



HAL
open science

**Matériaux et composants à effets magnéto-optiques :
approche composite à base de nanoparticules
magnétiques**

François Royer

► **To cite this version:**

François Royer. Matériaux et composants à effets magnéto-optiques : approche composite à base de nanoparticules magnétiques . Optique [physics.optics]. Université Jean Monnet, Saint-Étienne (42), 2013. tel-01386674

HAL Id: tel-01386674

<https://ujm.hal.science/tel-01386674>

Submitted on 24 Oct 2016

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.



Rapport d'Habilitation à Diriger les Recherches

Matériaux et composants à effets magnéto-optiques : approche composite à base de nanoparticules magnétiques

FRANÇOIS ROYER – le 12 décembre 2013

Sous la direction de Jean Jacques Rousseau

Laboratoire Telecom Claude Chappe, EA 3523

Jury

- | | |
|---------------|--|
| C. AMRA | DR CNRS, Institut Fresnel, Marseille. |
| R. BAETS | Professeur, Université de Ghent, Belgique. |
| B. CRETIN | Professeur, ENSMM, Besançon. |
| J.E. BROQUIN | Professeur, Institut National Polytechnique, Grenoble. |
| F. PIGEON | Professeur, Université Jean Monnet, St Etienne. |
| J.J. ROUSSEAU | Professeur, Université Jean Monnet, St Etienne. |



TABLE DES MATIERES

Table des Matières	2
Introduction.....	5
1. Parcours et Activités pédagogiques	8
1.1. Parcours et domaine d'activités	8
1.2. Approche pratique.....	10
1.3. Kit électronique	11
1.4. Missions d'enseignement au Tchad.....	13
1.5. Conclusion.....	14
2. Matériaux et composants magnéto-optiques : contexte scientifique	15
2.1. Effets magnéto-optiques	16
2.1.1. Espace libre.....	17
2.1.2. Configuration guidée	21
2.2. Isolateur optique intégré.....	25
2.3. Matériaux MO pour l'intégration	30
2.4. Positionnement des travaux : approche composite	32
3. Matériau composite magnéto-optique	34
3.1. Matériau composite	34
3.1.1. Nanoparticules en suspension	35
3.1.2. Elaboration sol-gel.....	37
3.2. Propriétés du matériau en couches minces	41
3.2.1. Couches minces guidantes	41

3.2.2.	Biréfringence.....	42
3.2.3.	Potentialité magnéto-optique	45
3.2.4.	Hystérésis magnétique.....	47
3.3.	Etudes prospectives d'autres particules.....	52
3.3.1.	Nanoparticules de ferrite de cobalt.....	52
3.3.2.	Nanoparticules de YIG	54
3.3.3.	Magnétosomes.....	57
3.4.	Bilan.....	60
4.	Convertisseurs de mode hybrides sur verre	61
4.1.	Objectifs et intérêts	62
4.2.	Etude comportementale	63
4.3.	Mise en œuvre expérimentale	68
4.3.1.	Elaboration	68
4.3.2.	Moyens de caractérisation expérimentaux.....	69
4.4.	Résultats.....	72
4.4.1.	Biréfringence.....	73
4.4.2.	Conversion de mode.....	74
4.4.3.	Pertes	76
4.5.	Bilan	77
5.	Cristaux magnéto-photoniques par voie sol-gel.....	79
5.1.	Objectifs et intérêts	80
5.2.	Etude comportementale	81
5.3.	Mise en œuvre expérimentale	83
5.3.1.	Elaboration	83
5.3.2.	Taux de dopage	85
5.3.3.	Moyens de caractérisation.....	86
5.4.	Résultats.....	88
5.5.	Bilan.....	91
6.	Perspectives de projets futurs	92
6.1.	Analyse.....	92
6.2.	Configuration pour le prochain contrat quinquennal.....	94

6.3.	Projet scientifique	96
6.3.1.	Composants magnéto-optiques intégrés	97
6.3.2.	Structurations 1D/2D de matériaux MO	100
6.3.3.	Magnétoplasmonique.....	102
6.4.	Bilan.....	104
	Conclusion	105
	Bibliographie	106
7.	Dossier Administratif.....	115
7.1.	CURRICULUM VITAE	115
7.2.	ENSEIGNEMENT : FAITS MARQUANTS ET RESPONSABILITES	115
7.3.	ENCADREMENTS	116
7.4.	PROJETS, RESPONSABILITES ET ANIMATION SCIENTIFIQUE.....	117
7.5.	PRODUCTION SCIENTIFIQUE.....	119
7.5.1.	Articles de revues à comité de lecture	119
7.5.2.	Communications Internationales	121
7.5.3.	Communications Nationales	122

INTRODUCTION

En 2001, dans une demande de bourse de thèse, j'avais expliqué que « l'optique physique » et le « paramagnétisme des matériaux » étaient les deux domaines de la physique qui m'avaient le plus intéressé au cours de ma formation de premier cycle. Je n'avais pas dû être très convaincant puisque la bourse ne m'avait pas été accordée à l'époque. Néanmoins, ce devait être vrai puisque mes activités de recherche se rapportent aujourd'hui encore à ces domaines scientifiques. Ainsi ce rapport d'habilitation à diriger les recherches s'intitule « Matériaux et composants à effets magnéto-optiques : approche composite à base de nanoparticules magnétiques ». Dans ce document, je vais m'attacher à décrire les travaux de recherche menés depuis la fin de ma thèse en juillet 2004.

Les effets magnéto-optiques présentent un intérêt fondamental pour les applications où un comportement non-réciproque est requis. En effet, la présence d'une aimantation statique au sein d'un matériau impose une symétrie de type axial, qui rend la propagation des ondes sensible au sens de parcours dans le matériau. Ainsi, en utilisant un matériau magnéto-optique, on peut construire un isolateur optique, élément absolument indispensable au bon fonctionnement des lasers ou amplificateurs, qui laisse passer la lumière dans une direction et la bloque dans l'autre, empêchant par la même les réflexions parasites de le perturber. Mais à l'heure où tous les composants optiques d'une chaîne de transmission d'informations apparaissent sur des plateformes de circuits optiques intégrés, l'isolateur manque à l'appel. C'est l'intégration du matériau magnéto-optique sur une de ces plateformes qui représente un verrou technologique que personne n'a réussi à lever de façon entièrement satisfaisante depuis les premiers essais dans les années 70. Ceci est principalement dû au fait que pour être cristallisés et avoir une activité magnéto-optique, les matériaux magnétiques doivent subir un traitement thermique de forte température ($\sim 800^{\circ}\text{C}$).

Les travaux présentés dans ce document se rapportent à cette problématique par la mise en œuvre d'une approche « composite » pour la réalisation d'un matériau magnéto-optique candidat à l'intégration. Pour cela, des nanoparticules magnétiques déjà cristallisées sont insérées dans une préparation liquide de précurseurs de silice qui est ensuite déposée en couche mince sur un substrat de verre. Le traitement thermique utilisé pour finaliser le matériau dopé est de faible température ($\sim 100^{\circ}\text{C}$), ce qui assure une bonne compatibilité avec les substrats utilisés en optique intégrée. L'ensemble des travaux

a été mené au sein du laboratoire Telecom Claude Chappe, équipe d'accueil 3523 de l'Université Jean Monnet de St Etienne. Au sein de ce laboratoire, l'axe « composants passifs » travaille à l'élaboration de composants optiques et hyperfréquences dont la spécificité est d'utiliser un cœur magnétique qui assure soit la non-réciprocité (circulateur, isolateur), soit l'augmentation des effets inductifs (inductance, résonateur). La majorité des développements sont faits avec des matériaux magnétiques « massifs » utilisés comme substrat ou déposés en couche mince par pulvérisation cathodique, sauf pour les applications optiques où l'approche composite est privilégiée. Mais vu les propriétés démontrées par le composite, il est de plus en plus envisagé de l'utiliser pour les applications radio et hyperfréquences.

Les nanoparticules magnétiques utilisées pour l'élaboration du composite sont synthétisées au laboratoire Physicochimie Electrolyte, Colloïdes et Sciences Analytiques (PECSA), UMR 7195 de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris. Il s'agit ici d'une collaboration « historique » et très fructueuse qui nous permet d'avoir des nanoparticules d'excellente qualité et totalement adaptées à notre principe d'élaboration. La grande majorité des articles publiés depuis 2004 sont ainsi co-signés par S. Neveu, chimiste et Maître de conférences à PECSA, ce qui montre la vivacité de cette collaboration. Pour intégrer le matériau magnéto-optique composite aux composants d'optique intégrée, une nouvelle collaboration a été initiée en 2008 avec l'Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique (IMEP-LAHC), UMR 5130 des Universités de Grenoble. Elle s'est structurée assez rapidement autour de deux projets de thèses financés par la Région Rhône-Alpes autour des convertisseurs de modes sur verre. Plus globalement, ces deux collaborations illustrent le caractère pluridisciplinaire des travaux que je présente ici.

Avant de véritablement exposer les travaux mentionnés dans les paragraphes précédents, j'ai souhaité détailler quelques points particuliers qui me semblent importants dans mes activités pédagogiques. Ce sera l'objet du premier chapitre.

Dans le chapitre 2, je présenterai le contexte scientifique dans lequel se sont effectuées mes activités de recherche. Il s'agit des effets magnéto-optiques mis en œuvre en espace libre ou guidé, puis leur application aux isolateurs optiques. Une revue des matériaux magnéto-optiques permettra de positionner les travaux de ce document.

Le chapitre 3 est consacré aux développements menés depuis 2004 sur le matériau composite. Les propriétés intrinsèques des nanoparticules magnétiques et la méthode d'élaboration du matériau dopé par ces particules seront tout d'abord présentées. Puis, je détaillerai les caractéristiques optiques et magnéto-optiques des couches minces élaborées à partir de ce matériau. Enfin, des travaux plus amont menés sur d'autres nanoparticules seront mentionnés.

L'utilisation du matériau composite magnéto-optique au sein des convertisseurs de modes TE/TM sur verre fera l'objet du chapitre 4. Après avoir donné les objectifs et les

intérêts de ces structures, je présenterai une étude comportementale des convertisseurs hybrides. Puis, les résultats obtenus sur ces structures seront explicités.

Le chapitre 5 sera consacré aux travaux relatifs à la réalisation de cristaux magnéto-photoniques par voie sol-gel. Un bref état de l'art sera donné pour rappeler l'intérêt suscité par ces cristaux en vue de l'exaltation des effets magnéto-optiques. La méthode mise au point au laboratoire pour les élaborer sera présentée, avant de détailler les structures obtenues et les effets associés.

Enfin, le chapitre 6 sera consacré à la feuille de route que je me fixe pour les années à venir. Sur la base d'une analyse des travaux menés jusqu'ici et du positionnement de l'équipe, je décrirai les travaux qu'il me paraît pertinent d'arrêter, de poursuivre et surtout de lancer.

1. PARCOURS ET ACTIVITES PEDAGOGIQUES

L'objectif de ce chapitre est de revenir sur le parcours pédagogique suivi depuis la soutenance de thèse en 2004. Il ne s'agit pas de détailler l'ensemble des activités, mais de focaliser le propos sur des points plus spécifiques qui, en plus des expériences « classiques » d'un enseignant, ont forgé plus particulièrement mon expérience d'enseignant, et plus généralement de scientifique et chercheur.

1.1. Parcours et domaine d'activités

Diplôme de doctorat en poche, ma carrière d'enseignant-chercheur débute l'année 2004/2005 par un poste d'ATER à temps complet au département Mesures Physiques de l'IUT de St Etienne (voir Figure 1.1). Il s'agit du département où j'avais effectué le monitorat durant mes années de doctorat. Titulaire de l'agrégation de Physique Appliquée depuis l'année 2000, j'ai exercé la fonction de PRAG au sein de la même structure en 2005/2006. Puis, souhaitant vivement poursuivre une activité de recherche, et devant la difficulté de le faire en tant que PRAG, je me suis réorienté dès septembre 2006 vers un poste de Maître de Conférences à Telecom Saint Etienne (TSE, ex : ISTASE), école d'ingénieurs interne à l'Université Jean Monnet (UJM). Au cours de toutes ces années, mes activités de recherche ont été menées au sein du laboratoire Telecom Claude Chappe (LT2C, ex-DIOM), équipe d'accueil de l'UJM.

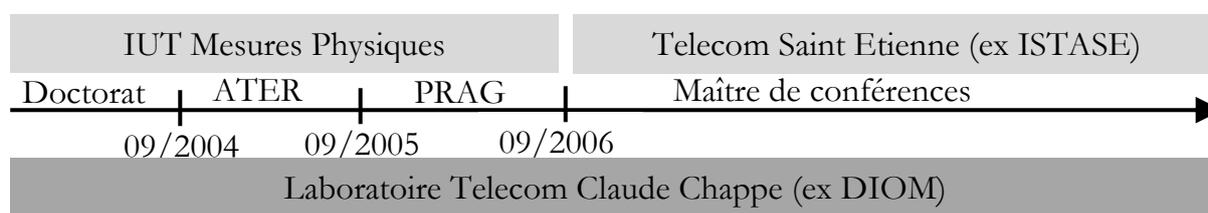


Figure 1.1 : Représentation chronologique des postes occupés et des composantes associées depuis la fin de thèse.

