courtes et nécessitent des *tapers* plus petits pour obtenir de bonnes efficacités de couplage (i.e. des pertes de couplage inférieures à -3 dB). Cette réduction de taille atteint rapidement la limite de résolution standard en photolithographie pour les circuits photoniques des laboratoires de recherche (typiquement ~ 150 nm). Une architecture de CIT permettant de surmonter cette limitation en résolution est détaillée par Ong, J. *et al.* [63] pour le spectre visible. Cette architecture utilise deux CITs individuels et distants d'une faible distance g . Ces deux CITs captent chacun une partie du signal de la gaussienne émise depuis la fibre optique. Les parties de signal qu'ils captent sont combinées à l'aide d'un coupleur MMI. Cette architecture est schématisée à la **Figure 3-48**. En se basant sur le travail de Ong, J. *et al.*, nous avons développé notre propre CIT double à $\lambda = 532$ nm. D'autres architectures de CIT doubles ou multi-niveaux existent toutefois dans la littérature [64]-[67].

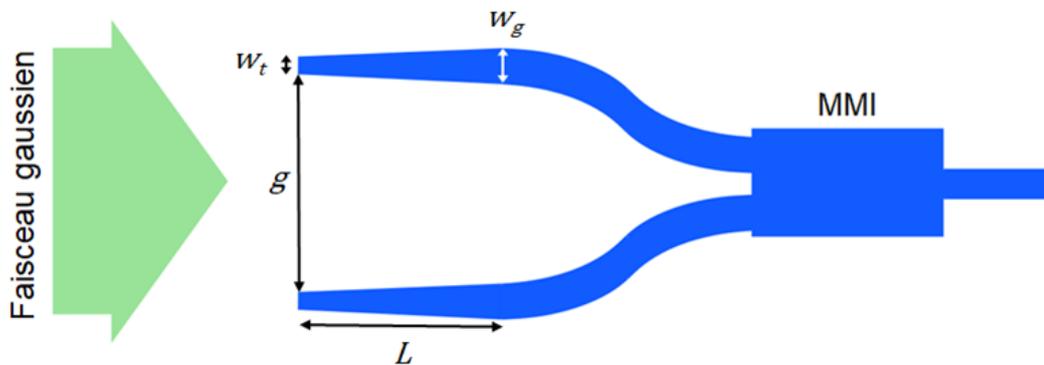


Figure 3-48 Schéma d'un coupleur par la tranche à deux *tapers* (CIT double) pour le spectre visible.

Dans ce double CIT, l'écartement entre les deux *tapers* est donné par g . La largeur des *tapers* aux bords de l'échantillon est donnée par w_t , la largeur nominale des guides est donnée par w_g et la longueur d'élargissement des *tapers* est donnée par L .

Les premières simulations de l'efficacité de couplage d'un CIT simple comparé à un CIT double sont présentées à la **Figure 3-49 (a)**. L'efficacité de couplage est déterminée par l'intégrale de recouvrement d'un faisceau gaussien avec les modes des CITs. Les calculs de mode des CITs et les intégrales de recouvrement (éq. (3.24)) sont effectués numériquement par éléments finis (FEM) dans l'espace 3D à l'aide du logiciel RSoft.

Dans les simulations, on considère que l'encapsulation au-dessus des guides et le BOX en-dessous de ceux-ci sont suffisamment épais pour contenir le champ électrique des modes des *tapers* et du faisceau gaussien. Les simulations négligent les pertes associées à l'utilisation du MMI. De plus, on considère que la longueur d'élargissement des *tapers* est suffisamment grande (plusieurs dizaines de microns) pour effectuer une transition adiabatique de la taille des modes (i.e. sans pertes) entre les extrémités de largeurs différentes (w_t et w_g) de chaque *taper*. Les résultats sont présentés pour la polarisation TE. De plus, le diamètre de mode de la fibre considérée pour cette étude est de $2.5 \mu\text{m}$. Il s'agit d'un MFD typique de la part des fournisseurs de fibres optiques dans le spectre visible. On considère que la fibre est collée au coupleur par la tranche à l'aide d'une colle d'indice similaire à l'oxyde utilisé dans l'encapsulation du circuit ($n_{\text{colle}} \approx 1.5$). L'épaisseur des guides est constante, égale 200 nm (épaisseur nominale de nos circuits) à la **Figure 3-49**.

L'écart entre les *tapers* du double CIT est de 500 nm à la **Figure 3-49 (a)**. Cette valeur optimise l'efficacité de couplage de notre composant, tel que démontré à la **Figure 3-49 (b)**. À la **Figure 3-49 (b)**, on compare l'efficacité de couplage de CITs en fonction de l'écartement entre leur deux *tapers*. Les valeurs de *tapers* amincis à 150 nm (limite de fabrication typique) sont comparées à des *tapers* plus petits (100 nm).

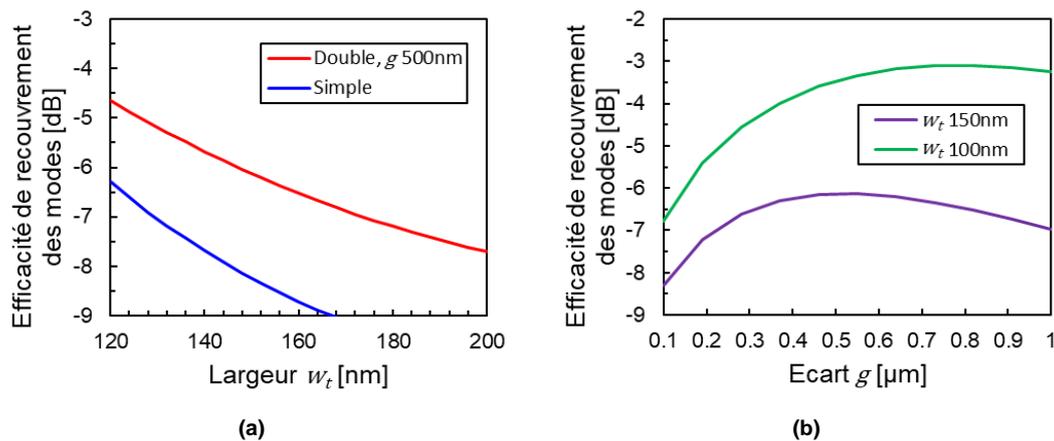


Figure 3-49 Efficacité de recouvrement des modes pour a) des coupleurs par la tranche à un ou deux *tapers* avec un faisceau gaussien (MFD de 2.5 μ m), b) des coupleurs par la tranche en fonction de l'écartement des deux *tapers* qui les composent.

On observe clairement à la **Figure 3-49** que la largeur initiale w_t des *tapers* a un effet important sur l'efficacité de couplage. Plus cette largeur diminue et plus l'efficacité de couplage augmente. La réduction de la largeur des *tapers* est limitée par leur capacité à guider le mode fondamental en polarisation TE. Dans nos simulations, les dimensions des *tapers* sont toujours supérieures aux dimensions minimales pour guider le mode fondamental (i.e. $n_{eff} > n_{encapsulation}$).

On observe également que l'utilisation d'un double CIT permet d'augmenter significativement l'efficacité de couplage par rapport à un CIT simple (i.e. à un seul *taper*), et ce pour les mêmes dimensionnements de *taper*. Par exemple, pour le *taper* de largeur w_t 150 nm, le CIT simple permet une efficacité de couplage de \sim -8 dB, alors que le CIT double permet d'augmenter cette efficacité à environ -6 dB.

L'efficacité de couplage des CITs peut être améliorée en réduisant l'épaisseur des *tapers* (i.e. en ayant une épaisseur $t < 200$ nm). Cela permet d'augmenter le déconfinement des modes et d'améliorer leur recouvrement avec le faisceau gaussien. Les résultats des simulations FEM pour des CITs simples et doubles sont présentées à la **Figure 3-50** pour des *tapers* de différentes épaisseurs.

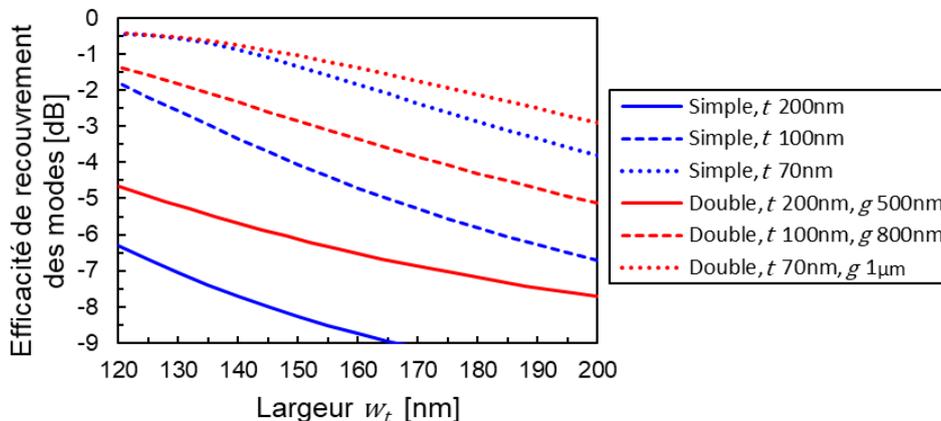


Figure 3-50 Efficacité de recouvrement des modes pour des coupleurs par la tranche inverses simples ou doubles avec un faisceau gaussien (MFD 2.5 μ m). Les simulations sont données pour plusieurs largeurs et épaisseurs t de *tapers*.

A la **Figure 3-50**, on observe que les *tapers* moins épais permettent une meilleure efficacité de couplage que les *tapers* plus épais. Par exemple, pour une largeur w_t de 150 nm, le double CIT ayant une épaisseur t de 70 nm a une efficacité de ~ -1 dB, ce qui est nettement plus élevé que celle du *taper* d'épaisseur nominale (200 nm) à ~ -6 dB. En réduisant l'épaisseur des *tapers*, la différence d'efficacité de couplage entre les CIT simples et doubles diminue. Le *taper* 70 nm x 120 nm est le plus petit qui puisse être simulé avant de cesser de guider le mode fondamental à $\lambda = 532$ nm.

L'écartement g entre les *tapers* formant les doubles CITs a été optimisé pour maximiser l'efficacité de couplage de ces composants. Cette optimisation a été effectuée pour une valeur constante de w_t égale à 150 nm. La **Figure 3-51 (a)** montre l'étude de l'efficacité de couplage du double CIT d'épaisseur $t = 70$ nm en fonction de l'écartement entre ses deux *tapers*. On observe que le maximum d'efficacité de couplage est obtenu pour un écartement de 1 μ m.

La sensibilité de ce double CIT au désalignement par rapport au faisceau gaussien est montré à la **Figure 3-51 (b)**. On voit que le composant est peu tolérant au désalignement lors du couplage. En effet, l'efficacité de couplage semble constante jusqu'à un désalignement de 400 nm. Cette valeur est très en-dessous de la précision d'alignement des instruments dans notre laboratoire (± 1 μ m). Pour un décalage de 1 μ m, l'efficacité de couplage diminue de 1 dB et atteint donc -2 dB.

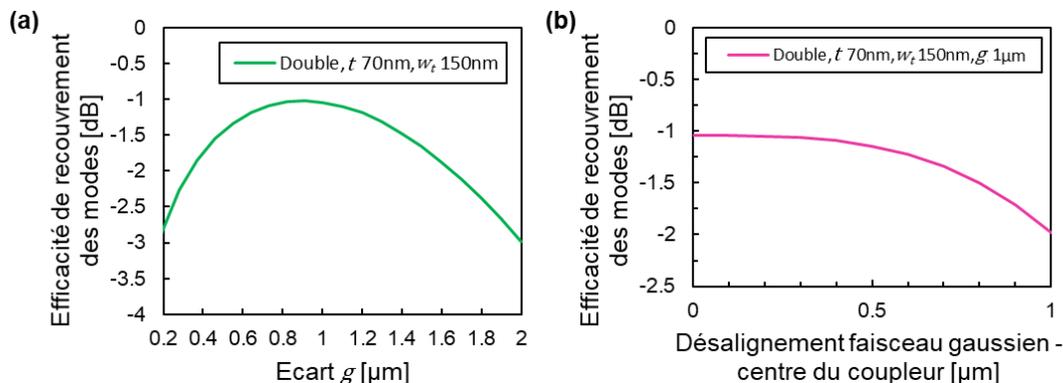


Figure 3-51 Efficacité de couplage du double CIT d'épaisseur t de 70 nm et de largeur w_t de 150 nm, a) en fonction de l'écartement entre les deux *tapers*, b) en fonction du désalignement du faisceau gaussien par rapport au centre du double CIT (on considère un écartement de 1 μ m entre les *tapers*).

En utilisant des *apers* de faible épaisseur (i.e. $t < 200$ nm), nous devons également considérer les pertes à la jonction entre les *apers* amincis (ex: 70 ou 100 nm) avec les guides d'épaisseur nominale formant le reste du circuit (200 nm). Ces pertes peuvent avoir un impact très important sur l'efficacité globale du coupleur. Par exemple, presque la moitié du signal est perdu à l'interface entre des guides de 70 nm et de 200 nm d'épaisseur (déterminé par simulation FDTD sur RSoft). Ces pertes peuvent être réduites en utilisant un circuit multicouches, par exemple en ayant un niveau dédié au coupleur et un autre dédié au reste du circuit. Le signal pourrait être couplé du CIT de faible épaisseur vers le circuit d'épaisseur nominale à l'aide de coupleurs multi-niveaux adiabatiques [4]. L'utilisation de circuits multicouches complexifie toutefois la fabrication des échantillons.

Nos simulations négligent également les états de surface de la fibre ou des bords de l'échantillon (ex: polissage des faces) ainsi que l'utilisation de revêtements anti-réfléchissants sur ces surfaces.

Une fibre optique lentillée ou une nano-fibre optique [68]-[70] pourraient également être utilisées. Leur MFD est réduit par rapport aux fibres optiques standard. Un MFD réduit peut mieux correspondre à la taille des modes déconfinés pour des *apers* d'épaisseur nominale (200 nm) et augmenter leur efficacité de couplage.