Le Tableau 1.1 donne une vue synthétique des différentes activités pédagogiques menées au cours de ces années, en termes de types d'activités, de niveaux et de domaines scientifiques. On peut tout d'abord noter la complémentarité des domaines scientifiques abordés dans les deux composantes : Physique /Acquisition/Traitement du signal à l'IUT

et Electronique/Automatique/Optique à TSE. Globalement cela correspond à la formation que j'ai suivie avec une agrégation de physique appliquée et un doctorat en optique.

De même, l'enseignement dans ces deux structures m'a permis d'intervenir majoritairement en premier cycle pendant les années d'ATER et PRAG à l'IUT, puis en second cycle à TSE, ce qui donne une vue complète des niveaux d'enseignement dans le supérieur. En terme de public, et ce quelle que soit la structure, une partie non-négligeable des enseignements a été dispensée à des alternants ou apprentis : licences professionnelles en alternance « Acoustique et Vibrations » ou « Techniques du vide et matériaux » en IUT MP, puis en filière ingénieurs par apprentissage « Optique et Vision Industrielles » à TSE. Il est indispensable pour enseigner dans ces formations de développer une approche pratique très forte, en donnant beaucoup de sens « physique » aux phénomènes décrits, tout en faisant preuve de rigueur pour les analyser et modéliser. Cela est d'autant plus vrai pour les formations à destination des professionnels, mais pas forcément le cas pour les élèves ingénieurs qui vont plus s'appuyer sur une approche « mathématique » par équations. Au-delà des activités classiques d'enseignement, à savoir « cours/TD/TP, » j'ai pu participer à l'encadrements de nombreux projets et suivre des étudiants en stage ou en cursus d'alternance en entreprises.

	Type d'activités / Niveaux	Domaines scientifiques
TSE	Cours, TD, TP en L3, M1 et M2	Electricité générale
	Encadrement de projets	Electronique / Communications
	Interventions en filière apprentissage	Automatique / Robotique
	Tuteur enseignant d'apprentis	Electronique de puissance
	Suivis de stage	Optique ondulatoire et guidée
IUT MP	Cours, TD, TP, en L1 et L2	Electricité / Electronique
	Cours et TP en licence Pro (L3)	Physique générale
	Tuteur enseignant d'alternants	Capteurs et conditionneurs
	Cours et TP en formation continue	Acquisition du signal
	Suivis de stage	Traitement du Signal

Tableau 1.1 Synthèse des activités pédagogiques en termes de niveaux, types d'activités et domaines scientifiques.

Tout cela constitue un ensemble assez riche et diverse d'expériences d'enseignant. Cet ensemble est, d'ailleurs, complété par les interventions effectuées au Tchad et qui seront développées plus en détail dans le paragraphe 1.4. Ayant accumulé cette expérience de base, il me semble indispensable désormais de chercher à améliorer la qualité de ces enseignements. Le paragraphe 1.3 détaillera ainsi une nouvelle orientation suivie pour l'enseignement de l'électronique en première année d'école d'ingénieur. Cependant, il paraît opportun, dans un premier temps, d'insister sur les séances de travaux pratiques développées au cours de ce parcours.

1.2. Approche pratique

Une des constantes lors de ces années d'enseignement a été de toujours participer à l'encadrement de séances de Travaux Pratiques (TP) ou de projets d'application. En termes d'heures, cela a toujours constitué au moins la moitié de mon service. Cela est souvent la « norme » quand on débute dans le métier, mais j'ai toujours fait en sorte de garder cet équilibre au cours des années, car cela constitue le meilleur moyen, à mes yeux, pour appréhender totalement une matière, et construire des blocs de cours/TD/TP cohérents. Ainsi, avec les différents collègues côtoyés au cours des années, j'ai participé à la mise en place de nombreuses séances de Travaux Pratiques. Le Tableau 1.2 donne une liste exhaustive des sujets sur lesquels je me suis tout particulièrement investi, avec la conception des manipulations et rédaction du sujet.

	Niveau	Sujet du TP et remarques
IUT MP	L1	Système électromécanique de levage
		Thermographie Infra-Rouge
		Echangeur Thermique
		Thermocouples
TSE	L3	Introduction à l'analyse spectrale (avec Analyseur de spectres)
		Chaîne de transmission d'informations (PSoC)
		Filtres <i>Analogique, Numérique et Capacités Commutées</i> , (carte PSoC/TSE)
		Montages à AOP <i>Amplificateur, Comparateur, Générateur</i> , (carte PSOC)
		<i>Projet</i> : Transmission audio par fibre avec modulation Delta/sigma
		<i>Projet</i> : Consommation d'un système embarqué : Etude du mode veille
	M1	Asservissement de vitesse (carte d'acquisition TR DSPACE/Simulink)
		Asservissement numérique de position/ Réponse pile (DSPACE)
		Correction PID, avance de phase (Matlab)
		Coupleur directionnel en optique intégrée (Simulation BPM)
		Jonction Y et guide « taper » en optique intégrée (Simulation BPM)
		Transmission par fibre optique : <i>Atténuation, Vitesse, Dispersion</i>
	M2	Etude de la consommation d'un micro-hacheur Buck (Altium Spice)
	Asservissement de la tension d'un hacheur buck	

Tableau 1.2 Liste des sujets de Travaux Pratiques mis en place à l'IUT Mesures Physiques(IUT MP) et à Telecom Saint Etienne (TSE).

On retrouve, comme précédemment une certaine diversité des thématiques abordées couvrant la physique générale, l'électronique générale, l'électronique de puissance, l'automatique et l'optique intégrée. Certains sujets ont nécessité peu de nouveaux matériels, mais d'autres ont été le fruit d'une importante réflexion avant l'achat de matériel qui soit totalement pertinent. Il s'agit notamment des TP d'asservissement pour lesquels des cartes d'acquisition temps réel de marque DSpace ont été choisies car elles permettent un contrôle direct des applications depuis Simulink/Matlab qui est le

logiciel de référence à TSE en matière de traitement des données. Cela permet aussi d'assurer la continuité de logiciel entre les TP et les TD d'applications faits sous Matlab.

Parmi les différentes séries de TP où j'ai eu à intervenir, la plus conséquente est une série de TP d'électronique en première année de TSE. Nous avons, pour cette série, engagé une évolution notable des pratiques pédagogiques. C'est l'objet de la partie suivante.

1.3. Kit électronique

Au premier semestre (S5) de formation à Telecom Saint Etienne, le bloc d'électronique de tronc commun contient 10 séances de travaux pratiques de 3H. Il a pour objectif de donner aux étudiants les compétences de base en fonctions et signaux électroniques : amplification, comparaison, filtrage, conversion A/N, échantillonnage et communications. La promotion comptant en moyenne 110 étudiants, elle est divisée en 5 groupes pour les Travaux Pratiques qui sont encadrés par 2 enseignants. Cela induit une diversité forte des profils étudiants entre ceux qui choisiront un parcours électronique en 2^{ème} année et qui vont plutôt s'impliquer dans les séances, et les autres qui ne trouvent pas d'attrait particulier pour la matière et qui « subissent » le module. Nous avons, au fil des années, constaté avec mes collègues la difficulté globale des étudiants à s'impliquer dans les séances, et nous avons attribué cela à plusieurs facteurs :

- La désaffection assez générale pour les filières « électronique » [LAF08], avec une nette orientation de la formation vers des métiers à dominante réseaux ou informatique.
- Une déconnexion trop forte entre l'environnement technologique quotidien des étudiants (mobile, portable, tablette, agenda électronique, communications sans fil), et les composants discrets étudiés en TP : diode, AOP, transistors...
- Le fait que l'apprentissage pratique d'électronique soit limité dans le temps aux seules heures de TP encadrées, *ie* « le TP se termine quand on passe la porte de la salle ». Cela n'est pas le cas par exemple dans les modules informatiques, où l'étudiant peut continuer à travailler en autonomie en salle informatique ou chez lui sur son propre ordinateur.

Ainsi, pour remédier à ces difficultés, l'enseignement de l'électronique a été profondément remanié à partir de 2009. Tout d'abord, par une approche transversale des différents domaines de la discipline (analogique, numérique, programmé) nous avons mis en place des travaux pratiques basés sur l'utilisation d'une carte unique. Cette carte, développée en interne et basée sur un composant spécifique programmable (le PSoC de Cypress), intègre toutes les technologies modernes (voir Figure 1.2). Elle permet aux futurs ingénieurs de construire peu à peu et d'étudier leur propre système embarqué communicant. Dans un deuxième temps nous avons fourni, sous la forme d'un prêt, à chaque binôme d'étudiants un kit constitué d'une de ces cartes ainsi qu'un oscilloscope/générateur USB pour effectuer les mesures adéquates. Nous avons pour cela

reçu en 2010 le soutien de l'UJM au travers d'un programme Blanc «formation» à hauteur de 24k€. L'ensemble de ces deux outils permet aux étudiants, à partir d'un simple PC, de construire et étudier leur système en toute autonomie. L'objectif était d'appliquer une nouvelle pédagogie d'apprentissage de l'électronique [LON08], où chaque étudiant peut s'approprier les spécificités de l'électronique moderne en travaillant sur son propre matériel. Au-delà de cet objectif pédagogique il s'agissait également d'affirmer, par ces innovations, le positionnement de l'école sur le domaine des systèmes embarqués.



Figure 1.2 : Photo de la carte électronique développée à TSE. Le PSOC est un composant 28 pattes visible verticalement au centre. Sont visibles également un afficheur LCD, une connexion RS232, une liaison (RX/TX) fibre optique, des accès BNC. Moins visibles, on retrouve également une connexion à émetteur XBee, amplificateur audio, bus I2C, SPI.....

Après plusieurs années de mise en place de ces kits auprès des promotions d'étudiants, nous avons pu constater certains progrès. Il ne s'agit pas d'affirmer que toute la promotion souhaite désormais faire de l'électronique, mais plutôt de remarquer que cela fait naître un intérêt nouveau chez certains. En effet, l'appropriation des notions passe mieux quand l'étudiant peut reprendre les manipulations en autonomie, ou quand il peut construire rapidement son propre système lors de projet. Au final, le nombre d'étudiants à choisir un parcours électronique à TSE a eu plutôt tendance à remonter ces trois dernières années.

Pour aller au bout de cette démarche, nous avons souhaité modifier toute l'architecture du module en supprimant les cours et TD, et en mettant en place un apprentissage par projets. En se basant sur une formation à l'apprentissage par problème suivie en 2011, nous mettons en place au premier semestre 2014, un enseignement basé sur l'étude et la réalisation de deux projets/problems : l'un mené avec un outil de simulation Spice, et l'autre sur la mise en œuvre d'une communication audio sur les kits.

L'ensemble de ce travail est réalisé avec mes collègues de TSE, Thierry Bru (PRAG) et Gilbert Varrenne (Ingénieurs d'Etudes) qui sont très actifs sur le sujet. Nous imaginons ensuite de valoriser et partager cette expérience au travers d'une publication dans le Bulletin de l'Union des Physiciens et/ou dans le colloque biannuel « Questions de Pédagogie dans l'Enseignement Supérieur ».

1.4. Missions d'enseignement au Tchad

Depuis ma première mission d'enseignement effectuée au cours de ma thèse en 2003, j'ai toujours gardé contact avec le Tchad par la présence régulière de plusieurs doctorants Tchadiens au laboratoire, mais aussi et surtout au travers de missions d'enseignements sur place.

Ce fut tout d'abord le cas en 2007 avec une mission à l'Institut Universitaire des Sciences et Techniques d'Abéché dans l'Est du pays. Il s'agissait, à partir de matériels achetés et acheminés sur place par J.J. Rousseau, de mettre en place des séances de Travaux pratiques de Physique de niveau L1/L2. Pour cela, le travail consistait à tester le matériel, concevoir les manipulations, rédiger les sujets, et former les enseignants sur place. En une dizaine de jours sur place, il fut possible de bâtir une série complète à 6 sujets (Raideur de Ressort, Oscillateur masse-ressort, solide sur plan incliné, pendule pesant, circuit R-L, circuit R-L-C résonnant). Afin de s'assurer de la pérennité de la série de TP après le retour en France, et dans la mesure où les collègues Tchadiens ont un déficit important de compétences pratiques, il est indispensable de mettre l'accent sur leur formation en s'assurant qu'ils maîtrisent entièrement les manipulations. C'est une pédagogie différente où il faut apprendre à démystifier le matériel qui est fait pour être utilisé, et absolument encourager les collègues à faire, au risque de faire des erreurs : montrer les manipulations n'est pas suffisant.

Lors de cette mission, j'ai également travaillé à la mise en œuvre de 2 TP de chimie (dosage par pH-métrie et colorimétrie). Ici, le travail a consisté à trouver une méthodologie pour la conservation/utilisation du matériel sensible (électrodes de PH métrie..), et surtout mettre en œuvre une méthodologie pour la gestion de l'eau dans un bâtiment qui ne possède pas l'eau courante.

Ce type de mission est très instructive et formatrice car les repères de travail, matériels ou culturels, sont très différents de ceux que l'on connaît dans nos structures. Cela incite à se remettre fortement en question en revenant souvent aux fondamentaux des mesures expérimentales ou théoriques et, du coup, à se les réapproprier.

Depuis 2010, je participe également à la formation d'étudiants Tchadiens dans le cadre d'un Master Pro Electro-mécanique piloté par l'INSA de Lyon, et financé par Exxon Mobile. La promotion d'environ 30 étudiants est divisée en deux options : Génie mécanique (10 étudiants) et génie électrique (20). Pour cette dernière, les enseignements

sont majoritairement assurés par des collègues de Saint Etienne. J'ai, ainsi, en charge deux modules de 25H d'électronique analogique en M1 et M2. Dans la mesure où les étudiants n'ont pas, ou peu, eu de formation pratique, ces deux modules ont été organisés sous la forme de cours/TP en utilisant les kits (carte électronique +Oscilloscope USB) de TSE. Le kit est alimenté par port USB d'ordinateurs portables, ce qui est très pratique dans des structures où les coupures d'alimentations électriques sont « fréquentes » ! Un ensemble de 15 kits a été acquis par les institutions Tchadiennes en 2011.

Ainsi, le premier module de 25H en M1 consiste à revoir l'utilisation d'un oscilloscope (couplage, synchronisation, visualisation, mesures..), étudier théoriquement et pratiquement un circuit RC du premier ordre avec étude indicelle et fréquentielle (tracé de diagramme de Bode), et commencer à travailler sur l'AOP. Le second module de 25H en M2 est consacré à l'étude des fonctions classiques de l'électronique : amplification, comparaison, filtrage, conversion A/N et mise en œuvre d'une chaîne de traitement numérique.

L'intérêt majeur, mais aussi la difficulté dans ces modules, est d'initier les étudiants à la culture expérimentale. Pour cela les kits sont d'un grand secours, car les étudiants, très heureux d'avoir du matériel entre les mains, re-travaillent les manipulations en autonomie chez eux. Cela participe fortement à leur appropriation des notions qui ne sont plus seulement apprises par cœur et récitées ensuite. L'examen qui se fait sous la forme d'un TP m'a permis de mesurer les progrès réalisés en deux modules sur l'aspect pratique.

Au-delà de l'aspect formation, intervenir dans ce Master me permet de participer à la pré-sélection des futurs doctorants du laboratoire qui vont travailleront principalement dans le domaine de l'électronique hautes fréquences

1.5. Conclusion

Ces quelques pages donnent une vision synthétique des activités d'enseignement menées depuis septembre 2004. Elles démontrent une certaine diversité et évolution au cours des années, avec un attachement fort à l'enseignement pratique. Le prochain chantier est sans conteste la mise en œuvre de l'apprentissage par projets en première année de TSE. Même si nous y travaillons dans la continuité depuis plusieurs années, le fait de modifier totalement un bloc de 60H pour l'ensemble de la promotion (~110 étudiants) génère un peu d'inquiétude..... mais aussi beaucoup de motivation.

2. MATERIAUX ET COMPOSANTS MAGNETO-OPTIQUES : CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Ce chapitre est consacré à la définition du contexte scientifique dans lequel ont été menées les activités de recherche depuis septembre 2004. Il donne, par là même, les éléments de base pour l'exposé des chapitres suivants. Ce contexte est intimement lié au développement du composant non-réciproque majeur : l'isolateur intégré. L'isolateur optique a pour fonction d'imprimer un sens de parcours dans un système optique en laissant passer la lumière dans un sens et la bloquant dans l'autre. Il assure ainsi la protection d'éléments sensibles face aux réflexions qui pourraient nuire à leur bon fonctionnement. Comme illustré sur la Figure 2.1, il est par exemple nécessaire à la protection des amplificateurs optiques sur les systèmes de télécommunications par fibre optique.

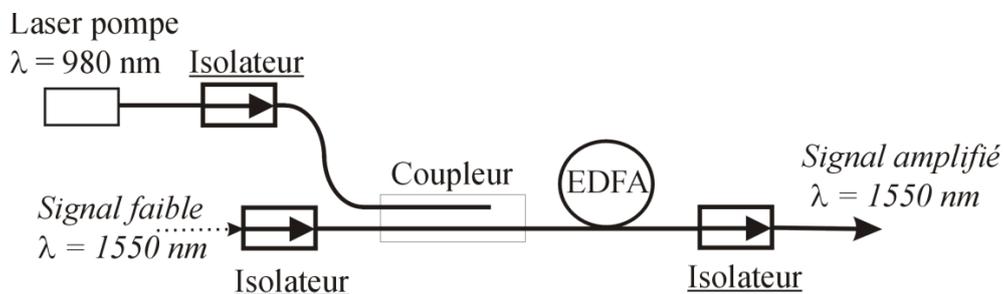


Figure 2.1 : Utilisation d'isolateurs optiques dans un système d'amplification de signal optique (EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier).

Même s'il existe d'autres moyens pour construire des fonctions non-réciproques, l'approche la plus couramment utilisée repose sur l'utilisation d'un matériau magnéto-optique car il contient par nature l'antisymétrie nécessaire à la réalisation de la non-réciprocité. Ainsi, dans la mesure où la réalisation d'un isolateur totalement intégrable constitue un challenge important, et ce depuis plus de 40 ans, les recherches sur ce composant ont fortement contribué au développement du domaine « magnéto-optique » à travers la mise au point de nouveaux matériaux magnéto-optiques, leurs intégrations sur différentes plateformes d'optique intégrée (silicium, semi-conducteur, verre, polymère...),

la mise au point de nouvelles configurations de travail, le développement de cristaux magnéto-photoniques ou plus récemment de matériaux magnéto-plasmoniques.

Nous détaillerons ici dans un premier temps l'origine physique des interactions magnéto-optiques et leur mise en œuvre en espace libre ou configuration guidée. Ensuite, un état de l'art des isolateurs optiques intégrés sera présenté avant une revue des matériaux magnéto-optiques candidats à l'intégration. Nous pourrons alors positionner les activités de recherche décrites dans ce document au sein de ce contexte scientifique.

2.1. Effets magnéto-optiques

Lorsque l'on applique un champ magnétique statique $\vec{B} = B \cdot \vec{n}$ à un matériau quelconque, les électrons de ce matériaux subissent la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

Cette force génère un déplacement électronique dans une direction transverse à la fois au champ et à leur vitesse \vec{v} , avec une intensité qui dépend de l'intensité du champ, et de la vitesse des électrons. Lorsqu'une onde électromagnétique traverse le matériau, mettant en mouvement les électrons, le déplacement électronique dû à la force de Lorentz génère une polarisation \vec{P}_{MO} que l'on peut écrire sous la forme suivante :

$$\vec{P}_{MO} = i \cdot \epsilon_{MO} \cdot \vec{n} \wedge \vec{E}$$

Cette polarisation « magnéto-optique » s'ajoute aux effets de polarisation classiques des diélectriques et contribue donc à la permittivité du matériau pour former une permittivité $\vec{\epsilon}$ de la forme :

$$\vec{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} + i \cdot \epsilon_{MO} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{pmatrix}$$

Par rapport aux contributions classiques, la contribution magnéto-optique a la particularité de créer des couplages entre composantes: une composante de champ E_x génère par exemple une polarisation P_y . Ce phénomène qui apparaît sous la forme de termes hors diagonaux dans $\vec{\epsilon}$ est à l'origine des phénomènes de rotation de polarisation type Faraday ou Kerr que nous décrirons par la suite. De plus, comme le champ magnétique impose une symétrie axiale au travers de la force de Lorentz, la contribution magnéto-optique à la permittivité $\vec{\epsilon}$ est une matrice antisymétrique à l'origine de la non-réciprocité des effets magnéto-optiques.

Plus généralement que ce qui a été décrit ici, l'amplitude de la contribution ε_{MO} dépend des niveaux d'énergie occupés par les électrons, des densités de populations associées, et des forces d'oscillateurs des transitions dipolaires électroniques entre ces niveaux. Dans les matériaux non magnétiques, la levée de dégénérescence entre niveaux étant proportionnelle au champ magnétique \vec{B} externe appliqué, ε_{MO} est proportionnel à l'amplitude de ce champ. Par contre dans les matériaux magnétiques, la levée de dégénérescence est liée à l'aimantation \vec{M} régnant au sein de matériau, ce qui conduit à $\varepsilon_{MO} = \gamma \cdot M$, et généralement à des amplitudes plus importantes. Enfin, les probabilités de transitions dipolaires dépendent évidemment de la fréquence de l'onde incidente, ce qui induit une dépendance de ε_{MO} avec la fréquence ou la longueur d'onde $\varepsilon_{MO} = \varepsilon_{MO}(\lambda)$. La dispersion spectrale $\varepsilon_{MO}(\lambda)$ peut ainsi être interprétée comme une signature de la constitution cristalline du matériau magnétique.

2.1.1. Espace libre

La mise en œuvre des interactions magnéto-optiques en espace libre se fait, soit en transmission si le matériau est suffisamment transparent au travers des effets Faraday et Cotton-Mouton, soit en réflexion si le matériau est absorbant au travers des effets Kerr polaire, longitudinale et transverse.

- **Effet Faraday**

Il s'agit de la situation où une onde lumineuse traverse un matériau dont l'aimantation est parallèle à la direction de propagation (Oz). Si le matériau ne présente pas d'anisotropie linéaire ($\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz}$) sa permittivité diélectrique s'écrit alors :

$$\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & -i \cdot \varepsilon_{MO} & 0 \\ i \cdot \varepsilon_{MO} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{xx} \end{pmatrix}$$

La résolution des équations de Maxwell montre alors que seuls deux types d'onde peuvent se propager sans altération :

Les vibrations circulaires droites (vcd) caractérisées par un indice de propagation $\nu_D = \sqrt{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{MO}}$ et la relation $E_{Dy} = -i \cdot E_{Dx}$.

Les vibrations circulaires gauches (vcg) caractérisées par un indice de propagation $\nu_G = \sqrt{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{MO}}$ et la relation $E_{Gy} = i \cdot E_{Gx}$.

Ces polarisations circulaires droite et gauche constituent les états propres de propagation. L'application d'un champ magnétique au matériau a ainsi créé une symétrie

circulaire qui ne permet que la propagation d'ondes électromagnétiques ayant une polarisation circulaire. La projection sur les états propres de propagation d'une onde polarisée linéairement correspond à deux états de polarisation circulaires droit et gauche d'égale amplitude. Lorsque cette polarisation linéaire arrive sur le matériau, les deux polarisations circulaires la composant se propagent à des vitesses différentes. Ainsi, au bout d'une longueur l , (voir Figure 2.2 à gauche) elles sont déphasées l'une par rapport à l'autre de :

$$\phi = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda} \right) \text{Re} (v_G - v_D)$$

En sortie du matériau, les deux ondes se recombinent pour donner une vibration polarisée rectilignement ayant tourné d'un angle Θ_F par rapport à la direction de l'onde incidente avec :

$$\Theta_F = \frac{\phi}{2} = \left(\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \right) \text{Re} (\sqrt{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{MO}} - \sqrt{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{MO}}) \sim \left(\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \right) \frac{\text{Re}(\varepsilon_{MO})}{\sqrt{\varepsilon_{xx}}}$$

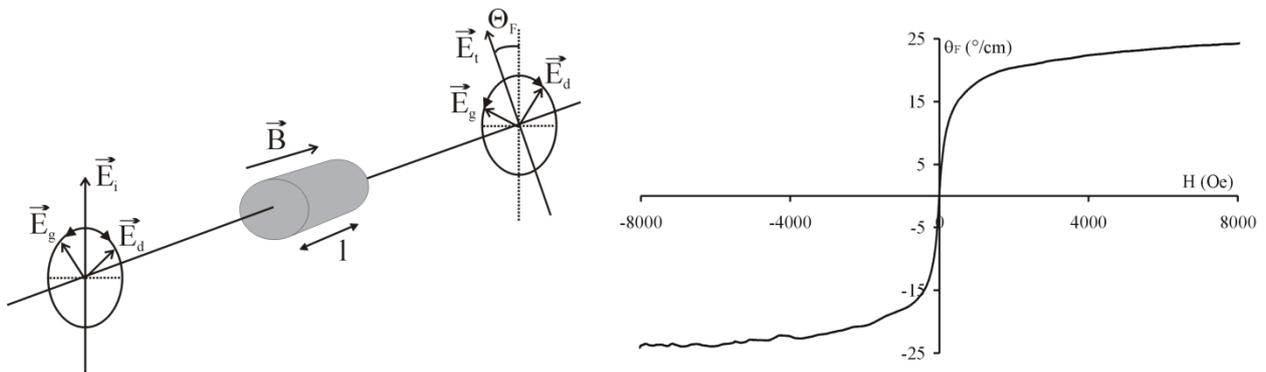


Figure 2.2 : Rotation Faraday . *Gauche* : Evolution de l'état de polarisation d'une onde rectiligne au cours de la traversée d'un matériau soumis à un champ magnétique longitudinal. *Droite* : Exemple d'amplitude de la rotation Faraday en fonction du champ magnétique appliqué au matériau.