3.4 Etude de l'interaction « guide d'onde – hologramme » (lot 2)

Le premier lot a permis de tester expérimentalement et valider le fonctionnement de nos composants photoniques de base. La conception de ces composants a été réutilisée pour le lot 2.

Le lot 2 est dédié à l'étude de l'interaction « guide d'onde – hologramme ». Ce lot est composé des circuits photoniques passifs. La partie principale du lot 2 est composée d'un grand réseau de guides d'onde. Celui-ci se divise en deux parties : une zone d'émission et une zone d'adressage.

La zone d'émission est organisée en 32 réseaux de guides d'onde individuels. Chacun de ces réseaux est formé de 128 guides d'onde. Les guides d'onde sont séparés de 1.5 μm (centre-à-centre), pour éviter les effets de couplage entre ceux-ci. Cette distance est identique à celle utilisée dans les réseaux de guides d'onde du lot 1*. L'ensemble des 32 réseaux de guides d'onde est donc constitué de 4096 guides d'onde. La largeur de cet ensemble de guides est de ~ 6 mm. Les guides s'étalent sur une longueur de 11 mm.

Cette grande « surface de guides » facilite le dépôt de résine holographique à leur surface. La mise en transparence des plaques du lot est effectuée en remplaçant le substrat opaque de Si par un substrat de verre, tel que décrit au chapitre 2 **Moyens, 2.3.2 Fabrication du lot 2**. Cette transparence est nécessaire pour enregistrer les hologrammes en réflexion à l'aide des faisceaux émis depuis les réseaux de guides et par un faisceau objet.

La zone d'adressage du circuit est utilisée pour activer tour à tour chaque réseau de 128 guides individuellement. Lorsqu'un réseau de guide est activé, il doit permettre l'enregistrement de la partie d'hologramme qui le recouvre. On considère donc qu'il y a un hologramme pouvant être enregistré et lu pour chaque réseau de guides. On peut donc étudier l'interaction « guide d'onde – hologramme » avec des conditions différentes pour chaque réseau de guides. Par exemple, on peut faire varier l'intensité de lumière émise du réseau de guides vers l'hologramme durant son enregistrement. On peut également changer l'angle du faisceau objet pour modifier l'angle d'émission de l'hologramme en lecture.

La zone d'adressage doit aussi permettre d'activer l'ensemble du circuit (i.e. les 32 réseaux de guides d'onde) simultanément. Cela pourrait servir par exemple à lire l'ensemble des

hologrammes simultanément afin de générer une image simple (32 pixels, soit le nombre de réseaux de guides d'onde).

Dans notre circuit passif, l'activation de chaque réseau de guide d'onde individuel s'effectue en alignant manuellement une fibre optique d'injection avec un réseau d'insertion secondaire dédié (i.e. 32 réseaux d'insertion pour les 32 réseaux de guides d'onde). Cette méthode d'activation simple des réseaux permet de s'affranchir de composants actifs, ce qui réduit les délais de fabrication et la complexité de conception du circuit.

L'activation de l'ensemble du circuit s'effectue à l'aide d'un coupleur principal. Dans le lot 2, le coupleur principal est constitué par deux types de coupleurs: un coupleur par réseau (décrit précédemment à la sous-section **3.3.6 Réseaux de diffraction**) ou un coupleur par la tranche (sous-section précédente). L'un des deux types de coupleur peut être utilisé au choix comme coupleur principal. Un coupleur directionnel 3 dB permet d'associer ces deux voies d'entrées potentielles afin de distribuer le signal dans l'ensemble du circuit.

Le circuit principal du lot 2 est décrit schématiquement à la **Figure 3-52**. Dans ce schéma, seulement 8 réseaux de guides d'onde sont représentés à des fins de simplification. On y montre l'enregistrement de l'hologramme au-dessus du réseau de guides #3 comme exemple.

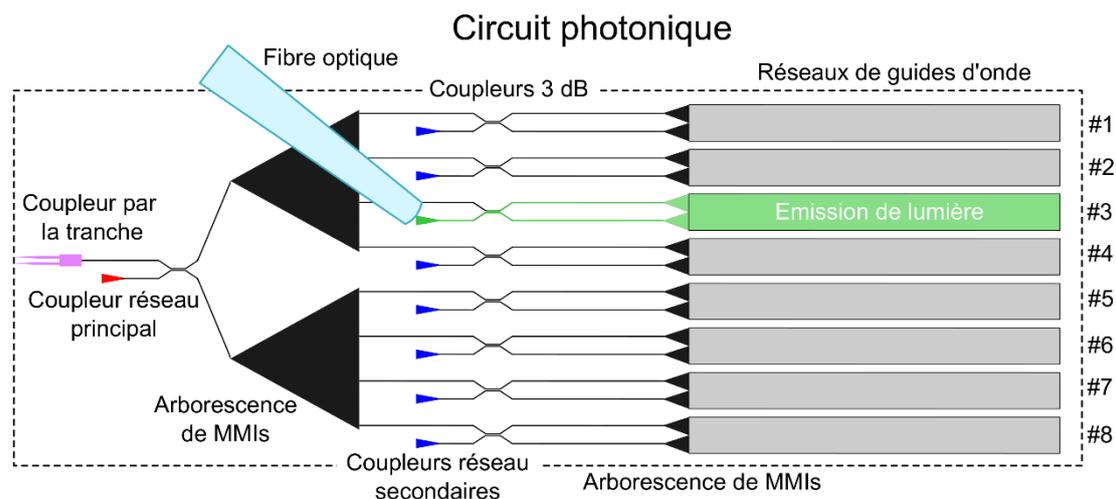


Figure 3-52 Circuit principal du lot 2 dédié à l'interaction « guide d'onde – hologramme ». Les coupleurs principaux sont un coupleur par la tranche (mauve) ou un coupleur par réseau (rouge). Il est aussi possible d'alimenter individuellement tout à tour les réseaux de guides d'onde plus petits (128 guides) à l'aide des coupleurs par réseaux secondaires (bleu). Pour ce faire, la fibre optique est déplacée manuellement au-dessus de chacun de ces coupleurs secondaires. Des coupleurs directionnels 3 dB permettent d'associer les différents chemins empruntés pour coupler la lumière. Dans ce schéma, le réseau de guides #3 est alimenté pour enregistrer l'hologramme qui le recouvre.

La **Figure 3-53** montre le plan réel du circuit principal du lot 2. On remarque d'abord que la distance séparant les coupleurs secondaires de l'arborescence de MMIs (128 guides) est allongée à 500 μm . On estime que cette distance permet d'éloigner les réflexions de la fibre d'injection de la zone où l'hologramme doit être enregistré (composant photosensible). Cela doit permettre de réduire la consommation prématurée et indésirée du matériau holographique. Un élément opaque pourrait aussi être déposé sur cette zone pour réduire davantage les réflexions de la fibre vers le matériau photosensible.

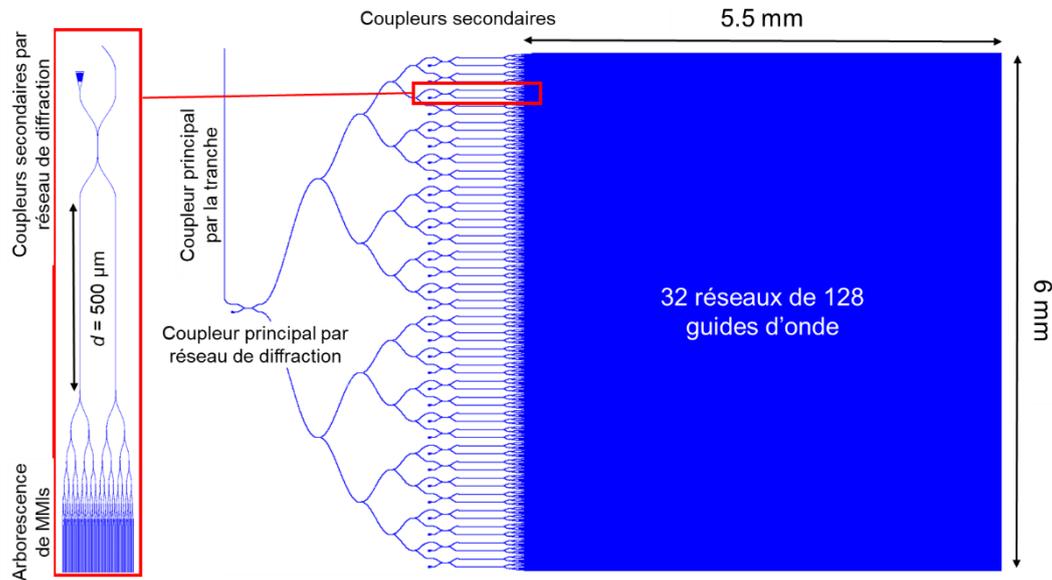


Figure 3-53 Plan réel du circuit principal du lot 2.

On remarque également que la longueur indiquée des guides d'onde est limitée à 5.5 mm au lieu de 11 mm comme décrit précédemment. En pratique, le circuit du lot 2 est symétrique, comme montré à la **Figure 3-54**. Cela permet de maximiser le nombre de circuits principaux sur le masque de photolithographie du lot 2. La **Figure 3-53** montre donc seulement la première moitié du circuit du lot 2.

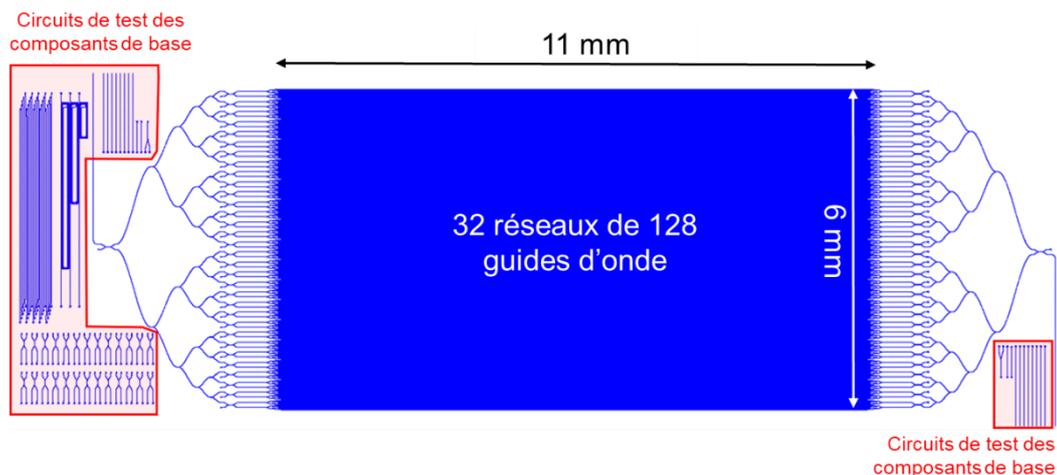


Figure 3-54 Plan réel avec l'ensemble des circuits du lot 2.

La surface du circuit global de guides d'onde a été sélectionnée pour être proche de celle de la pupille de l'œil (6 mm x 6 mm). Cela permettrait notamment d'entamer l'étude des effets de projection rétinienne et d'auto-focalisation.

L'interaction du signal entre les guides d'onde et les hologrammes pourra s'effectuer de plusieurs façons. Cela pourra être à l'aide du champ évanescent du mode guidé qui peut atteindre la couche de l'hologramme. La couche d'encapsulation au-dessus des guides est volontairement fabriquée en plusieurs épaisseurs faibles (20 à 200 nm) pour permettre à ce champ d'être plus ou moins en contact avec la couche de l'hologramme (voir chapitre 2

Moyens, 2.3.2 Fabrication du lot 2). Il devrait également être possible de graver des réseaux d'extraction le long des guides pour générer des points d'émission (tel que réalisé sur le lot 1*). D'autres options sont envisagées telles que la formation de couches de circuits photoniques additionnelles et l'ajout de cristaux liquides. Ces dernières options sont étudiées par d'autres membres de l'équipe de recherche.

A gauche de la **Figure 3-54**, on aperçoit de petits circuits individuels en bordure du circuit principal. Ceux-ci permettent de tester à nouveau les propriétés des composants de base sur ce nouveau lot (pertes de MMIs, pertes de propagation des guides, uniformité des coupleurs directionnels 3 dB). Cela sert notamment à étudier la variation de ces paramètres de base suite au changement de plateforme de fabrication pour la photolithographie (CEA-LETI plutôt que STMicroélectronique). De manière générale, les propriétés des composants photoniques de base devraient être testées sur chaque lot pour vérifier la reproductibilité de leurs caractéristiques.

Le passage de la plateforme de STMicroélectronique vers le CEA-LETI augmente la résolution minimale de fabrication de ~ 150 nm à ~ 250 - 300 nm. Le pas des réseaux de diffraction et l'écartement entre les guides des coupleurs directionnels 3 dB a été modifié en conséquence. Malheureusement, cela a également un impact sur la largeur minimale des *tapers* pour les coupleurs par la tranche qui augmente fortement. La largeur minimale de *tapers* (~ 250 - 300 nm) est alors quasi-équivalente à celle des guides guides nominaux (300 nm). Leur efficacité de couplage diminuera donc de ~ -6 dB à ~ -8 dB (voir **Figure 3-50**).

Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre a permis de présenter les principaux résultats de la thèse. Cela comprend les résultats issus des calculs des modèles théoriques, des simulations numériques et des caractérisations expérimentales de l'ensemble des composants photoniques de base constituant le lot 1*. Les composants ont été fabriqués en plusieurs variantes permettant de trouver expérimentalement leurs dimensions optimales. Les composants photoniques optimaux arborent généralement une bonne efficacité en comparaison à la littérature, à l'exception notable des pertes de propagation des guides d'onde droits. Dans ce dernier cas, la cause la plus probable de ces fortes pertes provient des procédés de fabrication des circuits, notamment au niveau de la gravure et de l'utilisation d'un masque dur.

Les composants développés forment une bibliothèque de briques de base servant à l'élaboration de circuits applicatifs plus complexes. Dans le lot 1*, l'assemblage des blocs de base a été testé et validé dans un réseau de guides d'onde fonctionnel. Ce dernier a permis de mesurer que la distribution du signal entre les guides qui le composent est relativement homogène. Cette homogénéité est importante pour le contrôle de la distribution énergétique du signal dans le circuit en vue de la conception du projecteur rétinien.

Enfin, la bibliothèque de composants du lot 1* a servi à l'élaboration du circuit du lot 2. Celui-ci permettra d'étudier l'interaction « guide d'onde – hologramme » lorsque sa fabrication sera complétée. Celle-ci devrait être terminée après la thèse.

Le chapitre suivant, **Conclusion et perspectives**, permet de résumer l'ensemble des résultats obtenus et de les comparer aux objectifs définis en début de thèse. Il propose notamment des orientations pour le lot 3 qui n'a finalement pas été conçu pendant la thèse.

Références

- [1] L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*, 1st ed. Cambridge University Press, 2015.
- [2] A. Z. Subramanian *et al.*, "Low-Loss Singlemode PECVD Silicon Nitride Photonic Wire Waveguides for 532-900 nm Wavelength Window Fabricated Within a CMOS Pilot Line," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 2202809–2202809, Dec. 2013, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2292698.
- [3] W. D. Sacher *et al.*, "Visible-light silicon nitride waveguide devices and implantable neurophotonic probes on thinned 200 mm silicon wafers," *Optics Express*, vol. 27, no. 26, pp. 37400–37418, 2019, doi: 10.1364/OE.27.037400.
- [4] J. Chiles, S. M. Buckley, S. W. Nam, R. P. Mirin, and J. M. Shainline, "Design, fabrication, and metrology of 10 × 100 multi-planar integrated photonic routing manifolds for neural networks," *APL Photonics*, vol. 3, no. 10, p. 106101, Jul. 2018, doi: 10.1063/1.5039641.
- [5] H. E. Dirani, "Development of high quality silicon nitride chips for integrated nonlinear photonics," phdthesis, Université de Lyon, 2019.
- [6] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 3rd ed., vol. 2. Wiley, 2019.
- [7] K. Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides - 2nd Edition*. Academic Press, 2005.
- [8] K. S. Chiang, "Review of numerical and approximate methods for the modal analysis of general optical dielectric waveguides," *Opt Quant Electron*, vol. 26, no. 3, pp. S113–S134, Mar. 1994, doi: 10.1007/BF00384667.
- [9] E. a. J. Marcatili, "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics," *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 7, pp. 2071–2102, 1969, doi: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01166.x>.
- [10] W. J. Westerveld, S. M. Leinders, K. W. A. van Dongen, H. P. Urbach, and M. Yousefi, "Extension of Marcatili's Analytical Approach for Rectangular Silicon Optical Waveguides," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 14, pp. 2388–2401, Jul. 2012, doi: 10.1109/JLT.2012.2199464.
- [11] Kumar, K. Thyagarajan, and A. K. Ghatak, "Analysis of rectangular-core dielectric waveguides: an accurate perturbation approach," *Opt. Lett.*, OL, vol. 8, no. 1, pp. 63–65, Jan. 1983, doi: 10.1364/OL.8.000063.
- [12] F. P. Payne and J. P. R. Lacey, "A theoretical analysis of scattering loss from planar optical waveguides," *Opt Quant Electron*, vol. 26, no. 10, pp. 977–986, Oct. 1994, doi: 10.1007/BF00708339.
- [13] E. Jaberansary, T. M. B. Masaud, M. M. Milosevic, M. Nedeljkovic, G. Z. Mashanovich, and H. M. H. Chong, "Scattering Loss Estimation Using 2-D Fourier Analysis and Modeling of Sidewall Roughness on Optical Waveguides," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 6601010–6601010, Jun. 2013, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2251869.
- [14] N. Daldosso *et al.*, "Comparison among various Si₃N₄ waveguide geometries grown within a CMOS fabrication pilot line," *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 7, pp. 1734–1740, Jul. 2004, doi: 10.1109/JLT.2004.831182.
- [15] N. Chauhan, J. Wang, D. Bose, R. Moreira, and D. J. Blumenthal, "Ultra-Low Loss 698 nm and 450 nm Silicon Nitride Visible Wavelength Waveguides for Strontium Atomic Clock Applications," in *2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 2020, pp. 1–2.
- [16] K. Wörhoff, R. G. Heideman, A. Leinse, and M. Hoekman, "TriPleX: a versatile dielectric photonic platform," *Advanced Optical Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 189–207, 2015, doi: 10.1515/aot-2015-0016.
- [17] A. Rahim *et al.*, "Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 639–649, Feb. 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2617624.
- [18] J. Guo *et al.*, "Characterization of Si₃N₄/SiO₂ planar lightwave circuits and ring resonators," presented at the *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2004, vol. 5350, pp. 13–22, doi: 10.1117/12.529641.
- [19] H. E. Dirani *et al.*, "Ultralow-loss tightly confining Si₃N₄ waveguides and high-Q microresonators," *Opt. Express*, OE, vol. 27, no. 21, pp. 30726–30740, Oct. 2019, doi: 10.1364/OE.27.030726.

- [20] Q. Wilmar et al., "A complete Si photonics platform embedding ultra-low loss waveguides for O- and C-band," *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.3030123.
- [21] Q. Wilmar et al., "A Versatile Silicon-Silicon Nitride Photonics Platform for Enhanced Functionalities and Applications," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 2, p. 255, Jan. 2019, doi: 10.3390/app9020255.
- [22] A. Gorin, A. Jaouad, E. Grondin, V. Aimez, and P. Charette, "Fabrication of silicon nitride waveguides for visible-light using PECVD: A study of the effect of plasma frequency on optical properties," *Optics Express*, vol. 16, no. 18, pp. 13509–13516, 2008, doi: 10.1364/OE.16.013509.
- [23] Min Chul Shin, "Chip-scale Blue Light Phased Array," *Optica*, 2019.
- [24] L. Hoffman et al., "Low Loss CMOS-Compatible PECVD Silicon Nitride Waveguides and Grating Couplers for Blue Light Optogenetic Applications," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 5, p. 2701211, Oct. 2016, doi: 10.1109/JPHOT.2016.2601782.
- [25] J. H. Song, T. D. Kongnyuy, A. Stassen, V. Mukund, and X. Rottenberg, "Adiabatically Bent Waveguides on Silicon Nitride Photonics for Compact and Dense Footprints," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 20, pp. 2164–2167, 2016, doi: 10.1109/LPT.2016.2585760.
- [26] C. G. H. Roeloffzen et al., "Low-Loss Si₃N₄ TriPleX Optical Waveguides: Technology and Applications Overview," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 4, pp. 1–21, Jul. 2018, doi: 10.1109/JSTQE.2018.2793945.
- [27] W. W. Lui, C.-L. Xu, and W.-P. Huang, "Full-Vectorial Wave Propagation in Semiconductor Optical Bending Waveguides and Equivalent Straight Waveguide Approximations," *J. Lightwave Technol.*, JLT, vol. 16, no. 5, p. 910, May 1998.
- [28] R. Baets and P. E. Lagasse, "Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides," *J. Opt. Soc. Am.*, JOSA, vol. 73, no. 2, pp. 177–182, Feb. 1983, doi: 10.1364/JOSA.73.000177.
- [29] J. F. Bauters et al., "Ultra-low-loss high-aspect-ratio Si₃N₄ waveguides," *Opt. Express*, OE, vol. 19, no. 4, pp. 3163–3174, Feb. 2011, doi: 10.1364/OE.19.003163.
- [30] M. Heiblum and J. Harris, "Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 75–83, Feb. 1975, doi: 10.1109/JQE.1975.1068563.
- [31] F. Ladouceur and E. Labeye, "A new general approach to optical waveguide path design," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 481–492, Mar. 1995, doi: 10.1109/50.372446.
- [32] J. Sun et al., "Large-Scale Silicon Photonic Circuits for Optical Phased Arrays," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 264–278, Jul. 2014, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2293316.
- [33] "Evanescent waveguide couplers," Lumerical Support. <https://support.lumerical.com/hc/en-us/articles/360042304694> (accessed Nov. 03, 2020).
- [34] A. Yariv, "Coupled-mode theory for guided-wave optics," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 9, no. 9, pp. 919–933, Sep. 1973, doi: 10.1109/JQE.1973.1077767.
- [35] H. Subbaraman et al., "Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects," *Opt. Express*, OE, vol. 23, no. 3, pp. 2487–2511, Feb. 2015, doi: 10.1364/OE.23.002487.
- [36] M. Błahut and D. Kasprzak, "Multimode interference structures -properties and applications," *Optica Applicata*, vol. 34, no. 4, pp. 573–587, 2004.
- [37] P. A. Besse, M. Bachmann, H. Melchior, L. B. Soldano, and M. K. Smit, "Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 6, pp. 1004–1009, Jun. 1994, doi: 10.1109/50.296191.
- [38] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 615–627, Apr. 1995, doi: 10.1109/50.372474.
- [39] Y. Bao, C. Verber, and R. Kenan, "Influence of Grating Shapes on Beam Profiles for Right-Angle Guided-Wave Diffraction," *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 8, pp. 595–597, Apr. 1992, doi: 10.1364/OL.17.000595.

- [40] A. Yariv and M. Nakamura, "Periodic structures for integrated optics," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 233–253, Apr. 1977, doi: 10.1109/JQE.1977.1069323.
- [41] T. Tamir and S. T. Peng, "Analysis and design of grating couplers," *Appl. Phys.*, vol. 14, no. 3, pp. 235–254, Nov. 1977, doi: 10.1007/BF00882729.
- [42] M.-A. Mattelin, A. Radosavljevic, J. Missinne, D. Cuypers, and G. V. Steenberge, "Design and fabrication of blazed gratings for a waveguide-type head mounted display," *Opt. Express*, OE, vol. 28, no. 8, pp. 11175–11190, Apr. 2020, doi: 10.1364/OE.384806.
- [43] Y. Wang, J. Flueckiger, C. Lin, and L. Chrostowski, "Universal grating coupler design," in *Photonics North 2013*, Oct. 2013, vol. 8915, p. 89150Y, doi: 10.1117/12.2042185.
- [44] Y. Wang, "Grating coupler design based on silicon-on-insulator," University of British Columbia, 2013.
- [45] F. V. Laere et al., "Compact Focusing Grating Couplers for Silicon-on-Insulator Integrated Circuits," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 23, pp. 1919–1921, Dec. 2007, doi: 10.1109/LPT.2007.908762.
- [46] R. Waldhäusl, B. Schnabel, P. Dannberg, E.-B. Kley, A. Bräuer, and W. Karthe, "Efficient Coupling into Polymer Waveguides by Gratings," *Appl. Opt.*, AO, vol. 36, no. 36, pp. 9383–9390, Dec. 1997, doi: 10.1364/AO.36.009383.
- [47] S. Dwivedi et al., "Measurements of Effective Refractive Index of SOI Waveguides using Interferometers," in *Advanced Photonics 2015 (2015)*, paper IM2A.6, Jun. 2015, p. IM2A.6, doi: 10.1364/IPRSN.2015.IM2A.6.
- [48] X. Wang et al., "Low Power and Compact Silicon Thermo-Optic Switch Based on Suspended Phase Arm Without Support Beams," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 19, pp. 1281–1284, Oct. 2020, doi: 10.1109/LPT.2020.3020428.
- [49] A. Masood et al., "Comparison of heater architectures for thermal control of silicon photonic circuits," in *10th International Conference on Group IV Photonics*, Aug. 2013, pp. 83–84, doi: 10.1109/Group4.2013.6644437.
- [50] R. Adar, C. H. Henry, M. A. Milbrodt, and R. C. Kistler, "Phase coherence of optical waveguides," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 603–606, Apr. 1994, doi: 10.1109/50.285352.
- [51] Y. Kim, M. Takenaka, T. Osada, M. Hata, and S. Takagi, "Strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption in SiGe optical modulators," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, Apr. 2014, doi: 10.1038/srep04683.
- [52] G. Liang et al., "Micron-Scale. Efficient, Robust Phase Modulators in the Visible," in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 2019, pp. 1–2, doi: 10.23919/CLEO.2019.8750664.
- [53] P. Neutens et al., "Characterization of PECVD silicon nitride photonic components at 532 and 900 nm wavelength," 2014, vol. 9133, doi: 10.1117/12.2052119.
- [54] W. Bogaerts et al., "Silicon microring resonators," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 6, no. 1, pp. 47–73, 2012, doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.201100017>.
- [55] A. Biberman, E. Timurdogan, W. A. Zortman, D. C. Trotter, and M. R. Watts, "Adiabatic microring modulators," *Opt. Express*, OE, vol. 20, no. 28, pp. 29223–29236, Dec. 2012, doi: 10.1364/OE.20.029223.
- [56] A. Yariv, "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides," *Electronics Letters*, vol. 36, no. 4, pp. 321–322, Feb. 2000, doi: 10.1049/el:20000340.
- [57] M. Raval, C. V. Poulton, and M. R. Watts, "Unidirectional waveguide grating antennas with uniform emission for optical phased arrays," *Opt. Lett.*, OL, vol. 42, no. 13, pp. 2563–2566, Jul. 2017, doi: 10.1364/OL.42.002563.
- [58] S. G. Johnson, C. Manolatu, S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and H. A. Haus, "Elimination of cross talk in waveguide intersections," *Opt. Lett.*, OL, vol. 23, no. 23, pp. 1855–1857, Dec. 1998, doi: 10.1364/OL.23.001855.
- [59] W. Bogaerts, P. Dumon, D. V. Thourhout, and R. Baets, "Low-loss, low-cross-talk crossings for silicon-on-insulator nanophotonic waveguides," *Opt. Lett.*, OL, vol. 32, no. 19, pp. 2801–2803, Oct. 2007, doi: 10.1364/OL.32.002801.