Cet angle de rotation Θ_F , appelé rotation Faraday est donc directement proportionnel au terme hors diagonal ε_{MO} et inversement proportionnel à l'indice du matériau. Il est souvent plus utile de noter cette rotation en terme de rotation spécifique par unité de longueur : $\theta_F(^{\circ}/cm) = \Theta_F/l$. La Figure 2.2 à droite, montre un exemple d'évolution de cette rotation Faraday spécifique en fonction du champ magnétique appliqué au matériau. On peut noter un comportement linéaire à faible champ, une saturation à fort champ et un changement de signe de la rotation si le champ change de direction.

De plus, les deux états propres ne possèdent pas le même indice d'extinction, ce qui donne naissance à une ellipticité de l'onde émergente, appelée ellipticité Faraday ϵ_F :

$$\varepsilon_F = \left(\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \right) \text{Im} \left(\sqrt{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{MO}} - \sqrt{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{MO}} \right) \sim \left(\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \right) \frac{\text{Im}(\varepsilon_{MO})}{\sqrt{\varepsilon_{xx}}}$$

La caractéristique importante de ces deux éléments est leur sensibilité à la direction du champ (ou aimantation) au travers du terme ε_{MO} . Si le champ change de sens, θ_F et ε_F changent également de signe (voir Figure 2.2). Cela est illustré sur la Figure 2.3 où une onde rectiligne faisant un aller-retour dans le matériau subit une rotation de polarisation égale à $2\theta_F$ et ne retrouve donc pas son état initial. C'est une illustration directe de l'effet non réciproque.

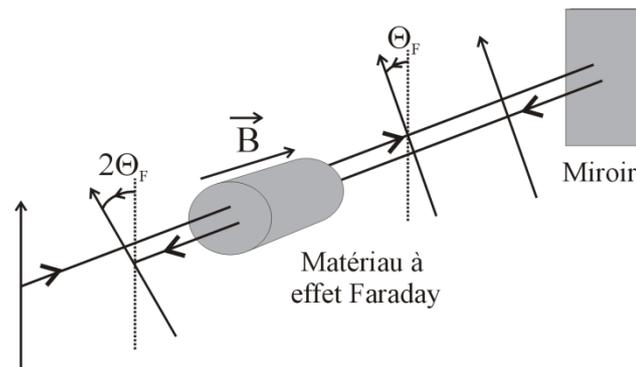


Figure 2.3 : Évolution de l'état de polarisation d'une onde rectiligne lors d'un aller-retour au sein d'un matériau soumis à un champ magnétique. Vu l'orientation du champ par rapport à la direction de propagation, les rotations à l'aller et au retour s'ajoutent.

- **Effet Cotton Mouton (Voigt)**

Il s'agit de la situation où une onde lumineuse se propageant selon Oz traverse un matériau dont l'aimantation est perpendiculaire à la direction de propagation, par exemple selon Oy. La permittivité diélectrique s'écrit alors :

$$\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & i \cdot \varepsilon_{MO} \\ 0 & \varepsilon_{xx} & 0 \\ -i \cdot \varepsilon_{MO} & 0 & \varepsilon_{xx} \end{pmatrix}$$

Dans ce cas, les états propres de polarisation sont linéaires et orientés selon Ox et Oy, donnant naissance à une biréfringence et un dichroïsme linéaire. La biréfringence Δn s'exprime par [ZVE97] :

$$\Delta n = \sqrt{\varepsilon_{xx}} - \sqrt{\varepsilon_{xx} - (\varepsilon_{MO})^2 / \varepsilon_{xx}}$$

On peut noter que cette biréfringence évolue de façon quadratique par rapport au terme magnéto-optique ε_{MO} , et ainsi de façon quadratique en aimantation. La sensibilité au sens de cette aimantation disparaît, et cette biréfringence devient réciproque.

• Effets Kerr

Les caractéristiques des interactions magnéto-optiques mises en œuvre lors de la réflexion sur un milieu aimanté dépendent de l'orientation de l'aimantation par rapport à la fois au plan d'incidence et à la surface de ce matériau. Les différentes configurations représentées sur la Figure 2.4 donnent naissance à trois type d'effets appelés effets Kerr Transverse, Polaire et Longitudinal.

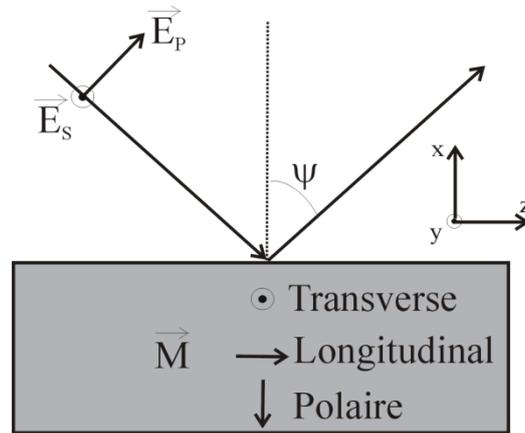


Figure 2.4 : Représentation des configurations des différents effets Kerr. Le plan d'incidence est le plan xOz . La composante de l'onde incidente dans ce plan est noté E_P , alors que celle perpendiculaire au plan d'incidence est notée E_S .

A l'image de l'effet Faraday, les effets Kerr polaires et longitudinaux donnent naissance à un couplage entre les deux composantes E_P et E_S de l'onde incidente. Ainsi, si la lumière incidente est polarisée linéairement, elle subit lors de la réflexion une rotation de sa direction de polarisation associée à une ellipticité. Pour l'effet Kerr polaire, la rotation, et l'ellipticité s'écrivent [ZVE97] :

$$\Theta_K = \text{Re} \left(i \cdot \frac{\varepsilon_{MO}}{n^3 - n} \right) \quad \varepsilon_K = \text{Im} \left(i \cdot \frac{\varepsilon_{MO}}{n^3 - n} \right) \quad \text{avec } n = \sqrt{\varepsilon_{xx}}$$

Ces deux effets sont linéaires par rapport au terme ε_{MO} , ce qui indique leur non réciprocity.

L'effet Kerr Transverse est lui plus particulier car son orientation transverse au plan d'incidence fait qu'il n'a pas d'influence sur la composante E_S qui est elle-même perpendiculaire à ce plan. Il n'y a donc pas de couplage entre ces composantes et ainsi pas de rotation propre associée. Par contre, l'aimantation transverse provoque une modification du coefficient de réflexion de Fresnel de la composante E_P , à la fois sur l'amplitude et le déphasage. Ainsi, pour un angle d'incidence Ψ , le coefficient de réflexion de Fresnel r_{PP} est modifié à la valeur ρ_{PP} donnée par [ZVE97]:

$$\rho_{PP} = \frac{r_{PP} \cdot \varepsilon_{MO} \cdot \sin \psi}{\varepsilon_{xx} \cdot \sqrt{\varepsilon_{xx} - \sin^2 \psi}}$$

Cet effet est linéaire en ε_{MO} , et donc sensible à la direction de l'aimantation. Il est généralement mesuré par la modification engendrée par l'aimantation sur l'intensité réfléchie I de l'onde P au travers du coefficient δ :

$$\delta = \frac{I(M) - I(-M)}{I(M = 0)}$$

2.1.2. Configuration guidée

De façon schématique, la propagation de la lumière dans une structure guidée selon la direction Oz se fait par un ensemble de modes guidés \vec{E}_m associés chacun à une constante de propagation β_m , éventuellement un coefficient d'extinction γ_m , et une fonction d'onde $\psi_m(x, y)$:

$$\vec{E}_m = \vec{E}_0 \psi_m(x, y) \cdot e^{-\gamma_m z} \cdot e^{-i\beta_m z}$$

L'orientation de la polarisation de ces modes dans les structures étudiées est décrite par les modes TE et TM. Pour un guide planaire, le mode TE a un champ électrique transverse à la direction de propagation avec une orientation dans le plan, alors que pour le mode TM, c'est le champ magnétique de l'onde qui présente ces propriétés.

L'application des effets magnéto-optiques décrits dans la partie précédente aux ondes lumineuses guidées se base sur trois méthodes : la conversion de mode TE/TM non réciproque obtenue avec une aimantation longitudinale, la génération de constantes de propagation non-réciproques $\beta_{aller} \neq \beta_{retour}$, ou la génération de coefficient d'absorption non-réciproque $\gamma_{aller} \neq \gamma_{retour}$, toutes deux obtenues avec une aimantation transverse. Ces méthodes sont mises en œuvre dans deux types de configurations principales qui diffèrent par la position du matériau magnéto-optique au sein de la structure : soit ce matériau constitue le guide support, soit il est utilisé en superstrat. Ces différentes configurations sont illustrées sur la Figure 2.5.

Le matériau magnéto-optique est utilisé comme guide support de la lumière, cas de la Figure 2.5 (a), lorsqu'il présente une bonne transparence. Il est utilisé en superstrat lorsque son absorption est plus forte ou pour s'intégrer à une technologie d'optique intégrée déjà existante : couche de Ce-YIG sur guides de silicium [TIE11], ou couche composite à nanoparticules magnétiques sur guide sur verre (voir chapitre 5). Bien évidemment, selon les valeurs d'indices des différents matériaux le recouvrement entre le mode et la couche magnéto-optique peut être plus ou moins grand, et les situations notées ici (a) et (b) sont assez équivalentes.

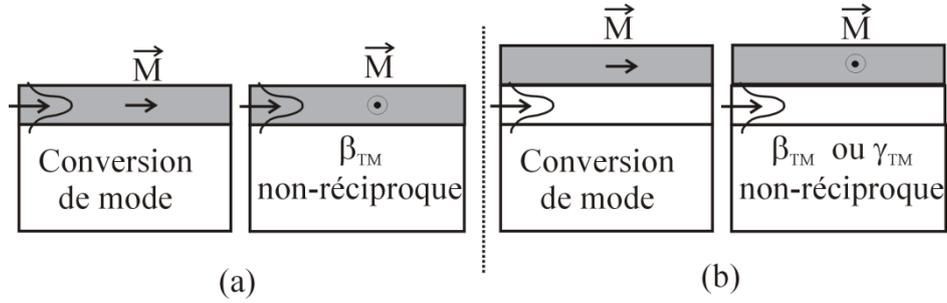


Figure 2.5 : Description schématique des configurations utilisées en optique guidée pour générer des effets non-réciproques. (a) Le matériau magnéto-optique constitue le guide support du guidage. (b) Le matériau magnéto-optique est placé en superstrat au-dessus du guide support.

- **Conversion de mode**

La conversion de mode TE-TM est générée en utilisant un matériau magnéto-optique dont l'aimantation est orientée dans la direction de propagation. Comme initialement démontré par Wang *et al* [WAN72], cette aimantation génère un couplage entre les composantes transverses des champs électriques des modes TE et TM. Dans le cas de la Figure 2.5 (a), ce couplage de mode est assimilable à la rotation Faraday observée en espace libre en transmission. Dans le cas de la Figure 2.5 (b), le couplage peut être expliquée en théorie des rayons par la rotation Kerr longitudinale à la réflexion sur l'interface entre le guide et la couche magnéto-optique [HAM97]. Que ce soit l'une ou l'autre des interprétations précédentes, le couplage entre les modes TE et TM (voir Figure 2.6 pour un guide planaire) est décrit, en théorie de modes couplés, par le coefficient de couplage \mathcal{K} [LOHM98] :

$$\mathcal{K} = i \cdot \varepsilon_{MO} \frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{4\sqrt{P_{TE}P_{TM}}} \int_{MO} E_y^{TE} \cdot E_x^{TM} dx \cdot dy$$

P_{TE} et P_{TM} sont les puissances associées à chaque mode et ω est la pulsation. Ce couplage est bien évidemment lié au terme hors-diagonal ε_{MO} de la matrice permittivité, mais seule la partie du champ confinée dans la couche magnéto-optique contribue au couplage de mode. Dans un guide planaire magnéto-optique, si on considère que le mode est assez bien confiné dans le guide alors [LOHM98] :

$$\mathcal{K} = i \cdot \frac{\varepsilon_{MO} \cdot \pi}{\lambda \cdot n} = i \cdot \theta_F$$

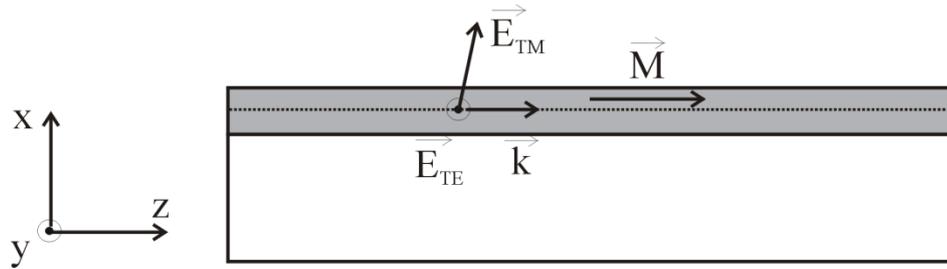


Figure 2.6 : Configuration permettant le couplage de mode TE-TM. L'application d'un champ longitudinal crée une aimantation au sein du guide. Celle-ci est à l'origine du couplage entre les composantes E_{TE}^y et E_{TM}^x .