- [60] Y. Liu, J. M. Shainline, X. Zeng, and M. A. Popović, "Ultra-low-loss CMOS-compatible waveguide crossing arrays based on multimode Bloch waves and imaginary coupling," *Opt. Lett.*, OL, vol. 39, no. 2, pp. 335–338, Jan. 2014, doi: 10.1364/OL.39.000335.
- [61] H. Chen and A. W. Poon, "Low-Loss Multimode-Interference-Based Crossings for Silicon Wire Waveguides," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 21, pp. 2260–2262, Nov. 2006, doi: 10.1109/LPT.2006.884726.
- [62] A. M. Jones, C. T. DeRose, A. L. Lentine, D. C. Trotter, A. L. Starbuck, and R. A. Norwood, "Ultra-low crosstalk, CMOS compatible waveguide crossings for densely integrated photonic interconnection networks," *Optics Express*, vol. 21, no. 10, pp. 12002–12013, 2013, doi: 10.1364/OE.21.012002.
- [63] J. R. Ong, T. Y. L. Ang, G. Alagappan, C. H. Son, S. T. Lim, and C. E. Png, "Silicon nitride double-Tip fiber-To-waveguide edge couplers at visible wavelengths," 2017, vol. 2017–January, pp. 1–3, doi: 10.1109/CLEOPR.2017.8118895.
- [64] S. H. Tao, J. Song, Q. Fang, M. B. Yu, G. Q. Lo, and D. L. Kwong, "Improving coupling efficiency of fiber-waveguide coupling with a double-tip coupler," *Opt. Express*, OE, vol. 16, no. 25, pp. 20803–20808, Dec. 2008, doi: 10.1364/OE.16.020803.
- [65] M. Papes et al., "Fiber-chip edge coupler with large mode size for silicon photonic wire waveguides," *Optics Express*, vol. 24, no. 5, pp. 5026–5038, 2016, doi: 10.1364/OE.24.005026.
- [66] X. Wang, X. Quan, M. Liu, and X. Cheng, "Silicon-nitride-assisted edge coupler interfacing with high numerical aperture fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 5, pp. 349–352, 2019, doi: 10.1109/LPT.2019.2895095.
- [67] B. Snyder et al., "Ultra-broadband, polarization-insensitive SMF-28 fiber edge couplers for silicon photonics," 2017, vol. 2017–January, pp. 55–58, doi: 10.1109/ICSJ.2017.8240087.
- [68] L. Tong, F. Zi, X. Guo, and J. Lou, "Optical microfibers and nanofibers: A tutorial," *Optics Communications*, vol. 285, no. 23, pp. 4641–4647, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.optcom.2012.07.068.
- [69] Kenry and C. T. Lim, "Nanofiber technology: current status and emerging developments," *Progress in Polymer Science*, vol. 70, pp. 1–17, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.03.002.
- [70] K. Vanmol et al., "Mode-field matching design, 3D fabrication and characterization of down-tapers on single-mode optical fiber tips for coupling to photonic integrated circuits," in *3D Printed Optics and Additive Photonic Manufacturing II*, Mar. 2020, vol. 11349, p. 1134907, doi: 10.1117/12.2555770.

Chapitre 4

Conclusion et perspectives

4.1	<i>Bilan</i>	157
4.1.1	<i>Réalisation des objectifs initiaux</i>	157
4.1.1.1	Objectifs généraux	157
4.1.1.2	Objectifs spécifiques aux lots	158
4.1.2	<i>Conclusion</i>	160
4.2	<i>Perspectives</i>	160
4.2.1	<i>Points d'amélioration des travaux effectués</i>	160
4.2.2	<i>Interaction « guide d'onde – hologramme »</i>	161
4.2.3	<i>Proposition d'architecture pour le circuit d'adressage</i>	162
	Références	163
	Liste des publications pendant la thèse	164

Dans ce chapitre final, le bilan du travail effectué durant la thèse est dressé en conclusion, en comparaison des objectifs initiaux. Enfin, des perspectives sont présentées afin de proposer une orientation à la suite de ces travaux.

4.1 Bilan

Le développement du concept de projection rétinienne au CEA-LETI est divisé en deux parties majeures : un circuit PIC (longueur d'onde visible) et une partie holographique. Cette thèse s'est orientée majoritairement sur le développement de la première partie, i.e. le circuit de photonique intégrée. En parallèle, d'autres membres de l'équipe ont travaillé au développement de l'hologramme.

Les objectifs en début de thèse étaient ambitieux. D'abord, il fallait développer l'ensemble des briques de base servant à la conception du circuit photonique. Ensuite, il fallait les assembler dans un circuit applicatif afin de présenter un premier prototype de projecteur rétinien. En pratique, une première itération de conception, de fabrication et de caractérisation des blocs de base a été effectuée à l'aide du premier lot. Ceux-ci sont fonctionnels et démontrent généralement une bonne efficacité, à l'exception des guides d'onde monomodes qui présentent de fortes pertes de propagation. Un second lot a été conçu avec pour but l'étude de l'interaction « guide d'onde – hologramme ». Celui-ci est toujours en cours de fabrication à la fin de la thèse et n'a pas pu être caractérisé. Les délais de fabrication des lots ont représenté un frein majeur au potentiel d'avancement expérimental de la thèse (la fabrication du premier lot s'est étalée sur 2 ans). Un troisième lot avait été prévu pour concevoir le circuit applicatif basé sur les résultats des lots 1* et 2. Toutefois, la conception de ce dernier lot n'a pas été réalisée, notamment à cause de contraintes de temps.

La thèse a aussi été l'occasion de développer notre propre outil de caractérisation (goniomètre). Sa conception a été orientée selon les besoins spécifiques en caractérisation du projet.

Les sous-sections suivantes détaillent l'atteinte des objectifs par rapport aux objectifs initiaux fixés en début de thèse. Une conclusion du travail est ensuite présentée.

4.1.1 Réalisation des objectifs initiaux

4.1.1.1 Objectifs généraux

Les objectifs principaux de la thèse ont été atteints partiellement. L'état de réalisation de ceux-ci est détaillé dans la liste ci-dessous :

- ☑ [Complété] La plupart des briques photoniques de base du PIC à $\lambda = 532$ nm ont été modélisées, simulées, fabriquées et caractérisées. Ces briques sont fonctionnelles et présentent en majorité une bonne efficacité de fonctionnement.
- ☑ [Complété] Un banc de caractérisation (goniomètre) a été monté et calibré pour l'étude de nos circuits photoniques. Cet outil a été utilisé pour étudier les propriétés angulaires des circuits photoniques et imager des distributions de points à leur surface.
- ☑ [Complété] Une première architecture de distribution dense de guides d'onde a été conçue et ses performances en propagation ont été analysées. La plus grande distribution consiste en un réseau de guides d'onde de 1024 guides d'onde espacés périodiquement de 1.5 μm . Ces réseaux sont fonctionnels. L'homogénéité de la distribution du signal est bonne mais doit être améliorée dans une prochaine itération de conception.

- ☒ [Incomplet] L'étude de l'interaction « guide d'onde – hologramme » n'a pas été complétée. Toutefois, le lot 2 a été conçu dans le but d'effectuer cette étude expérimentale. La caractérisation du lot doit s'effectuer après la thèse.
- ☑ [Complété] L'étude des briques de base a permis de déduire les principales contraintes sur l'architecture du circuit photonique du projet de projection rétinienne
- ☒ [Non réalisé] La conception d'une architecture réaliste pour adresser les DPEs aléatoires à partir du PIC n'a pas été réalisée, en partie à cause de contraintes de temps. Il en découle que le prototype de projection rétinien n'a pas été réalisé. Un stagiaire que j'ai encadré a toutefois entamé sa thèse pour prendre le relais sur cette problématique d'adressage.

4.1.1.2 Objectifs spécifiques aux lots

Dans le premier lot, les briques de base du circuit photonique visible ont été développées. Les dimensionnements finaux des composants et leurs performances sont résumés au **Tableau 4-1**.

Les objectifs secondaires du lot 1* ont été partiellement atteints :

- ☒ [Incomplet] Les procédés de fabrication de circuits en Si_3N_4 à $\lambda = 532$ nm au CEA-LETI ont été testés et validés en grande partie. Il subsiste toutefois des problèmes de pertes de propagation à étudier, notamment par l'étude de la réduction de la rugosité de surface en fonction des procédés de fabrication.
- ☒ [Non réalisé] L'indice effectif des guides d'onde n'a pas pu être mesuré précisément à l'aide des interféromètres de Mach-Zehnder. Toutefois, une méthode a été développée pour déterminer cet indice à l'aide des mesures angulaires de l'émission des réseaux de diffraction et des photos FIB de ces derniers.
- ☑ [Complété] Nous avons pu déterminer nos besoins et maîtriser les outils de caractérisation des PICS dans le cadre du projet.

Au niveau du lot 2, des circuits photoniques spécifiques ont été conçus pour étudier l'interaction « guide d'onde – hologramme ». La fabrication des plaques du lot a aussi été adaptée à cette étude en prévoyant la mise en transparence des substrats. Cette transparence est essentielle à l'enregistrement et la lecture des hologrammes déposés sur le circuit photonique. Puisque la fabrication du lot n'a pas été terminée avant la fin de la thèse, l'interaction « guide d'onde – hologramme » n'a pas été étudiée expérimentalement. Les objectifs spécifiques associés à ce lot n'ont donc pas été complétés avant la fin de la thèse.

Au niveau du lot 3, servant à étudier l'architecture d'adressage des DPEs aléatoires en vue d'un prototype, le travail accompli reste incomplet. Des éléments de réflexion associés à ce lot sont présentés dans la sous-section **4.2 Perspectives**.

Tableau 4-1 Synthèse des briques de base du circuit photonique.

Composant	Dimensions nominales	Performance
Coupleur par réseau de diffraction	Nombre de périodes: 40 Facteur de remplissage: 0.5 Pas du réseau: 400 nm BOX: 2 μm Gravure totale (200 nm)	Pertes médianes de couplage: -3.95 dB Ecart-type: 0.12 dB
Guide d'onde droit (monomode)	Epaisseur: 200 nm Largeur: 300 nm	Pertes médianes de propagation: -15.8 dB/cm (au <i>prober</i>) Ecart-type: 1.1 dB/cm
Guide d'onde courbe sinusoïdal	Rayon de courbure minimal: 5-20 μm	Pertes de courbure généralement inférieures à -0.05 dB/90° (~ 1 %)
Coupleur directionnel 3 dB	<i>Dimensions nominales:</i> Ecart bord-bord des guides: 150 nm Longueur de la zone de couplage linéaire: 5 μm <i>Dimensions optimales:</i> Identiques sauf l'écart bord-bord des guides qui augmente à 180 nm.	Débalancement médian des 2 bras de sortie (<i>nominal</i>): -4.59 dB (~ 65%) Ecart-type du débalancement: 0.44 dB Débalancement médian des 2 bras de sortie (<i>optimal</i>): 0.27 dB (~ 6%) Ecart-type du débalancement: 0.32 dB
Coupleur MMI 1 \rightarrow 2	<i>Dimensions nominales:</i> Longueur: 3.6 μm Largeur: 1.4 μm Ecartement centre-centre entre les bras de sortie: 740 nm Elargissement des guides: 470 nm <i>Dimensions optimales:</i> Identiques sauf la longueur du MMI qui augmente à 3.7 μm	Pertes médianes de transmission (<i>nominal</i>): -0.27 dB Débalancement des bras (<i>nominal</i>): ~ 2.4 % Pertes médianes de transmission (<i>optimal</i>): -0.09 dB
Interféromètre de Mach-Zehnder	<i>MZI actif:</i> Longueur chaufferette: 64 μm Largeur chaufferette: 500 nm – 1.15 μm Les isolations thermiques latérales sont segmentées et font 28 μm de long par 1 μm de large	<i>MZI passif:</i> La fonction d'interférence est difficile à observer. Des maximums/minimums en transmission sont observés à des positions aléatoires. Ceux-ci sont distants au maximum de 20 dB <i>MZI actif:</i> La puissance médiane pour effectuer un déphasage de 0 à π est de 28 mW. Le facteur d'extinction est de 13 dB
Croisements de guides d'onde	Les guides nominaux (200 nm x 300 nm) sont élargis à 1500 nm sur une distance de 20 μm à l'intersection formant le croisement	Pertes médianes au croisement: -0.18 dB Ecart-type: 0.02 dB
Couplage entre les guides d'onde	Guides nominaux (200 nm x 300 nm) espacés de 1.5 μm centre-centre	Le couplage entre les guides nominaux espacés de 1.5 μm centre-centre est très faible sur une distance de propagation de 1 mm. La différence de puissance entre deux guides couplés dans ces conditions est d'environ 40 dB

4.1.2 Conclusion

Cette thèse représente les premiers travaux de recherche et de développement pour la partie de photonique intégrée du projet de projecteur rétinien au CEA-LETI. L'objectif final de la thèse était la réalisation d'un prototype servant de preuve de concept expérimentale au projecteur rétinien. Le prototype devait être constitué d'un PIC ayant quelques dizaines de points d'émission interagissant avec des hologrammes pour afficher de façon passive une image simple de quelques pixels (ex : une lettre « T » ou le nom « LETI »). Bien que cet objectif final n'ait pas été réalisé, les travaux menés dans la thèse permettent de se rapprocher de cet objectif à court terme.

En effet, les résultats de thèse ont permis de démontrer une bibliothèque de composants photoniques intégrés (lot 1*) majoritairement fonctionnels et présentant une bonne efficacité. Cette efficacité se traduit notamment à la fois dans les faibles pertes de transmission des composants, la bonne efficacité de couplage des réseaux de diffraction et notre capacité à assembler un grand nombre de blocs de base en un assemblage fonctionnel. La thèse fournit donc une avancée majeure vers le développement du circuit photonique applicatif final. Il reste toutefois à réduire fortement les pertes de propagation des guides d'onde monomodes (-15.8 dB/cm) afin de tendre vers le niveau de pertes retrouvé en littérature, soit environ -4 à -7 dB/cm dans le cas de Sacher *et al.* [1] ou idéalement jusqu'à -1.5 dB/cm comme dans le cas de Subramanian *et al.* [2]. Ces pertes sont critiques à la suite du projet car elles influent sur l'efficacité énergétique du projecteur rétinien ainsi que sur le bruit du circuit (enregistrement des hologrammes, visibilité au travers des lunettes de projection, clarté de l'image générée etc.).