Mais la différence fondamentale entre la rotation Faraday d'espace libre et le couplage de modes TE/TM en configuration guidée provient du fait que les modes TE et TM ne présentent pas la même constante de propagation. On parle de désaccord de phase $\Delta\beta = \beta_{TE} - \beta_{TM}$, ou biréfringence de mode $\Delta N = N_{TE} - N_{TM} = \Delta\beta/k$.

Cela signifie que les modes ne possèdent pas la même vitesse de propagation, et du coup, se déphasent l'un par rapport à l'autre lors de leur propagation sur une distance donnée. Ainsi, l'efficacité de couplage est limitée. En appliquant la théorie des modes couplés, le rendement de conversion en intensité au bout d'une distance de propagation z , en supposant que le mode incident soit TM s'écrit $R(z) = I_{TE}(z)/I_{TM}(0)$, avec :

$$R(z) = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (\Delta\beta/2)^2} \cdot \sin^2 \left[\sqrt{\kappa^2 + (\Delta\beta/2)^2} \cdot z \right] = R_M \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot L_C} \right]$$

Cette expression montre que le rendement de conversion est limité à la valeur R_M qui ne peut être égale à 1 que si $\Delta\beta = 0$: c'est la condition d'accord de phase. On a alors une conversion complète. Sinon, la conversion est limitée à la valeur R_M obtenue au bout d'une distance $L_C = \pi / \sqrt{4 \cdot \kappa^2 + (\Delta\beta/2)^2}$.

Cela est illustré sur la Figure 2.7 qui donne le rendement de conversion pour une structure magnéto-optique en fonction de la distance de propagation pour différentes valeurs de biréfringence modale. Le coefficient de couplage κ est fixé à $450^\circ/\text{cm}$, valeur que nous pouvons atteindre dans nos matériaux (voir paragraphe 3). Cette figure montre que pour avoir un comportement identique à l'espace libre et assurer une conversion totale, il faut une biréfringence très faible, ici inférieure à $5 \cdot 10^{-5}$. Dans le cas contraire, l'amplitude de conversion est limitée et elle n'atteint pas forcément les 45° requis pour construire un isolateur à rotation (voir paragraphe 2.2) : c'est le cas ici avec une biréfringence de $5 \cdot 10^{-4}$. Cette figure montre également que pour une biréfringence intermédiaire de $3,8 \cdot 10^{-4}$, la conversion n'est pas complète mais dépasse la valeur de 0.5, soit 45° de rotation. Néanmoins, la distance de propagation nécessaire pour atteindre 45° est plus importante que dans le cas de la conversion complète : 1,3 mm pour 1 mm sur l'exemple. Il peut s'agir d'une augmentation importante au regard des pertes induites par le matériau.

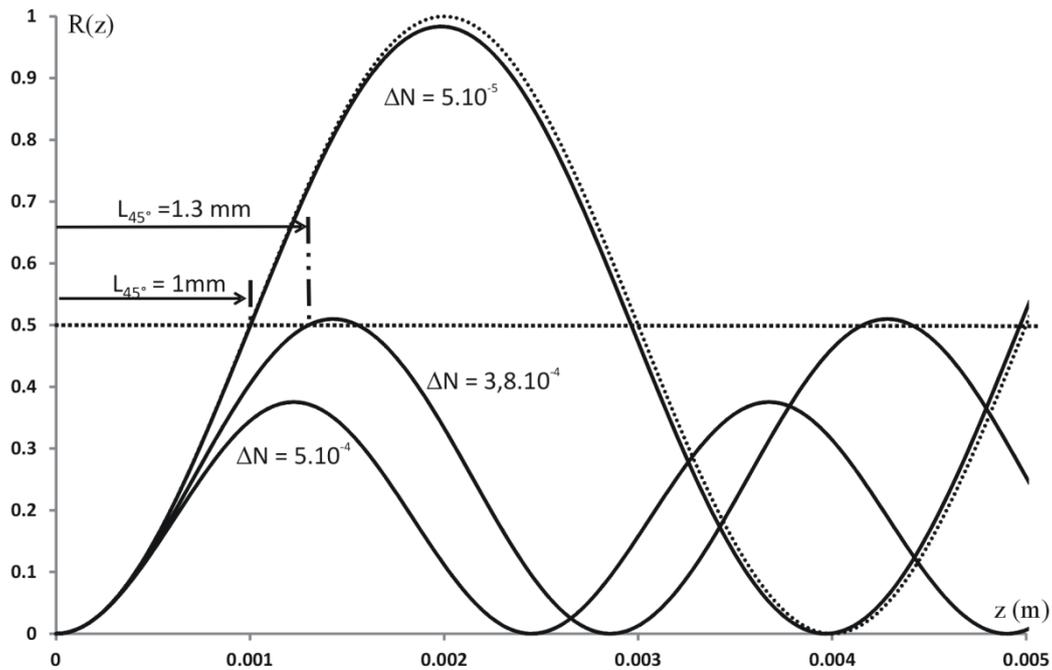


Figure 2.7 : Rendement de conversion d'une structure magnéto-optique possédant un coefficient de couplage \mathcal{K} de $450^\circ/\text{cm}$, pour différentes valeurs de la biréfringence modale ($\lambda = 1550$ nm). La courbe en pointillés correspond au cas de l'espace libre (accord de phase). La distance requise pour obtenir 45° de rotation est précisée quand cela est possible.

- **Constantes de propagation non réciproques**

Le principe des constantes de propagation non-réciproques, proposé par Auracher *et al* en 1975 [AUR75], consiste à se placer en configuration d'aimantation transverse. Dans ce cas, par exemple pour un guide planaire, cette aimantation génère un couplage non réciproque entre les composantes transverse et longitudinale du mode TM. Ainsi, l'équation de dispersion du mode guidé est modifiée par l'aimantation, et la constante de propagation est sensible à la direction d'aimantation : $\beta_{\text{aller}}^{\text{TM}} \neq \beta_{\text{retour}}^{\text{TM}}$ [FUJ99]. Cet effet peut être utilisé dans les configurations (a) et (b) de la Figure 2.5. Dans le cas (b), il peut être interprété en théorie des rayons comme le déphasage non réciproque introduit sur le mode TM à la réflexion sur l'interface aimantée par effet Kerr Transverse. Il est également possible d'avoir le même effet pour le mode TE, mais il faut créer une dissymétrie sur la géométrie. Ceci peut être réalisé grâce à un guide possédant deux domaines magnétiques d'orientation verticales et opposées : la moitié du guide voit une aimantation positive, l'autre moitié voit une aimantation négative [POP98].

Cet effet de constante de propagation non-réciproque a été utilisé au sein d'interféromètres de Mach-Zehnder [FUJ99], de coupleurs directionnels [LOH98], de résonateurs [TIE11][BI11], ou plus récemment dans des « Bloch Array Waveguides » [KUM12] [GAN13]. L'objectif est toujours d'utiliser cette différence de constante de

propagation entre l'aller et le retour, et dans certains cas l'amplifier, pour ensuite trouver une configuration assurant le passage de la lumière dans une direction et la bloquant dans l'autre.

- **Coefficients d'absorption non réciproques**

De façon tout à fait similaire à la situation décrite dans le paragraphe précédent, l'application d'une aimantation transverse dans le superstrat magnétique de la Figure 2.5 (b) induit un coefficient d'absorption non-réciproque pour le mode TM : $\gamma_{aller} \neq \gamma_{retour}$. Proposé par Zaets *et al* [ZAE99], cet effet est dû à l'effet Kerr transverse lors de la réflexion sur l'interface guide matériau aimanté qui produit une modification de l'amplitude du signal réfléchi selon l'orientation de l'aimantation. Cet effet, mis en œuvre sur le mode TM [VAN07], puis sur le mode TE en créant une asymétrie géométrique [SHI06] a surtout été appliqué dans les technologies des semi-conducteurs car il peut être couplé avec un guide constitué d'un matériau amplificateur. Ainsi, le gain apporté par l'amplification peut compenser les pertes induites par l'absorption du matériau.

Sur la base de ces différents effets magnéto-optiques, de nombreuses réalisations d'isolateurs optiques intégrés ont été proposées avec différentes technologies support d'intégration.

2.2. Isolateur optique intégré

Dans la mesure où l'isolateur optique conduit à un comportement différent selon que la lumière se propage dans un sens ou un autre, il doit être construit sur l'utilisation d'un effet non-réciproque. Les démonstrations d'isolateurs utilisent des matériaux magnétiques aimantés [JAL13], seuls matériaux contenant par nature une antisymétrie. Leur mise en œuvre est basée sur les effets décrits dans le paragraphe précédent.

Dans les isolateurs employés en espace libre, un film magnétique qui produit une rotation Faraday de 45° est placé entre deux polariseurs dont les directions diffèrent de 45° . Dans le sens passant, la polarisation de l'onde émergente du film magnéto-optique est alignée avec le polarisateur de sortie, alors que dans le sens retour, elle est inclinée de 90° par rapport au polarisateur d'entrée, donc bloquée (voir Figure 2.8).

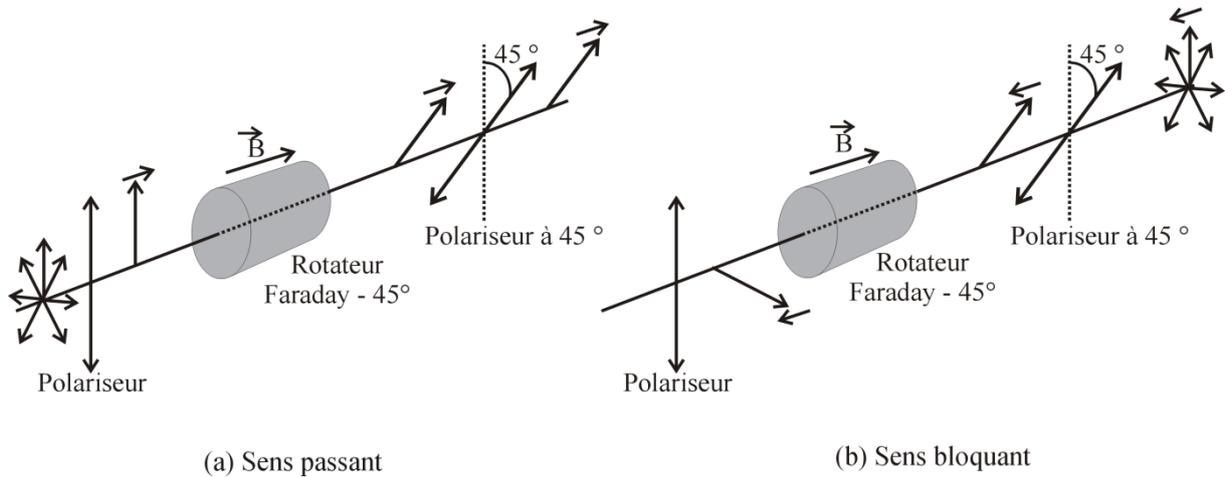


Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'un isolateur optique en espace libre

Le matériau magnéto-optique utilisé pour réaliser ce rotateur dépend du domaine de longueur d'onde. Dans le visible, ce sont des verres paramagnétiques ou du grenat de terbium et gallium (TGG) qui sont utilisés. A 1550 nm, il s'agit surtout du grenat d'yttrium et de fer $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), ou une version avec substitution au Cerium ou Bismuth, car il présente un facteur de mérite magnéto-optique $F(^{\circ}/dB)$ élevé (environ $570^{\circ}/dB$ à 1550 nm [SHI97]). Ce facteur est le rapport entre la rotation Faraday spécifique $\theta_F(^{\circ}/cm)$ et l'absorption $\alpha(dB/cm)$: $F(^{\circ}/dB) = \theta_F/\alpha$. En employant du YIG, les dispositifs commerciaux atteignent de très bonnes performances : taux d'isolation supérieur à 35 dB (rapport des facteurs de transmission aller et retour) avec des pertes d'insertion de l'ordre de 0,4 dB.

En suivant cette approche, le premier isolateur intégré a été démontré par Castera *et al* en 1977 [CAS77]. Ce composant est basé sur un guide planaire en YIG utilisé en deux tronçons : le premier soumis à un champ longitudinal produit une conversion de mode non réciproque de 45° par effet Faraday. Le second est soumis à un champ transverse incliné de 22.5° par rapport au plan pour créer, par effet Cotton-Mouton, une lame de phase demi-onde qui joue le rôle de rotateur réciproque de 45° . Contrairement à l'espace libre, cette lame de phase est absolument nécessaire pour ramener la polarisation dans les directions des modes propres de propagation des structures guidées : mode TE et TM. Ainsi, dans le sens passant, après traversée du sélecteur et des deux tronçons rotateurs qui se compensent, la polarisation redevient TE et l'onde passe. Dans le sens retour, les effets des deux rotateurs s'ajoutent, la polarisation est perpendiculaire à la direction du sélecteur et l'onde est bloquée (voir Figure 2.9). Un taux d'isolation de 10 dB a été démontré par ces auteurs.