Une partie des travaux a également été entamée afin d'étudier l'utilisation combinée du circuit photonique et des hologrammes (i.e. interaction « guide d'onde – hologramme »). Ce travail est représenté par la conception du lot 2, dont la fabrication devrait s'achever après la thèse. Le lot 2 représente un premier prototype de projection combinant les guides d'onde et les hologrammes. Il pourrait donc permettre de projeter quelques points d'émission pour répondre à l'objectif final de thèse.

Bien qu'aucun circuit d'adressage final n'ait été finalisé (le lot 3 n'ayant jamais vu le jour), la thèse aura été l'occasion de travailler en collaboration avec un stagiaire, Kyllian Millard, qui pourra reprendre les résultats de mes travaux afin de finaliser le circuit photonique applicatif. Une sous-section portant sur les perspectives est donc présentée ci-après afin de proposer une orientation à la suite des travaux entamés durant cette thèse.

4.2 Perspectives

Cette sous-section traite des perspectives associées au développement du circuit photonique pour le projet de projecteur rétinien.

4.2.1 Points d'amélioration des travaux effectués

Pendant la thèse plusieurs composants photoniques ont été développés, dont les guides d'onde monomodes. Ces derniers présentent de fortes pertes de propagation. L'hypothèse la plus probable expliquant ces pertes provient de la grande rugosité de surface des guides d'onde. Celle-ci est directement dépendante des conditions de fabrication des circuits en salle blanche (notamment au niveau des étapes de gravure). Dans le futur, il serait intéressant d'optimiser les conditions de gravure (plasmas utilisés, utilisation d'un masque dur ou non, épaisseur des résines) pour minimiser la rugosité des guides. Cela aurait pour but de diminuer suffisamment leurs pertes de propagation pour guider efficacement le signal dans le circuit applicatif final. La réduction des pertes de propagation permet de réduire la consommation

électrique des lasers embarqués dans le dispositif final. Cela permet aussi de réduire le bruit émis du circuit et observé par l'utilisateur des lunettes de réalité augmentée.

Une autre piste pour réduire les pertes de propagation des guides est l'augmentation de leur largeur (i.e. guides multimodes) dans les zones de propagation linéaires. L'élargissement des guides est toutefois limité par l'objectif d'un circuit à forte compacité de guides d'ondes. En effet, le nombre de points d'émission du projecteur rétinien est proportionnel à la densité de guides dans le circuit. Le nombre de points d'émission est lié à la qualité de l'image qui peut être générée sur la rétine de l'observateur. Des modèles mathématiques ont été développés dans notre équipe au CEA-LETI afin d'optimiser la distribution aléatoire et le nombre de PEs du circuit [3][4]. Ces modèles pourraient être utilisés en combinaison des résultats expérimentaux du lot 1* pour dimensionner de façon optimale la largeur maximale de guides multimodes admise (réduction des pertes de propagation) tout en conservant une compacité des guides suffisante (i.e. nombre de points d'émission élevé).

Le lot 1* a également servi d'introduction aux composants actifs pour moduler le signal dans le circuit. Les seuls composants actifs qui ont été testés sont des interféromètres de Mach-Zehnder munis de chaufferettes. Ces composants occupent une grande surface sur le circuit. Le développement de commutateurs pour contrôler activement le signal dans le circuit est un élément essentiel pour le circuit applicatif final. Il serait intéressant de se pencher sur d'autres types de commutateurs plus compacts, tels que les anneaux de résonance actifs [5][6][7]. Il pourrait aussi être intéressant d'étudier la modulation d'indice dans ces composants par l'effet de dispersion plasma [8] plutôt que par effet thermo-optique. L'effet de dispersion plasma permet généralement une fréquence de fonctionnement plus élevée du commutateur [9]. Les cristaux liquides pourraient également être utilisés pour la modulation d'indice autour des guides d'onde afin de diriger activement le parcours de la lumière [10][11]. Des travaux dans notre équipe au CEA-LETI ont été entamés dans ce sens [12].

Pour la conception d'un circuit complexe, il sera aussi nécessaire d'étudier des coupleurs multi-niveaux. Une méthode originale pour transporter le signal d'un niveau de circuit à un autre a été proposé par Nuck *et al.* [13], où un MMI 3D permet de connecter deux couches de circuit.

Le lot 2, dédié à l'interaction « guide d'onde – hologramme » nécessite un changement du substrat opaque en Si par un substrat transparent en SiO₂. Les manipulations en salle blanche durant la fabrication de ce lot pourraient être utilisées pour une étude de la flexibilité du circuit photonique. En effet, si l'on vise à introduire le circuit sur un verre de lunette avec une correction visuelle (ex : myopie), celui-ci sera forcément courbe. Il semble alors primordial d'avoir la possibilité de courber le circuit sur ce verre pour garantir la compacité de l'assemblage.

Enfin, les guides monomodes à $\lambda = 532$ nm (vert) sont également monomodes pour des longueurs d'onde plus élevées, comme à $\lambda = 633$ nm (rouge). Il pourrait être intéressant de tester les blocs photoniques de base pour étudier leur tolérance en longueur d'onde. Éventuellement, le circuit pourrait ainsi fonctionner en plusieurs couleurs.

4.2.2 Interaction « guide d'onde – hologramme »

L'interaction « guide d'onde – hologramme » est essentielle à la combinaison du circuit photonique avec les hologrammes. Celle-ci sert à orienter les faisceaux des points d'émission et à accorder leur phase pour générer l'effet d'auto-focalisation.

L'interaction entre un guide de quelques centaines de nanomètres avec un hologramme analogue a peu été étudié en littérature [14].

En vue de l'étude expérimentale de cette interaction avec le lot 2, il pourrait être intéressant d'étudier l'interaction de façon numérique à l'aide d'outils de simulation, tel qu'à l'aide de l'environnement FDTD 2D dans RSoft. Le matériau holographique pourrait être simulé par une matrice dont l'indice varie localement en fonction de l'intensité des champs électriques qui s'y trouvent et y interfèrent (ondes objet et référence).

4.2.3 Proposition d'architecture pour le circuit d'adressage

L'adressage d'un grand nombre de guides d'onde de façon aléatoire nécessite une architecture complexe de commutateurs optiques. On retrouve quelques architectures de circuits en littérature qui permettraient éventuellement de concevoir l'architecture d'adressage recherchée pour notre projet, tel que dans les travaux Roeloffzen *et al.* ^[15] qui s'intéressent aux circuits photoniques programmables ou dans les travaux de Cong *et al.* ^[16] qui se penchent sur les architectures neuronales en photonique.

Fin.

Références

- [1] W. D. Sacher et al., "Visible-light silicon nitride waveguide devices and implantable neurophotonic probes on thinned 200 mm silicon wafers," *Optics Express*, vol. 27, no. 26, pp. 37400–37418, 2019, doi: 10.1364/OE.27.037400.
- [2] A. Z. Subramanian et al., "Low-Loss Singlemode PECVD Silicon Nitride Photonic Wire Waveguides for 532-900 nm Wavelength Window Fabricated Within a CMOS Pilot Line," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 2202809–2202809, Dec. 2013, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2292698.
- [3] C. Martinez, F. Rainouard, and B. Meynard, "Design Considerations for Holographic Retinal Projection Display," presented at the International Display Workshops Incorporated Association, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.36463/idw.2019.1469>.
- [4] F. Rainouard, C. Martinez, and B. Meynard, "Mathematical approach for the design of emissive points distributions for holographic retinal projection devices," in *OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF) (2020)*, paper JTU3F.17, Jul. 2020, p. JTU3F.17, doi: 10.1364/PSC.2020.JTU3F.17.
- [5] G. Liang et al., "Micron-Scale. Efficient, Robust Phase Modulators in the Visible," in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 2019, pp. 1–2, doi: 10.23919/CLEO.2019.8750664.
- [6] W. Bogaerts et al., "Silicon microring resonators," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 6, no. 1, pp. 47–73, 2012, doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.201100017>.
- [7] A. Biberman, E. Timurdogan, W. A. Zortman, D. C. Trotter, and M. R. Watts, "Adiabatic microring modulators," *Opt. Express, OE*, vol. 20, no. 28, pp. 29223–29236, Dec. 2012, doi: 10.1364/OE.20.029223.
- [8] Y. Kim, M. Takenaka, T. Osada, M. Hata, and S. Takagi, "Strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption in SiGe optical modulators," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, Apr. 2014, doi: 10.1038/srep04683.
- [9] H. Subbaraman et al., "Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects," *Opt. Express, OE*, vol. 23, no. 3, pp. 2487–2511, Feb. 2015, doi: 10.1364/OE.23.002487.
- [10] J. Notaros, M. Notaros, M. Raval, and M. R. Watts, "Liquid-Crystal-Based Visible-Light Integrated Optical Phased Arrays," in *Conference on Lasers and Electro-Optics (2019)*, paper STU3O.3, May 2019, p. STU3O.3, doi: 10.1364/CLEO_SI.2019.STU3O.3.
- [11] M. Notaros, M. Raval, J. Notaros, and M. R. Watts, "Integrated Visible-Light Liquid-Crystal Phase Modulator," in *Frontiers in Optics / Laser Science (2018)*, paper FW6B.5, Sep. 2018, p. FW6B.5, doi: 10.1364/FIO.2018.FW6B.5.
- [12] M. Colard, M. Colard, C. Martinez, and O. Haeberlé, "Switching behavior of pixelated holograms for retinal projection display," in *OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF) (2020)*, paper JTU3F.4, Jul. 2020, p. JTU3F.4, doi: 10.1364/PSC.2020.JTU3F.4.
- [13] M. Nuck et al., "3D photonic integrated 4x4 multi-mode interference coupler," in *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXIII*, Mar. 2019, vol. 10921, p. 109211C, doi: 10.1117/12.2509776.
- [14] T. Suhara, H. Nishihara, and J. Koyama, "Waveguide holograms: A new approach to hologram integration," *Optics Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 353–358, 1976, doi: 10.1016/0030-4018(76)90097-3.
- [15] C. G. H. Roeloffzen et al., "Low-Loss Si₃N₄ TriPleX Optical Waveguides: Technology and Applications Overview," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 4, pp. 1–21, Jul. 2018, doi: 10.1109/JSTQE.2018.2793945.
- [16] G. Cong et al., "Opportunities of silicon photonics for calculation and machine learning applications (Conference Presentation)," in *Integrated Photonics Platforms: Fundamental Research, Manufacturing and Applications*, Apr. 2020, vol. 11364, p. 1136409, doi: 10.1117/12.2557459.

Liste des publications pendant la thèse

- [1] F. Rainouard, C. Martinez, and B. Meynard, "Mathematical approach for the design of emissive points distributions for holographic retinal projection devices," in *OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF)* (2020), paper JTU3F.17, Jul. 2020, p. JTU3F.17, doi: 10.1364/PSC.2020.JTU3F.17.
- [2] B. Meynard, C. Martinez, D. Fowler, and E. Molva, "SiN photonic integrated circuit designed to evaluate its interaction with a hologram for an Augmented Reality application," in *Integrated Photonics Platforms: Fundamental Research, Manufacturing and Applications*, Apr. 2020, vol. 11364, p. 113640H, doi: 10.1117/12.2554540.
- [3] B. Meynard, C. Martinez, D. Fowler, and E. Molva, "Integrated optical network design for a retinal projection concept based on single-mode Si₃N₄ waveguides at 532 nm," in *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXIII*, Mar. 2019, vol. 10921, p. 109210X, doi: 10.1117/12.2507252.
- [4] B. Meynard, C. Martinez, D. Fowler, and E. Molva, "Design of Si₃N₄ waveguides and components to form an integrated optical network for retinal projection in thin augmented reality glasses," in *Optical Design Challenge 2019*, Feb. 2019, vol. 11040, p. 1104004, doi: 10.1117/12.2523648.
- [5] C. Martinez, F. Rainouard, and B. Meynard, "Design Considerations for Holographic Retinal Projection Display," presented at the *International Display Workshops Incorporated Association*, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.36463/idw.2019.1469>.
- [6] C. Martinez, B. Meynard, and Y. Lee, "Multiplexed pixelated hologram recording process for retinal projection device," in *Practical Holography XXXIII: Displays, Materials, and Applications*, Mar. 2019, vol. 10944, p. 109440N, doi: 10.1117/12.2507249.
- [7] C. Martinez, V. Krotov, B. Meynard, and D. Fowler, "See-through holographic retinal projection display concept," *Optica, OPTICA*, vol. 5, no. 10, pp. 1200–1209, Oct. 2018, doi: 10.1364/OPTICA.5.001200.

Annexe

A.	Calibration du contrôleur de polarisation	166
B.	Guide d'onde monomode	167
<i>I.</i>	<i>Comparaison lots 1 et 1*</i>	167
<i>II.</i>	<i>Comparaison des méthodes de mesure entre le prober et le goniomètre</i>	169
C.	Guide courbe	170
D.	Réseaux de diffraction.....	172

A. Calibration du contrôleur de polarisation

La polarisation du faisceau laser en entrée d'un circuit photonique peut avoir un fort impact sur l'efficacité du couplage par réseau. De plus, elle a un impact sur l'efficacité de plusieurs composants des circuits photonique qui sont généralement conçus pour fonctionner à une polarisation précise (TE typiquement).

Initialement, la source laser fibrée est partiellement polarisée de façon aléatoire. Un contrôleur de polarisation (Thorlabs FPC021) est donc nécessaire pour régler la polarisation du signal dans le montage. On souhaite pouvoir polariser le signal linéairement en TE ou en TM (i.e. les deux polarisations classiques pour l'étude de circuits photoniques intégrés).

Notre contrôleur de polarisation possède 2 disques dans lesquels sont enroulés la fibre #2. L'orientation des disques et la torsion des fibres permet de contrôler la polarisation en sortie de fibre. Le nombre de tour de fibre est calibré pour que chacun des deux disques du contrôleur de polarisation agisse approximativement comme une lame quart d'onde ou demi-onde.

Pour valider le fonctionnement du contrôleur de polarisation, nous avons étudié la polarisation du signal de sortie émis de la fibre d'injection (fibre #3). Pour ce faire, nous avons installé un filtre polarisant orientable (0-360 deg) devant la sortie de cette fibre. Le signal traversant le filtre est capté sur un photodétecteur. Lorsque le filtre est orienté à 0 deg, il laisse passer la polarisation TM. A 90 deg, il laisse passer la polarisation TE. Les angles de transmission TE et TM du filtre ont été calibrés à l'aide de l'angle de Brewster en observant le signal polarisé réfléchi sur une lame de verre.

Les disques du contrôleur ont été orientés pour maximiser le signal au photodétecteur en TE (filtre polarisant à 90 deg) ou TM (filtre polarisant à 0 deg). Le filtre a ensuite été tourné de 0 à 180 deg. Les courbes de transmission obtenues selon l'angle du filtre (**Figure A-1**) montrent que le contrôleur de polarisation permet de régler la polarisation linéairement en sortie de fibre. Le facteur d'extinction (FE) moyen obtenu est de 100, ce qui est suffisant dans notre cas. Toutefois, un ajustement très précis du contrôleur de polarisation devrait permettre d'atteindre un FE de 1000 selon les spécifications techniques du fabricant Thorlabs. Le facteur d'extinction est le ratio entre la puissance maximale et minimale mesurée au photodétecteur sur l'ensemble du domaine angulaire du filtre polarisant. Un haut FE et une fonction sinusoïdale (transmission en fonction de l'angle) avec une période de 180 deg indiquent que la polarisation est bien linéaire.

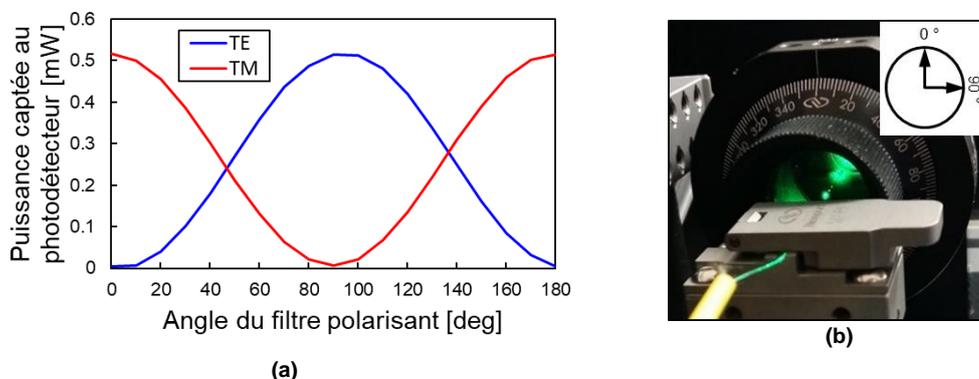


Figure A-1 Validation du fonctionnement du contrôleur de polarisation, a) puissance captée de la fibre d'émission polarisée en TE ou TM à travers un filtre polarisant orientable, b) photo du montage.

En pratique, dans les instruments de caractérisation (goniomètre et *prober*) l'angle de couplage de la fibre d'injection (fibre #3) est généralement ajusté pour correspondre à l'angle de couplage de la polarisation étudiée. En effet, les angles optimaux de couplage dans un réseau de diffraction ne sont pas les mêmes pour les polarisations TE ou TM. Dans notre cas, l'angle de couplage est ajusté pour correspondre à la polarisation TE. Cela favorise plus facilement l'injection de cette polarisation dans les circuits par rapport à la polarisation TM. Toutefois, cette sensibilité n'a pas été optimisée lors de la conception de nos réseaux de couplage. Dans nos échantillons, la différence entre les angles de couplage optimaux TE et TM n'est que de ~ 2 deg, ce qui confère une faible sélectivité en polarisation à nos coupleurs réseau.

Le réglage de la polarisation TE s'effectue donc majoritairement à l'aide du contrôleur de polarisation et de circuits photoniques intégrés sensibles en polarisation, comme par exemple les MMs (optimisé en TE) ou les guides courbes.

Une fois la polarisation réglée, il est important de ne plus toucher aux trois fibres optiques en entrée du circuit. Celles-ci doivent être fixées. En effet, elles ne sont pas à maintien de polarisation. Si elles se déplacent (vibrations, torsions...), cela peut affecter l'état de polarisation à l'entrée des circuits photoniques.

Les fibres à maintien de polarisation n'ont pas été utilisées dans notre cas. En effet, celles-ci nécessitent un alignement précis de leur coupe transversale (i.e. les 2 cœurs dans le cas d'une fibre panda) par rapport à la surface du circuit afin d'y injecter la polarisation voulue. L'orientation des faces des fibres pourrait fortement complexifier notre montage.

B. Guide d'onde monomode

I. Comparaison lots 1 et 1*

A priori, puisque le lot 1 a souffert d'un défaut de fabrication, on aurait pu s'attendre à ce que les pertes de propagation des guides de ce lot soient nettement supérieures à celles du lot 1*. Toutefois, les mesures au *prober* montrent le résultat inverse. En effet, les pertes de propagation sur le lot 1 sont moins élevées (médianes [-11.5, -13.3] dB/cm) que celles mesurées sur le lot 1* (médianes [-15.0, -16.1] dB/cm). L'écart mesuré entre les médianes des deux lots est supérieur à l'incertitude de mesure, que ce soit à l'aide des écart-types ou des extrêmes mesurés.

La différence principale lors de la fabrication des lots 1 et 1* est que la gravure complète des guides d'onde dans le lot 1 s'est effectuée en deux étapes (gravure du BARC puis gravure simultanée du masque dur et des guides d'onde) alors que la gravure du lot 1* s'est effectuée en trois étapes (gravure du BARC, du masque dur puis des guides). De plus, une étape de nettoyage (résine, débris d'oxyde etc.) est effectuée dans le lot 1* après la gravure du masque dur, ce qui n'est pas le cas dans le lot 1. Ces différences sont détaillées au chapitre 2 **Moyens**.

Les photos MEB montrées au chapitre 2 **Moyens 2.3.1 Fabrication du lot 1** montrent les guides du lot 1 après gravure. Ceux-ci sont mal dimensionnés (flancs en pente) et leur forte rugosité de surface est visible. Les autres guides d'onde montrés sur les photos MEB du lot 1 correspondent à une plaque de test différente de celles testées expérimentalement et est normalement représentative de la fabrication du lot 1*. On peut y observer que les guides sont bien dimensionnés, que la rugosité de surface est très faible (pas visible sur les photos) et que l'état de surface du masque dur au-dessus des guides d'onde est nettement meilleur (surface lisse) que lors de la fabrication du lot 1 ayant eu des défauts de fabrication. Malheureusement, la rugosité de surface du masque dur après gravure n'a pas été évaluée quantitativement dans chaque cas.

La pente des guides d'onde dans le lot 1 (avec défauts) doit participer à augmenter les pertes causées par la rugosité des flancs. En effet, une simulation RSoft pour un guide 200 nm x 300 nm avec une pente de 10% (estimé selon les photos MEB) montre bien que le champ électrique du mode fondamental TE_0 est légèrement déconfiné avec la pente. Celui-ci est davantage en contact avec les flancs des guides, comme montré à la **Figure A-2**. Ceci s'explique à la fois par la forme du guide ainsi que par son indice effectif plus faible dû à une réduction du matériau dans le cœur du guide. Des flancs en angle présentent également une surface plus grande que des flancs droits, participant ainsi à l'augmentation des pertes causés par la rugosité latérale du guide.

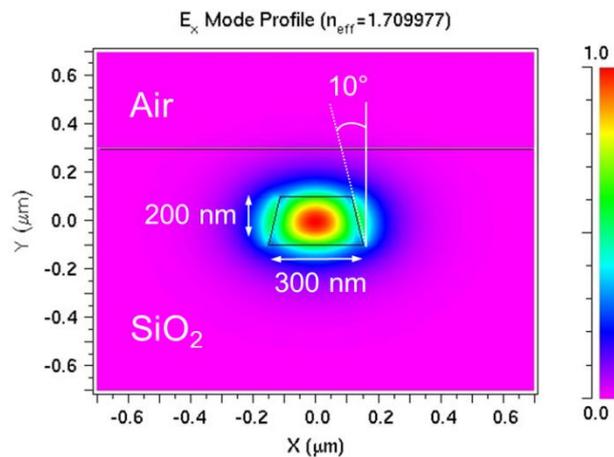


Figure A-2 Représentation graphique du champ électrique majoritaire (E_x) du mode fondamental TE_0 dans la coupe transversale du guide d'onde nominal (200 nm x 300 nm) à $\lambda = 519$ nm lorsque les flancs ont un angle de 10 degrés.

Malgré qu'il soit ainsi contre-intuitif que le lot 1 arbore des pertes inférieures au lot 1*, deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat :

- 1) La rugosité de surface supérieure du masque dur doit contribuer à causer de fortes pertes au-dessus des guides d'onde. Dans le lot 1, il est possible que la résine et le BARC présents au moment de la gravure simultanée du masque dur et des guides aient aidé à préserver la couche d'oxyde du masque dur. Celle-ci a donc peut-être été moins consommée que celle du masque dur du lot 1*. En effet, dans le lot 1*, le masque dur utilisé lors de la gravure des guides est complètement exposé au bombardement ionique de la gravure (i.e. pas de résine). Cette forte exposition à la gravure pourrait avoir aminci cette couche davantage que la couche de masque dur du lot 1 qui était protégée par la résine et le BARC. L'épaisseur du masque dur du lot 1 n'a pas été mesurée après gravure. Dans le lot 1*, l'épaisseur du masque dur après l'ensemble des gravures est réduite à ~ 120 nm (contre 200 nm avant gravure). La rugosité de cette couche est donc suffisamment proche du champ évanescence du mode guidé pour interagir avec celui-ci. Cette interaction pourrait contribuer à augmenter les pertes de propagation des guides d'onde.

Sur les photos MEB chapitre 2 **Moyens, 2.3.1 Fabrication du lot 1**, on observe que la rugosité de surface du masque dur est plus élevée sur le lot 1 que sur les plaques test qui doivent être représentatives du lot 1*. Toutefois, si cette couche est moins épaisse dans le cas du lot 1*, il est possible qu'elle ait un effet plus néfaste sur les pertes de propagation que celle du lot 1 car elle interagit davantage avec le champ évanescent du mode guidé. Ainsi, une faible rugosité du masque dur proche du guide peut potentiellement être plus néfaste qu'une forte rugosité plus loin du guide.

- 2) Il est possible que la qualité de fabrication sur nos plaques soit moins bonne que celle montrée sur les photos MEB du lot 1* (plaque test), notamment si une erreur de fabrication n'a pas été correctement répertoriée. Cela est d'autant plus plausible au vu des fortes pertes de propagation mesurées sur le lot 1*.

II. Comparaison des méthodes de mesure entre le *prober* et le goniomètre

La différence des pertes de propagation mesurées entre le *prober* et le goniomètre s'explique par les méthodes de mesure employées sur les deux instruments de caractérisation. Dans le cas du *prober*, une fibre optique est alignée avec le réseau d'extraction de chaque sous-circuit. La lumière captée correspond exactement à celle en sortie du circuit étudié.

Dans le cas du goniomètre, la lumière captée provient d'une zone large d'émission centrée sur la position du réseau d'extraction. Cela augmente la captation de lumière provenant du bruit environnant (bruit de fond estimé entre 200-300 pW). Le bruit de fond est soustrait sur les mesures. Dans notre cas, nous avons également observé que les fortes pertes des circuits de spirales sont collectées par les circuits adjacents (couplage des pertes vers les circuits adjacents). Dans le cas de la spirale 30 mm, une partie du bruit est captée par la spirale de 20 mm. Cette lumière est guidée puis émise en sortie de la spirale de 20 mm. On observe ainsi deux points d'émission au lieu d'un seul. Expérimentalement, l'effet semble indépendant de la polarisation. De plus, le couplage du bruit s'atténue rapidement lorsqu'on injecte le signal laser dans des spirales plus courtes. Lorsqu'on couple le signal dans la spirale de 10 mm, plus aucun effet de couplage n'apparaît. La distance entre les sous-circuits (10 μm) est plus que suffisante pour éviter les effets de couplage « naturels » entre les modes de guides d'onde rapprochés. En effet, les résultats expérimentaux montrent bien qu'aucun couplage ne s'effectue le long de guides d'onde distants de plus de 1.5 μm même lorsqu'ils sont rapprochés sur une distance allant jusqu'à 1 mm.

Le goniomètre capte donc davantage de bruit au dernier point d'acquisition (spirale 30 mm), ce qui réduit la pente de la régression linéaire permettant de déterminer les pertes de propagation. Cet effet est représenté à la **Figure A-3**.

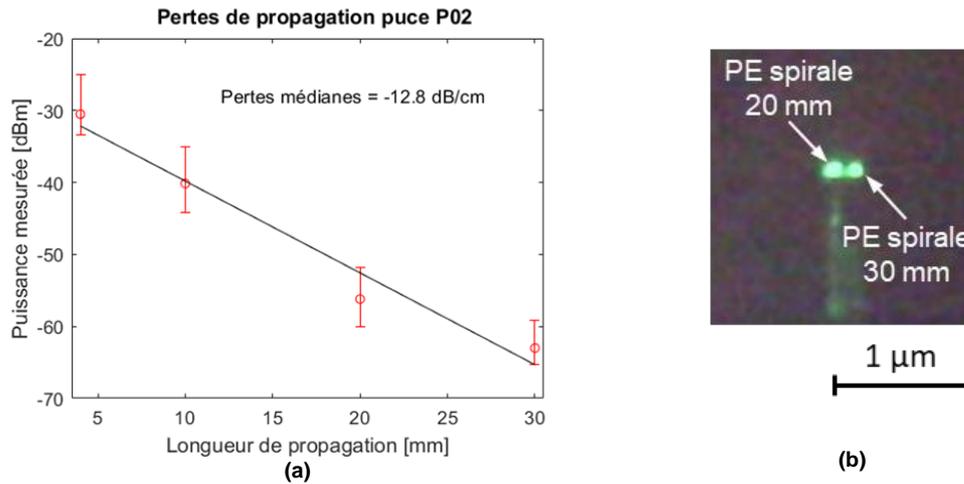


Figure A-3 Erreur lors des mesures de propagation le long de guides d'onde au goniomètre à cause du couplage du bruit dans les sous-circuits de spirales adjacents, a) données sur la plaque P02 (TE) où la puissance du dernier point de mesure est surestimée. Dans ce graphique, les pertes sont calculées en effectuant une régression linéaire utilisant la valeur médiane du signal mesurée en sortie de chaque spirale de différente longueur. Généralement, les pertes sont calculées individuellement pour chaque *die* et la médiane est effectuée sur l'ensemble des pertes mesurées, b) photo au microscope montrant les points d'émission (PE) des spirales de 20 et 30 mm alors que le signal laser est uniquement injecté dans la spirale de 30 mm.