Même si cette démonstration relativement ancienne fût très prometteuse, aucun isolateur totalement intégré n'a encore aujourd'hui été mis sur le marché. Cela est principalement dû au fait que les grenats (YIG) classiquement utilisés nécessitent une température de cristallisation supérieure à $700^{\circ}C$ pour être magnétique [BOU04]. De plus, pour accorder les distances cristallines et éviter des craquelures pendant le recuit, ces

matériaux doivent être déposés sur du Grenat de Gadolinium et Gallium (GGG) qui n'est pas un substrat compatible avec les technologies classiques d'optique intégrée.

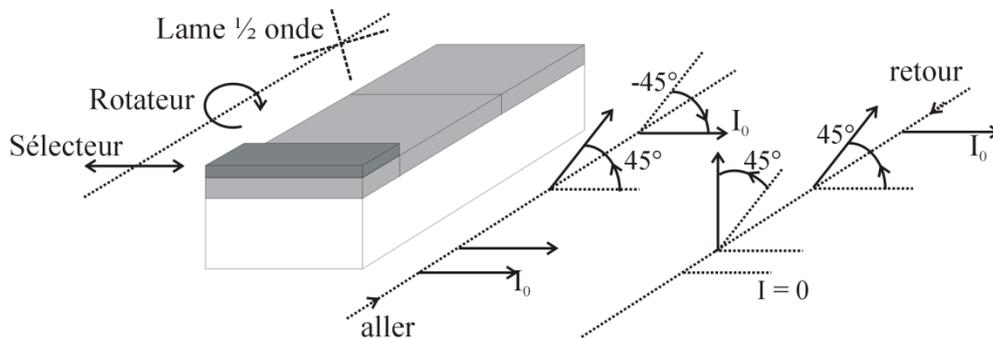


Figure 2.9 : Isolateur intégré à rotation fonctionnant sur le mode TE. La lame 1/2 onde est inclinée de $22,5^\circ$ par rapport au polariseur d'entrée pour avoir un effet rotateur.

Pour surmonter ce problème d'intégration de matériau, certains auteurs ont travaillé sur l'intégration hybride de matériaux magnétiques type YIG. Par exemple, Sugimoto *et al* ont réalisé un isolateur intégré sur une plateforme de silice constitué des différentes fonctions optiques par l'insertion du YIG dans des rainures réalisées dans la silice [SUG96]. Indépendamment de ce problème de matériau, les isolateurs à rotation non réciproque se heurtent au problème de la biréfringence de mode qui peut limiter l'efficacité de conversion (voir paragraphe 2.1.2), ou en faire un paramètre difficilement maîtrisable. Même si des techniques d'accord de phase ont été mises en œuvre, une importante part de la recherche dans le domaine s'est ensuite orientée vers l'utilisation des constantes de propagation non-réciproques ou le problème de biréfringence de mode n'intervient pas. Une des configurations les plus utilisées est celle d'un interféromètre de Mach-Zehnder dont les deux bras, constitués d'un guide magnéto-optique, sont soumis à des aimantations transverses opposées (voir Figure 2.10). Les constantes de propagations des modes TM sont alors non-réciproques entre l'aller et le retour comme expliqué au paragraphe 2.1.2. Un tronçon réciproque est ajouté pour obtenir des interférences constructives dans le sens aller et destructives dans le sens retour (Figure 2.10).

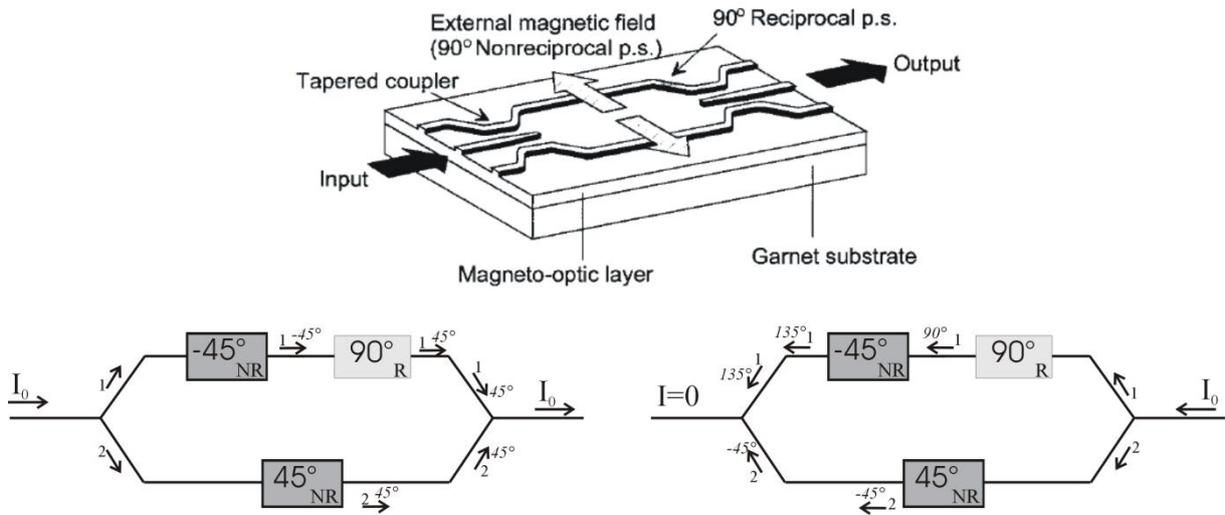


Figure 2.10 : *Haut* : schéma d'un isolateur intégré à déphasage à base d'interféromètre de Mach-Zehnder (D'après [YOK04]). *Bas* : principe de fonctionnement de l'isolateur : les déphaseurs non réciproques (NR) impriment un déphasage de 45° alors que le réciproque (R) imprime 90° . Les valeurs des phases accumulées sont reportées sur les ondes de chaque bras.

Plusieurs conceptions d'isolateur ou démonstrateurs pratiques ont été réalisées en suivant ce principe avec des taux d'isolation intéressants [FUJ00], [ZHU99], [YOK04]. Mais la difficulté d'intégration du YIG demeurant identique, une autre orientation intéressante consiste à rapporter un film de YIG ou Ce-YIG par « bonding » sur une plateforme d'optique intégrée sur verre [JOU08] ou silicium [GHO12]. En suivant cette approche Shoji *et al* ont réalisé une des meilleures démonstrations d'isolateurs intégrés avec un taux d'isolation de 21 dB et des pertes d'insertion de 8 dB [SHO08]. Cependant, ces pertes sont encore trop importantes pour une application industrielle, et ce type de solution nécessite l'intégration de deux aimants permanents à la surface du dispositif, ce qui complique l'intégration.

Un autre type d'isolateur a été développé sur la base de coefficients d'absorption non-réciproques (voir paragraphe 2.1.2) mis en œuvre dans des guides à effet amplificateur, et recouverts d'une couche de matériau ferromagnétique [SHI02]. L'effet amplificateur du matériau à gain compense les pertes d'insertion dans le sens passant. Ici, ce n'est pas du YIG qui est utilisé, mais de nouveaux matériaux magnéto-optiques qui sont totalement intégrables par les technologies semi-conducteurs type InGaAs/InP. Par exemple, Van Parys *et al* ont réalisé un isolateur dans un guide amplificateur par l'intégration monolithique d'un aimant permanent semi-conducteur qui assure également le rôle de contact électrique pour l'injection du courant d'amplification [VAN07]. Ce type de solution est très intéressante en terme d'intégration, mais limitée par le fait que le gain du milieu amplificateur ne permet pas de compenser totalement les pertes induites principalement par l'absorption du matériau ferromagnétique [MIZ12]. De plus, cela reste

une solution active qui nécessite l'injection de courant et que l'on ne peut mettre en œuvre qu'en technologie III-V.

L'amplitude des effets d'isolation étant toujours trop faible devant les effets d'absorption, de nouvelles pistes ont été lancées sur l'exaltation des interactions magnéto-optiques en utilisant des cristaux photoniques, des structures résonnantes [MAG10], [SMI12], ou des effets magnéto-plasmoniques [ZAY12]. Par exemple, un intérêt important a été récemment porté à un isolateur basé sur un résonateur en anneau surmonté d'un matériau magnéto-optique [BI11], [KRpat12]. Par l'effet résonnant de la structure, les propriétés d'isolation sont fortes, mais la bande passante optique devient très faible : de l'ordre de 0,1nm [MIZ12].

L'approche par cristaux photoniques est intéressante, car elle peut permettre d'obtenir une non-réciprocité sans aucun matériau magnétique. Pour cela, il est nécessaire de briser les symétries spatiales et temporelles en utilisant une méthode de modulation spatio-temporelle de la permittivité du guide [YU09], [WAN09]. Il s'agit là de pistes émergentes mais qui ont l'intérêt d'enlever le matériau magnétique, et les problèmes qu'il induit.

Cette revue des isolateurs optiques intégrés met en lumière les difficultés rencontrées par les chercheurs pour trouver une méthode qui remplisse toutes les exigences requises à l'intégration de ce composant. La limitation principale est liée aux pertes d'insertion des dispositifs, rarement inférieures à 10 dB, qui sont dues à l'absorption inhérente du matériau magnéto-optique et aux étapes technologiques nécessaires à l'intégration de ce matériau [MIZ12]. Cela explique pourquoi aucune solution d'isolateur intégré n'est présente sur le marché, bien que les travaux pionniers de Castéra datent de plus de 30 ans.

Il faut toutefois préciser que les dernières démonstrations faites en technologie « silicium » par bonding de Ce-YIG sur des plateformes SOI [SOB13][GHO12], voir même l'intégration monolithique de Ce-YIG sur ces plateformes [BI11], paraissent très prometteuses, surtout qu'il peut y avoir une rémanence de l'effet non réciproque [GHO12], ce qui pourrait éliminer l'étape d'intégration des aimants de polarisation magnétique.

Dans ce contexte, il semble pertinent de poursuivre le travail pour imaginer et construire d'autres solutions originales d'isolateur optique intégré, notamment pour une intégration par approche composite sur verre.

Avant de présenter les objectifs de cette approche, un bilan des différents matériaux magnéto-optiques développés pour des travaux sur les fonctions non-réciproque intégrés est présenté.

2.3. Matériaux MO pour l'intégration

Les travaux des groupes de recherche menés depuis plusieurs dizaines d'années pour réaliser une intégration de l'isolateur optique ont conduit au développement de « nouveaux » matériaux magnéto-optiques qui soient compatibles avec une plateforme de circuits optiques intégrés. Le Tableau 2.1 recense ces différents matériaux en précisant le substrat, la longueur d'onde de travail et surtout le facteur de mérite magnéto-optique $F(^{\circ}/\text{dB})$. Comme précédemment défini, celui-ci est exprimé par le rapport de l'effet Faraday intrinsèque du matériau à son absorption.

$$F(^{\circ}) = \frac{\theta_F(^{\circ}/\text{cm})}{\alpha(\text{dB}/\text{cm})}$$

Matériau	Substrat	λ (nm)	F ($^{\circ}/\text{dB}$)	Références
GaAs:MnAs	GaAs	1550	0,02	[SHI02b]
InAlAs:MnAs	InP	1550	0,06	[SHI02]
CdMnTe	GaAs	730	1000	[ZAY04]
Fe:InGaAs	InP	1550	125	[ZAM08]
Co ₅₀ Fe ₅₀	GaAs	1300	0,3	[LES06]
Fe:SrTiO ₃	LaAlO ₃	1550	1,1	[KIM08]
Fe ₃ O ₄ (NP)/PMMA	Polymère	980	0,5	[LOP09]
CoFe ₂ O ₄ (NP)/PMMA	Polymère	980	0,21	[LOP12]
Bi-YIG (NP)/PMMA	Polymère	980	0,23	[FU08]
<i>γ-Fe₂O₃ (NP)/(SiO₂/TiO₂)</i>	<i>Verre</i>	<i>633</i>	<i>0,2</i>	<i>[ROY05]</i>
<i>CoFe₂O₄ (NP)/(SiO₂/ZrO₂)</i>	<i>Verre</i>	<i>1550</i>	<i>2</i>	<i>[CHO08]</i>
YIG	GGG	1550	10,2	[HUA05]
Bi-YbIG	GGG	1550	30,2	[HUA05]
Ce-YIG	Gd ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂	1550	570	[SHI97]

Tableau 2.1 : Facteur de mérite magnéto-optique de différents matériaux magnéto-optiques développés en vue d'une application à l'isolateur optique. Le substrat et la longueur d'onde de travail sont précisés dans chaque cas. Les deux lignes en italique correspondent à des matériaux développés au LT2C. (NP : Nanoparticules)

Ainsi, sachant qu'avec un matériau de facteur de mérite de $45^\circ/\text{dB}$, la rotation de 45° nécessaire dans un isolateur à rotation produit une absorption de 1dB, on en déduit rapidement qu'il faut utiliser un matériau de facteur de mérite supérieur à $45^\circ/\text{dB}$ pour assurer des pertes d'insertion dans un composant inférieures à 1 dB.

On peut immédiatement remarquer dans ce tableau qu'il y a très peu de matériaux assurant cette condition. Le facteur le plus élevé recensé ici est $1000^\circ/\text{dB}$ obtenu par Zayets *et al* dans des semi-conducteurs dilués CdMnTe à une longueur d'onde de 730 nm. Malgré cette valeur et les excellentes démonstrations effectuées par ce groupe, l'intégration complète de l'isolateur au sein d'autres fonctions intégrées est, de l'aveu même des auteurs, très difficile [ZAY12]. On retrouve ensuite le Ce-YIG à $570^\circ/\text{dB}$, le matériau certainement le plus utilisé, avec les difficultés d'intégration mentionnées dans le paragraphe précédent. Enfin, Zamman *et al* obtiennent un facteur de $125^\circ/\text{dB}$ dans InGaAs dopé au fer, mais leur mesure de transmission paraît honnêtement surévaluée, et en tout cas non réalisée en configuration guidée. Les matériaux aux facteurs de mérite les plus faibles, surtout en semi-conducteur, sont en fait utilisés avec des matériaux à gain dans des isolateurs à coefficient d'absorption non réciproques.

Enfin, plusieurs études ont été consacrées à des approches composites en utilisant des nanoparticules magnétiques dans des matrices de verre ou polymères. Il s'agit par exemple de nanoparticules de magnétite (Fe_3O_4) ou ferrite de Cobalt (CoFe_2O_4) dans une matrice de PMMA qui doit servir à remplir des guides « slots » de silicium [KHA10]. Cette approche est très proche de celle développée au laboratoire LT2C, et nous pouvons remarquer que le facteur de mérite de notre composite à base de nanoparticules de ferrite de Cobalt est environ 10 fois supérieur.

De façon à optimiser les propriétés magnéto-optiques des matériaux et également pour réduire la taille des dispositifs, de nombreux travaux ont été entrepris ces dix dernières années pour exalter les interactions magnéto-optiques.

Tout d'abord, l'approche par cristal photonique consiste à créer une structure magnéto-optique périodique possédant une bande interdite photonique. En bord de bande photonique, la vitesse de groupe des ondes diminue, ce qui augmente l'interaction avec le matériau magnétique et permet d'exalter par exemple l'effet Faraday. Cela est représenté sur la Figure 2.11 en haut, où l'on peut voir une structure périodique 1D alternant du Bi-YIG avec de la silice. La courbe de droite montre que la rotation Faraday est exaltée aux bords de la bande photonique. En suivant cette méthode, Kahl *et al* ont montré la possibilité d'augmenter le facteur de mérite de 66% comparativement à une couche de matériau magnétique seule [KAH04]. La structuration 1D peut également être appliquée en configuration guidée comme le montre l'image de la Figure 2.11 en bas. Une cavité de Bragg a été réalisée dans un guide de BI-YIG et une exaltation de la rotation de polarisation a été mesurée [LEV06].

La deuxième méthode, plus récente, utilisée pour exalter un effet magnéto-optique consiste à coupler un matériau magnétique à un mode plasmonique d'un métal. Le

confinement du champ électromagnétique dû au plasmon peut contribuer à l'amplification de l'interaction magnéto-optique. Ceci peut être réalisé par exemple par des approches cœur-coquille avec des nanoparticules métalliques et magnétiques [WAN11], ou en associant une couche magnétique à un réseau métallique [CHI13].

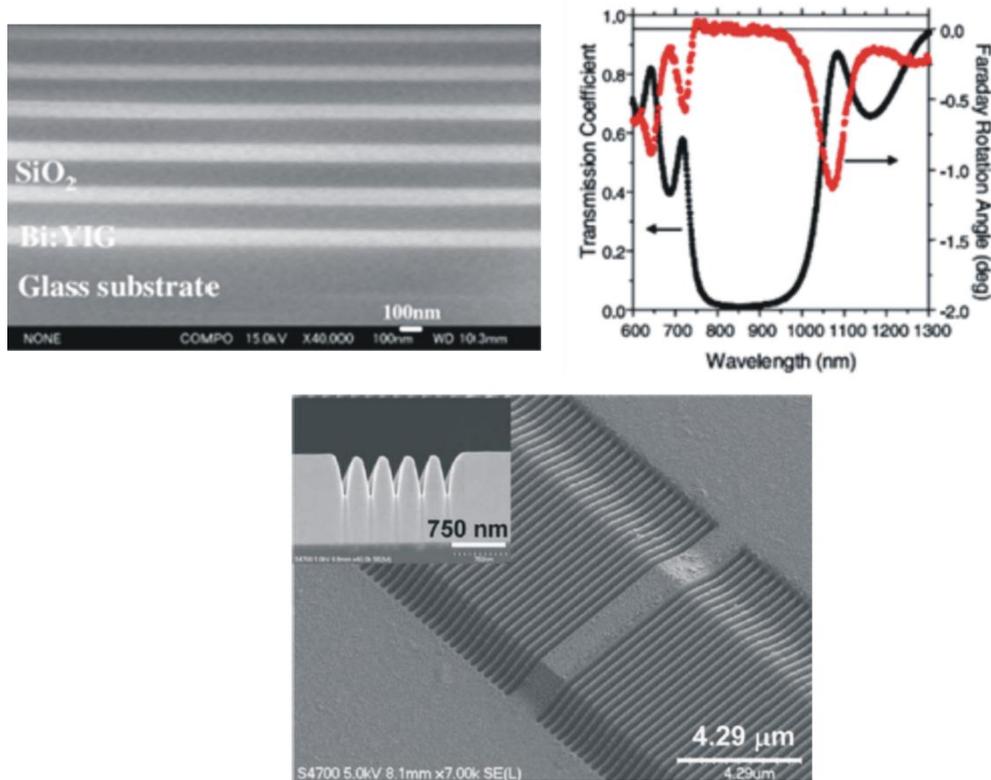


Figure 2.11 : *Haut* : Structure périodique Bi-YIG/SiO₂ et spectres de Transmittance et Rotation Faraday associés (d'après [INO02]). *Bas* : Cavité de Bragg dans un guide de Bi-YIG (d'après [LEV06]).

2.4. Positionnement des travaux : approche composite

La présentation faite dans les paragraphes précédents montre que malgré de nombreux efforts, aucune solution n'a encore permis d'intégrer un isolateur optique au sein des plateformes d'optique intégrée. Les raisons sont nombreuses, mais principalement on peut retenir que, d'une part, les nouveaux matériaux développés ont rarement un facteur de mérite suffisant, et d'autre part, le matériau magnéto-optique conventionnel Ce-Yig est difficile à intégrer sur les circuits intégrés optiques.

De con côté, le laboratoire Telecom Claude Chappe travaille depuis plusieurs dizaines d'années sur les propriétés magnéto-optiques des nanoparticules magnétiques, et les effets polarimétriques associés. Il s'agit principalement de nanoparticules de ferrite tout d'abord étudiées en phase liquide sous forme de ferrofluides [DON99], puis sous la

forme de monolithes de silice dopés par des nanoparticules magnétiques et obtenus par voie sol-gel [JAM01]. Lors de ma thèse débutée en 2001, les travaux se sont orientés vers l'étude de couches minces d'oxydes métalliques ($\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$) dopées par des nanoparticules de maghémite. C'est par l'intermédiaire de ce travail que l'équipe est rentrée dans le domaine de l'optique guidée au travers, notamment, de la mise en œuvre de moyens de mesures expérimentaux dédiés : spectroscopie m-lines, banc de guidage (couplage/découplage par prisme) pour visualisation des modes, mesure d'atténuation et premiers essais de conversion de modes ou battement de modes.

En fin de thèse, en 2004, nous avons mis au point des couches minces de $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ dopées avec 2% de Maghémite, ce qui donnait une rotation Faraday de $30^\circ/\text{cm}$ (@ 633 nm) avec une biréfringence de mode élevée d'environ 2.10^{-3} . Cela donnait une conversion de mode potentielle avec une efficacité de l'ordre de 10^{-3} % ! [ROY05]. Nous avons au passage, démontré la possibilité de réduire la biréfringence de mode en orientant les nanoparticules dans la couche mince par application d'un champ magnétique lors de la gélification de la matrice sol-gel.

Malgré la faiblesse de ce potentiel magnéto-optique et au regard de la lecture de la bibliographie, nous avons le sentiment de développer une approche composite originale peu retrouvée ailleurs, et facilement transférable vers des composants intégrés. Cela reste, il semble, encore le cas aujourd'hui au vu des éléments de contexte développés dans le paragraphe précédent. Néanmoins, il était absolument indispensable d'identifier les moyens de faire progresser les potentialités de notre matériau ainsi qu'une plate-forme d'optique intégrée pour l'appliquer aux composants.

Les chapitres suivants sont relatifs aux travaux menés en suivant cette orientation. Le chapitre 3 est ainsi consacré aux développements réalisés sur notre matériau magnéto-optique composite depuis 2004. Dans le chapitre 4 sont présentés les résultats obtenus sur les convertisseurs de modes hybrides sur verre en vue de la réalisation d'un isolateur optique intégré. Puis, le chapitre 5 présente les travaux réalisés avec pour objectif l'obtention d'effets magnéto-photoniques dans des arrangements 3D obtenus par voie sol-gel.

3. MATERIAU COMPOSITE MAGNETO-OPTIQUE

Le travail décrit dans ce chapitre est relatif au développement du matériau magnéto-optique composite effectué depuis 2004. Le but est d'atteindre des potentialités permettant une utilisation de ce matériau dans des dispositifs intégrés. Le travail a été principalement réalisé dans le cadre de la thèse de Fadi Choueikani de 2004 à 2008, financée en partie par un programme MIRA de la région Rhône-Alpes [CHO08]. Il s'agit du travail fondateur de mes activités de recherche en tant qu'encadrant, car c'est au cours de ce travail que nous nous sommes appropriés l'élaboration de notre matériau auparavant réalisé par le LPMCN à Villeurbanne. De plus, les avancées réalisées au cours de la thèse ont permis d'envisager l'application de la méthode aux convertisseurs de modes (chapitre 4) et cristaux magnéto-photoniques (chapitre 5)

Des améliorations constantes ayant été apportées ensuite à notre matériau composite, les thèses ultérieures ont également contribué aux résultats présentés ici. L'ensemble des développements « matériau » a été réalisée en collaboration avec Sophie Neveu, Maître de conférences au laboratoire Physicochimie des Electrolytes, Colloïdes et Sciences Analytiques de l'UPMC à Jussieu. Sophie Neveu est chimiste, spécialiste de l'élaboration de nanoparticules magnétiques de ferrite ou ferromagnétiques. Il s'agit d'une collaboration « historique », active et très fructueuse. La majorité des articles que nous avons publiés depuis 2004 sont basés sur de nanoparticules magnétiques faites par Sophie Neveu.

Dans une première partie, je vais présenter la matrice composite en détaillant les propriétés intrinsèques du dopant (nanoparticules de ferrite de cobalt), et la méthode d'élaboration sol-gel du matériau. Une seconde partie est consacrée aux propriétés optiques et magnéto-optiques du matériau composite déposé en couche mince. Puis, dans la troisième partie, des résultats obtenus au travers d'études plus amont sur d'autres types de nanoparticules magnétiques seront présentés.

3.1. Matériau composite

Sur la Figure 3.1 est donnée une représentation schématique de la constitution du matériau composite magnéto-optique. Il s'agit d'une matrice de type silice d'indice 1,5

environ dans laquelle sont figées des nanoparticules magnétiques dont la taille est de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Ce matériau est déposé sous la forme d'une couche mince d'épaisseur de l'ordre du micromètre sur un substrat de verre, tout cela avec des traitements thermiques basse température pour assurer une compatibilité avec des composants intégrés.

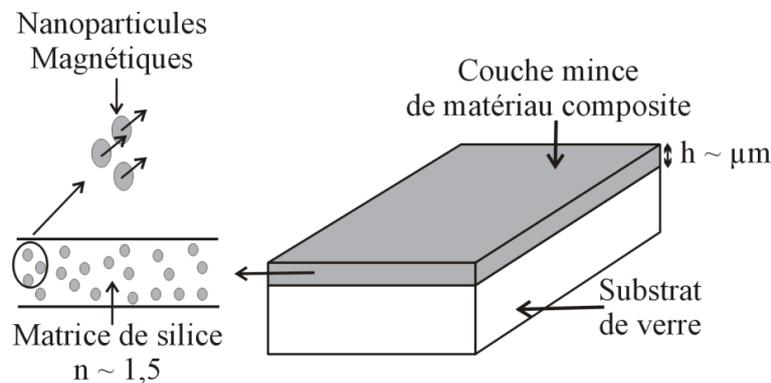


Figure 3.1 : Représentation schématique du matériau magnéto-optique composite déposé en couche mince.