Dans le cas de la plaque P02, les pertes médianes de propagation (calculées par la médiane des régressions linéaires pour chaque *die*) est de -12.8 dB/cm en utilisant 4 points de mesure (i.e. l'ensemble des données des spirales de différentes longueur). En utilisant seulement les trois premiers points, les pertes médianes descendent à -16.6 dB/cm ($\sigma = 0.35$ dB/cm). Cette dernière valeur se rapproche de celles obtenues au *prober* (-17.2 dB/cm en utilisant 3 points de mesure). Les mesures du goniomètre sous-estiment donc les pertes de propagation. Toutefois, l'analyse des données au goniomètre permet de valider des résultats obtenus au *prober*.

C. Guide courbe

Les données de pertes de courbe à rayon constant peuvent être utilisées pour calculer les pertes de courbure sinusoidales. Un exemple est donné à la **Figure A-4** pour un r_{min} de 5 μm . A la **Figure A-4 (f)** on compare les résultats des pertes de courbure en fonction de r_{min} pour les courbe à rayon constant et de forme sinusoidale.

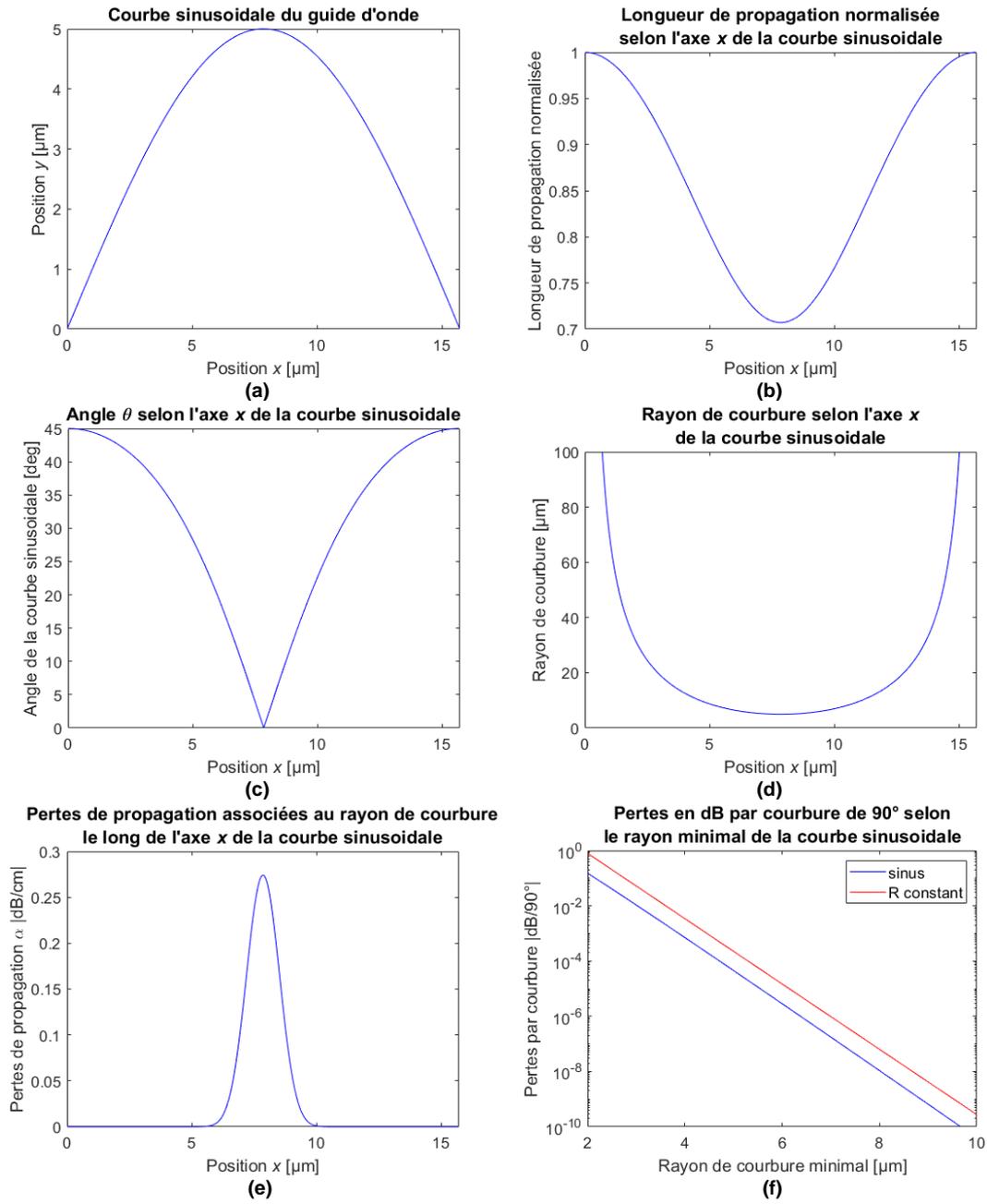


Figure A-4 Etude des guides courbés selon une fonction sinusoïdale, a) courbe sinusoïdale de 0 à π pour $r_{min} = 5 \mu\text{m}$, b) longueur de propagation normalisée le long de la courbe en (a), c) angle de la courbe sinusoïdale, d) rayon de courbure du sinus (minimum à 5 μm), e) pertes en dB/cm le long de la fonction sinusoïdale. Celles-ci sont déterminées en fonction de son rayon de courbure le long de l'axe x . Finalement, en f) comparaison des pertes de courbure entre des courbes sinusoïdales et des courbes à rayon constant.

D. Réseaux de diffraction

Les détails des simulations 2D FDTD RSoft pour dimensionner les réseaux de diffraction du projet sont présentés dans cette section de l'annexe.

A la **Figure A-5**, l'effet du facteur de remplissage du réseau est étudié pour un pas constant de 400 nm et une profondeur de gravure complète.

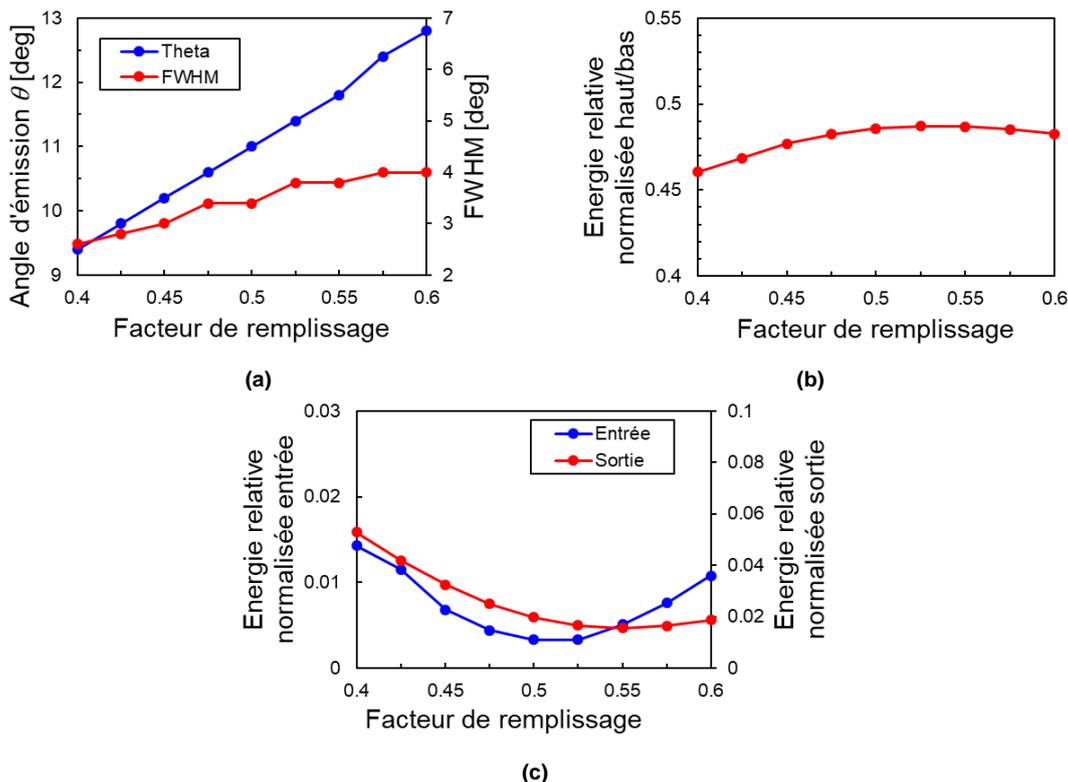


Figure A-5 Incidence du facteur de remplissage du réseau (pas 400 nm et 25 périodes) sur a) l'angle d'émission et le FWHM, b) l'énergie émise vers l'œil ou l'extérieur du projecteur, c) l'énergie réfléchie à l'entrée du guide ou transmise à la fin du réseau.

Le paramètre du facteur de remplissage a un impact moyen sur l'angle d'émission. Toutefois, son impact est très limité sur le FWHM et les facteurs énergétiques. Un facteur de remplissage moyen de 0.5 est donc utilisé pour la suite des simulations. Ce facteur permet également de limiter la résolution minimale du réseau (CDmin) pour faciliter sa fabrication en salle blanche et conserver un CDmin au-dessus de notre limite de résolution (~ 150 nm). Par exemple, si un facteur de remplissage de 0.6 est utilisé, alors la portion de SiO₂ entre chaque pas est inférieure à 200 nm, soit 160 nm. Cela demande une résolution de gravure plus élevée qu'avec un facteur de remplissage de 0.5 où la plus petite dimension du réseau est de 200 nm.

On remarque également à la **Figure A-5 (b)** que l'énergie émise vers le haut ou le bas sont identiques car le réseau est symétrique.

On considère pour le moment un BOX « infini » dans les simulations. Dans notre cas, ce terme implique que le BOX remplit l'espace de simulation sous le réseau de diffraction (2 μ m de profondeur) et qu'il n'y a pas de couche de Si sous ce BOX. Ainsi, il n'y a pas de réflexion du faisceau émit par le réseau sur le substrat de Si dans les simulations initiales.

En conservant un facteur de remplissage de 0.5 et un réseau constitué de 25 périodes, nous avons étudié l'effet du pas du réseau sur le comportement de ce dernier, tel que présenté à la **Figure A-6**.

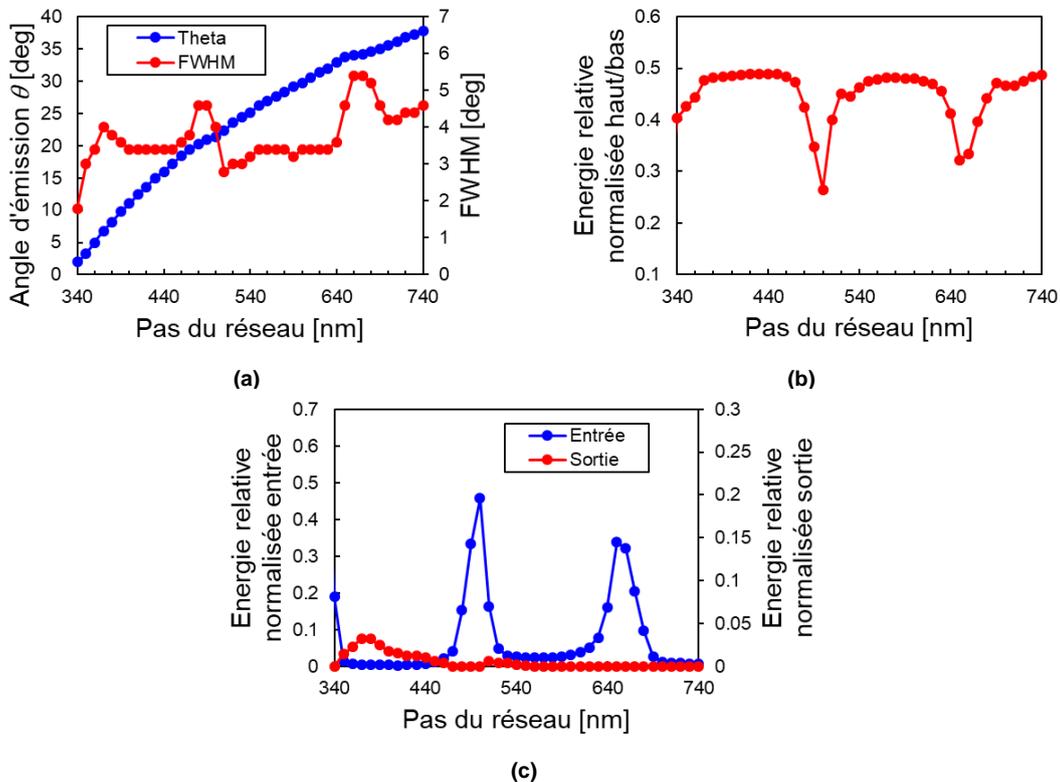


Figure A-6 Incidence du pas du réseau de diffraction (facteur de remplissage de 0.5 et 25 périodes) sur a) l'angle d'émission et le FWHM, b) l'énergie émise vers l'œil ou l'extérieur du projecteur, c) l'énergie réfléchi à l'entrée du guide ou transmise à la fin du réseau.

On observe que le pas a une grande incidence sur l'angle d'émission du réseau. L'angle d'émission augmente avec le pas du réseau. L'élargissement du faisceau est généralement compris entre 3 et 6 degrés lorsque le pas est supérieur à 350 nm.

On remarque également à la **Figure A-6 (a)** et **(b)** que pour des valeurs de pas précises (500 nm et 650 nm) il y a une forte réflexion du faisceau vers l'entrée du guide (et donc une grande réduction de l'énergie émise à l'extérieur du réseau vers le bas ou le haut). Ces réflexions sont dues à des réflexions de Bragg liées à la longueur d'onde utilisée.

Le pas choisi est donc de 400 nm afin d'éviter les zones de réflexion de Bragg. De plus, un pas de 400 nm permet d'injecter ou d'extraire un faisceau au réseau de diffraction à 11 ° par rapport à la normale (~ 16 ° dans l'air). Cela permet d'éviter les problèmes de réflexion de faisceaux entre la fibre d'injection et les coupleurs par réseau ou lors de l'extraction de signal par un réseau de sortie.

La **Figure A-7** présente l'étude du réseau de diffraction pour un facteur de remplissage de 0.5 et un pas de 400 nm en fonction du nombre de périodes.

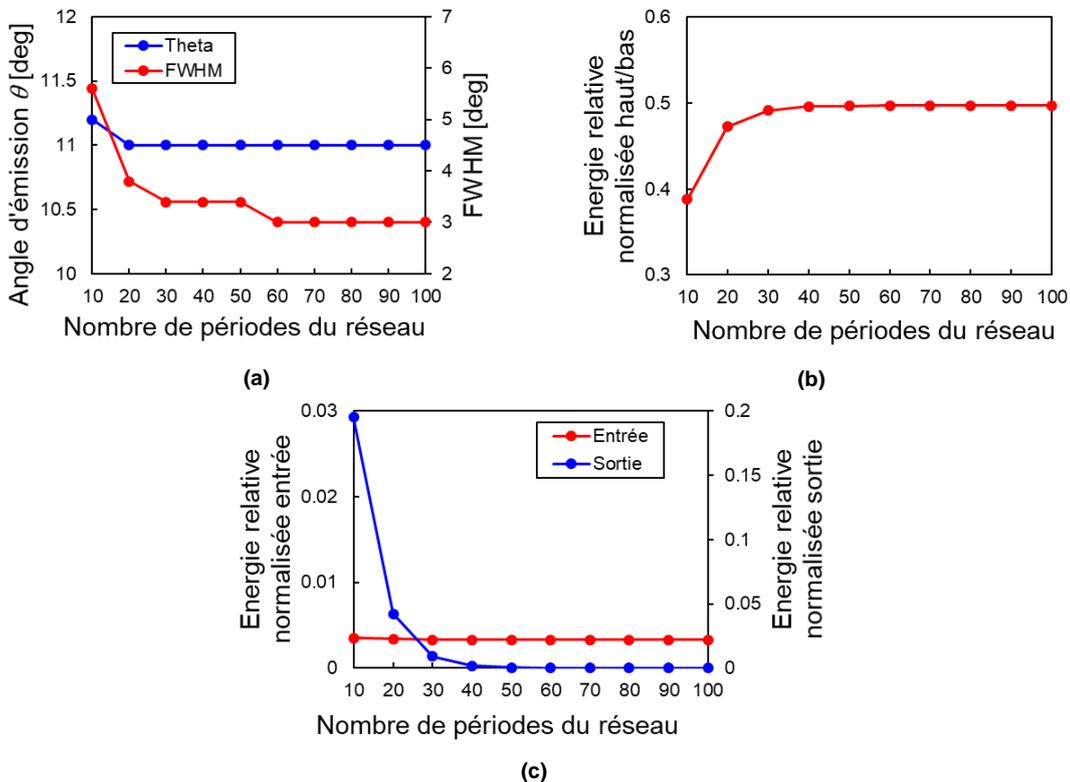


Figure A-7 Incidence du nombre de périodes du réseau (facteur de remplissage de 0.5 et pas de 400 nm) sur a) l'angle d'émission et le FWHM, b) l'énergie émise vers l'œil ou l'extérieur du projecteur, c) l'énergie réfléchiée à l'entrée du guide ou transmise à la fin du réseau.

Le nombre de périodes a un impact sur l'ensemble des facteurs du réseau seulement lorsque le nombre de périodes est faible (< 30 périodes). Ensuite, les facteurs cessent de varier (saturation). On remarque notamment à la **Figure A-7 (b)** que l'énergie extraite du réseau augmente avec le nombre de périodes. Après environ 30 périodes, presque toute l'énergie est extraite du réseau et est émise vers le haut et le bas de celui-ci. Augmenter le nombre de période au-delà est inutile puisqu'aucune lumière n'atteint la fin du réseau de diffraction, tel que montré à la **Figure A-7 (c)**. L'angle d'émission pour un réseau de 30 périodes est quasiment identique aux simulations précédentes à 25 périodes (i.e. ~ 11°).

La suite des simulations conserve un réseau à 25 périodes.

A la **Figure A-8**, l'effet de la profondeur de gravure du réseau est étudié. Jusqu'ici, on considérait un réseau de diffraction était complètement gravé (i.e. réseau symétrique).

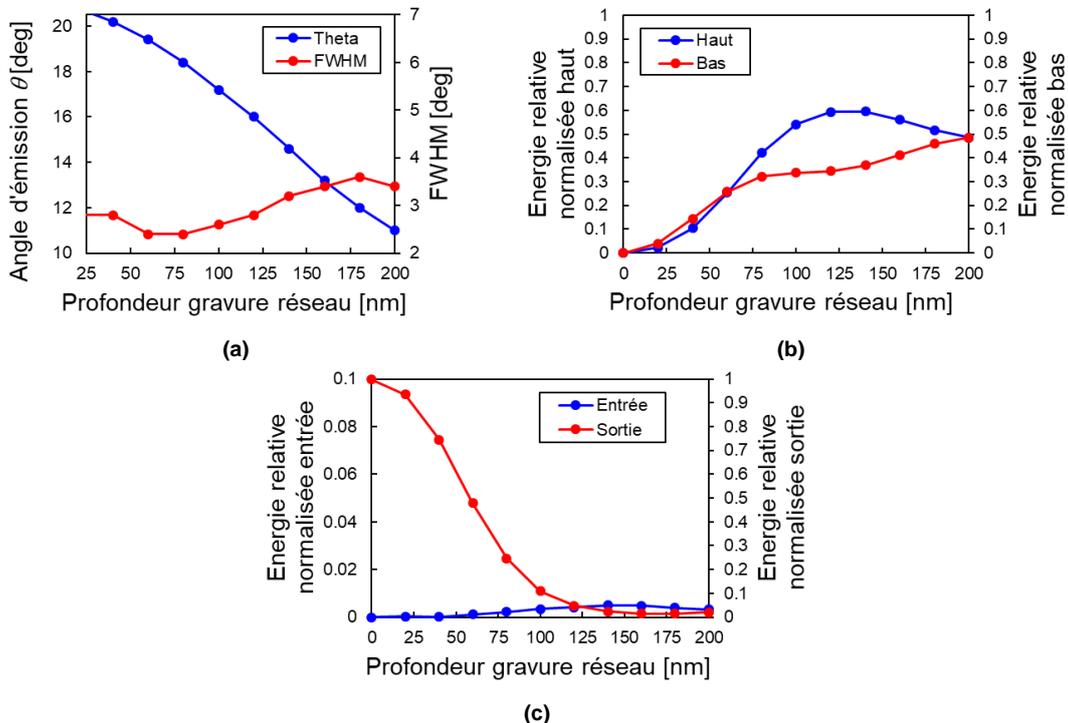


Figure A-8 Incidence de la profondeur de gravure du réseau (facteur de remplissage de 0.5, pas de 400 nm et 25 périodes) sur a) l'angle d'émission et le FWHM, b) l'énergie émise vers l'œil ou l'extérieur du projecteur, c) l'énergie réfléchiée à l'entrée du guide ou transmise à la fin du réseau.

La profondeur de gravure a un grand impact sur l'ensemble des facteurs étudiés. Lorsque la profondeur de gravure est faible, elle augmente fortement l'angle d'émission. Une faible profondeur de gravure permet également de réduire fortement la proportion d'énergie extraite du réseau. Par exemple, pour une gravure de 20 nm de profondeur, seulement 5% de l'énergie est extraite du réseau (Σ énergie haut et bas). Pour maximiser l'énergie extraite, il faut maximiser la profondeur de gravure. Inversement, pour minimiser l'énergie extraite la profondeur de gravure doit être minimisée.

On peut remarquer à la **Figure A-8 (b)** que lorsque la profondeur de gravure est faible (< 80 nm) ou très élevée (> 180 nm), la proportion d'énergie extraite par le réseau est approximativement symétrique entre le haut et le bas du réseau. Toutefois, la différence de proportion d'énergie extraite entre le haut et le bas du réseau s'accroît fortement pour des valeurs moyennes de gravure (80-180 nm de profondeur), là où le réseau est le moins symétrique.

Dans les simulations effectuées jusqu'ici, il y avait une couche de SiO₂ d'épaisseur infinie (BOX) sous le guide d'onde. Toutefois, en réalité la couche de SiO₂ n'est pas infinie et se trouve par-dessus une couche de Si qui forme la base du *wafers*. Cette dernière réfléchit vers le haut une partie du signal extrait vers le bas par le réseau de diffraction. L'effet de la variation d'épaisseur de SiO₂ sous le guide (BOX) sur l'extraction de lumière par le réseau d'extraction est présentée à la **Figure A-9**. Dans l'étude du BOX, le réseau est complètement gravé.

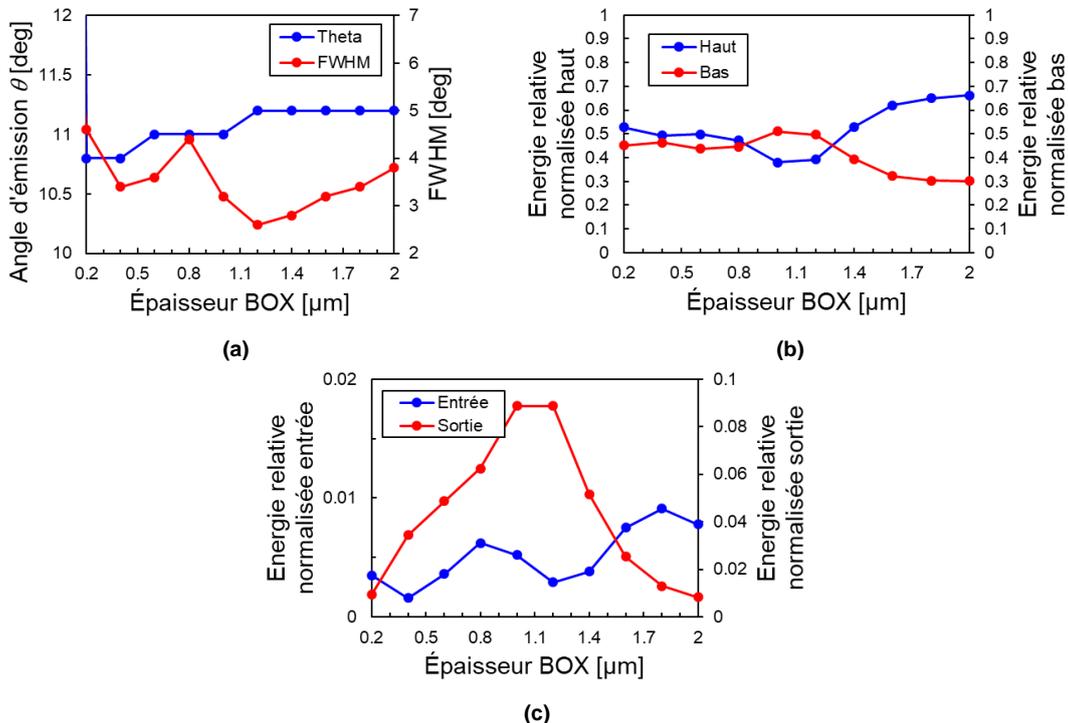


Figure A-9 Incidence de l'épaisseur du BOX sur le réseau (facteur de remplissage de 0.5, pas de 400 nm, 25 périodes et gravure complète) sur a) l'angle d'émission et le FWHM, b) l'énergie émise vers l'œil ou l'extérieur du projecteur, c) l'énergie réfléchi à l'entrée du guide ou transmise à la fin du réseau.

L'épaisseur du BOX n'a presque aucun impact angulairement (thêta et FWHM). Elle a toutefois un grand impact sur l'énergie extraite. Contrairement aux autres paramètres étudiés avant, les énergies émises vers le haut et le bas suivent des courbes symétriques qui alternent en fonction de l'épaisseur du BOX, tel que présenté à la **Figure A-9 (b)**. Pour maximiser la quantité de lumière envoyée vers l'œil (i.e. vers le haut dans le référentiel du réseau), il faudrait une épaisseur de BOX de 2 μm. On remarque également que plus l'épaisseur du BOX est importante, plus les valeurs des maximums et minimums entre les courbes sont distants. L'épaisseur du BOX a été limitée à 2 μm pour rester compatible avec la fabrication de circuits photoniques du projet greffé à notre masque de photolithographie (équipe d'un autre laboratoire du CEA-LETI).

Si le BOX est trop mince (inférieur à 400 nm dans notre cas), il y a une forte interaction entre la couche de Si avec la lumière du guide avant même que le faisceau guidé atteigne le réseau d'extraction. En effet, le faisceau guidé n'est pas complètement confiné : la partie qui déborde du guide en temps normal (champ évanescent) fuit du guide vers la couche de Si lorsqu'ils sont trop proches.

Dans le cas du dispositif final de projection rétinienne, le substrat de Si est remplacé par un substrat transparent. L'épaisseur d'oxyde sous le circuit (BOX) n'aura donc pas d'incidence sur la directivité d'émission du réseau.