L'activité magnéto-optique du matériau étant liée à la présence des nanoparticules magnétiques, une présentation de leur propriétés intrinsèques mesurées en suspension est faite dans la partie suivante.

3.1.1. Nanoparticules en suspension

Les travaux menés jusqu'en 2004 sur le composite étaient basés sur l'utilisation de nanoparticules de Maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), car relativement facile à insérer dans les matrices de silice par voie sol-gel. L'amplitude de l'effet Faraday obtenue était de $25^\circ/\text{cm}$ à 633 nm pour une concentration volumique de 2 %. Cette valeur étant trop faible, nous nous sommes alors orientés sur la ferrite de Cobalt CoFe_2O_4 , car les travaux de F. Donatini [DON99] montraient qu'elle présentait une rotation Faraday beaucoup plus importante notamment à 1550 nm. La Figure 3.2 montre la valeur de la rotation Faraday enregistrée à saturation, et la transmittance en fonction de la longueur d'onde d'une suspension de nanoparticules de ferrite de cobalt concentrée à 0,15%. La mesure est faite en phase liquide dans une cellule de 1 mm. La rotation présente deux résonances principales : une à 750 nm due aux ions Fe^{3+} en coordination octaédrique, et une plus large autour de 1500 nm due aux ions Co^{2+} en coordination tétraédrique [ROY04]. Pour ces deux résonances, la rotation atteint $30^\circ/\text{cm}$ pour une concentration de 0,15 %. La rotation étant proportionnelle à la concentration volumique en nanoparticules, nous pouvons en déduire que pour ces particules : $\theta_F(^{\circ}/\text{cm}/\%) = 200$ (@ 1550 ou 750 nm)

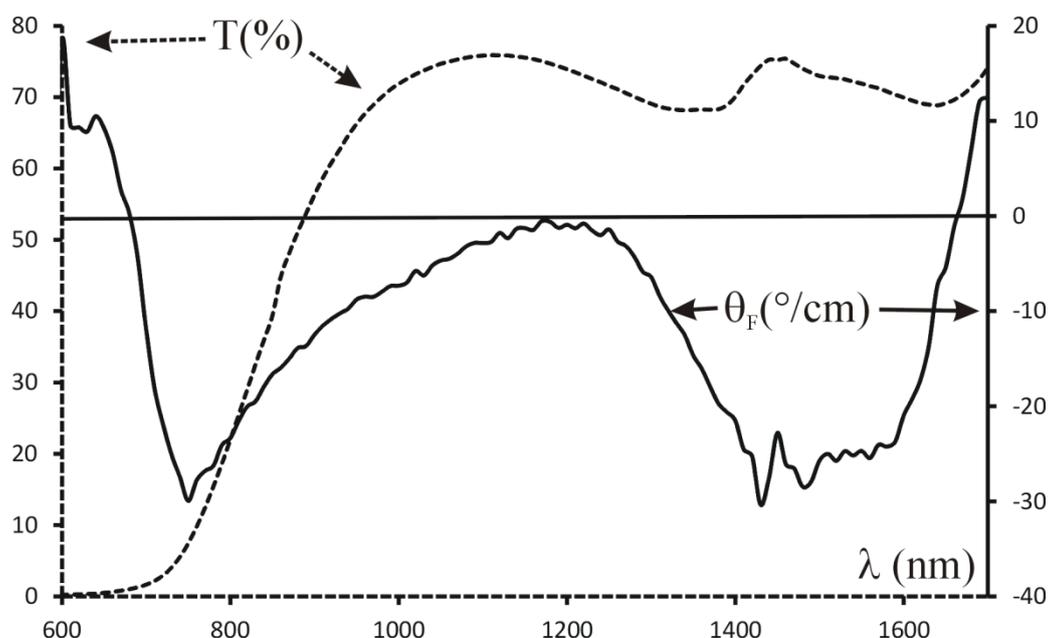


Figure 3.2 : Transmittance (trait en pointillé et échelle de gauche) et rotation Faraday spectrale (trait plein et échelle de droite) d'une solution de nanoparticules de ferrite de Cobalt dans l'eau avec une concentration volumique 0,15%.

Sur la Figure 3.2 est également reportée la transmittance de la même suspension. La mesure est référencée à un cuve d'eau pour ne tenir compte que de l'effet des nanoparticules. On remarque une bande de transparence située dans l'infrarouge au delà de 1000 nm. Le coefficient de transmission d'environ 70 % pour une cuve de 1 mm et une concentration de 0,15 % donne un coefficient d'absorption que l'on peut noter : $\alpha(\text{dB}/\text{cm}/\%) = 100$ (@ $\lambda > 1000 \text{ nm}$)

Afin d'évaluer la qualité magnéto-optique de ces nanoparticules, est tracé sur la Figure 3.3, le facteur de mérite de ces nanoparticules magnétiques à partir des courbes de la Figure 3.2. Il présente un premier pic assez large autour de 900 nm qui atteint $0,5^\circ/\text{dB}$, et un plus resserré autour de 1500 nm qui atteint $2^\circ/\text{dB}$. Cette dernière valeur montre que la ferrite de cobalt doit préférentiellement être utilisée à des longueurs d'ondes de l'ordre de 1500 nm, ce qui est très intéressant pour une utilisation à la longueur d'onde télécom de 1550 nm. En revenant au Tableau 2.1, on constate que ce facteur de mérite de $2^\circ/\text{dB}$ constitue en quelque sorte une valeur moyenne des différentes valeurs présentées. Il est notamment à comparer à la valeur de $10^\circ/\text{dB}$ présentée par le YIG à cette même longueur d'onde.

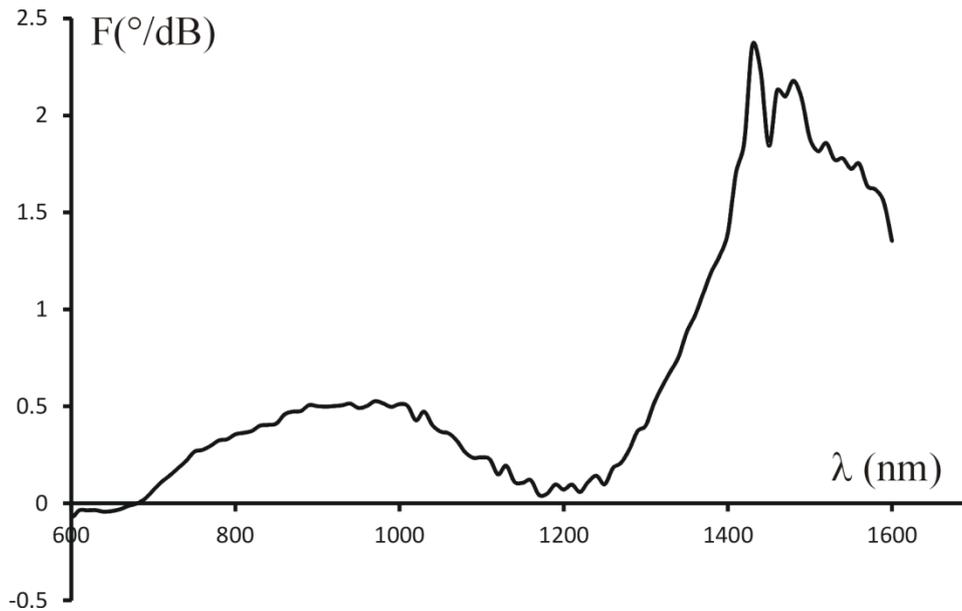


Figure 3.3 : Facteur de mérite magnéto-optique d'une solution de nanoparticules de ferrite de Cobalt dans l'eau.

Dans la partie suivante, la méthode d'élaboration du matériau composite, basée sur une méthode sol-gel, est présentée.

3.1.2. Elaboration sol-gel

L'élaboration sol-gel est une méthode de synthèse de matériau qui, à partir de précurseurs métalliques ($M-(O-R)_4$) en solution, et par des réactions d'hydrolyse et de condensation fournit un réseau minéral d'oxyde métallique. M est un atome de métal, par exemple Si, Ti ou Zr. R est un groupement carboxyl, par exemple CH_3 ou C_2H_5 ou des groupements plus complexes. La Figure 3.4 donne une vue d'ensemble des réactions chimiques mises en jeu. Tout d'abord, les précurseurs métalliques sont mis en solution avec de l'eau pour donner lieu à des réactions d'hydrolyse qui libèrent de l'alcool, en formant des groupements silanol sur le précurseur. Par diminution de la gêne stérique, cela favorise le rapprochement entre groupements hydrolysés, ce qui va conduire aux réactions de condensation qui forment les ponts « oxo », puis, par enchaînement, à la construction d'un réseau polymérique minéral et aboutit à la gélification de la matrice. Sur l'exemple de la Figure 3.4, cela conduit à la formation de la silice (SiO_2). Selon le type de groupements hydrolysés qui réagissent (groupement silanol ou non), la condensation se fait par libération d'eau, d'alcool (ROH), et de façon moins fréquente d'éther (R-O-R). Les réactions de condensations qui conduisent à la gélification sont lentes si on laisse la solution au repos. Mais si on provoque un rapprochement des entités par évaporation du solvant, elles sont accélérées et la gélification devient instantanée. C'est le cas lors de l'étape de « dip-coating » avec l'évaporation du solvant dans le ménisque qui se forme à la

surface du substrat, ou lors du « spin-coating » par dépôt de la goutte de solution sur le substrat [BRI92].

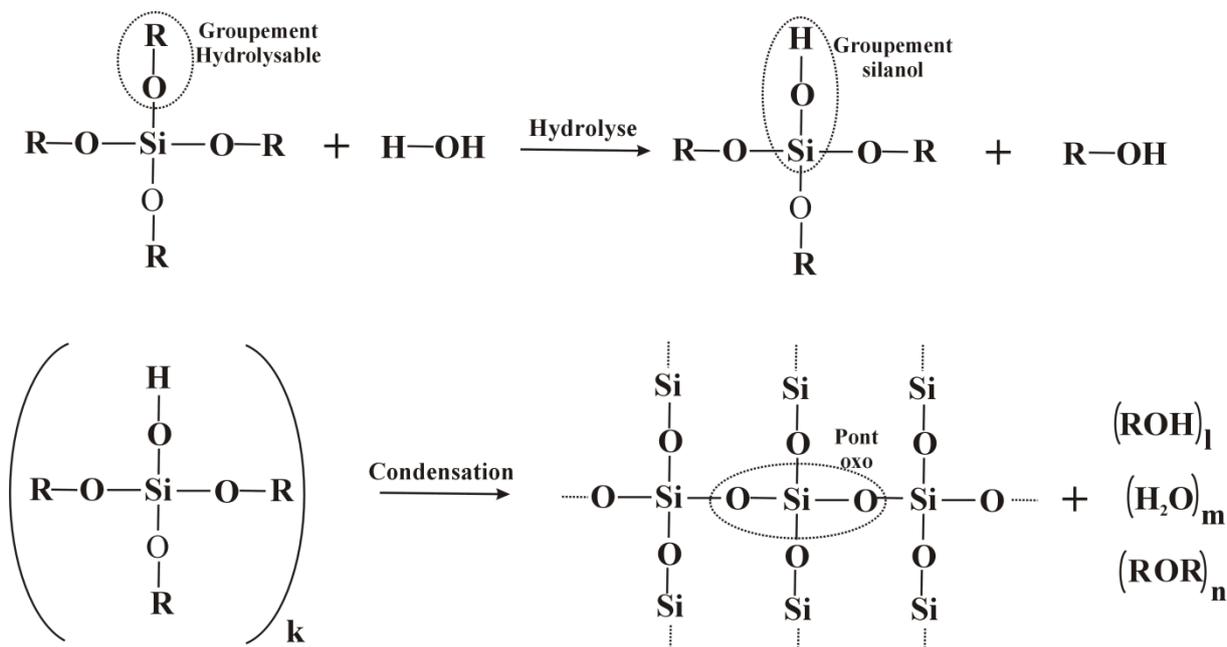


Figure 3.4 : Ensemble de réactions chimiques caractéristiques de l'élaboration sol-gel. L'exemple est construit autour de l'atome métallique de Si.

Ce principe général de synthèse, qui aboutit à la formation d'un réseau minéral constituant un oxyde métallique, peut être également appliqué à des synthèses d'oxydes mixtes, par exemple SiO₂/TiO₂ ou SiO₂/ZrO₂, en mélangeant différents précurseurs métalliques de départ. Cela permet de jouer sur les propriétés du matériau final comme l'indice de réfraction ou les caractéristiques mécaniques. De façon classique, le sol synthétisé pour obtenir des couches minces guidantes est réalisé avec un mélange de précurseurs de Si et Zr avec un rapport molaire 10/3. Cela permet d'avoir un indice moyen plus élevé que la silice pure, de l'ordre de 1,5.

Dans le cas d'un dépôt en couche mince par « dip-coating », l'épaisseur de la couche dépend principalement de la viscosité de la solution et de la vitesse de tirage utilisée lors du retrait [BRI92]. C'est par la vitesse de tirage que nous ajustons l'épaisseur des couches minces. Une fois le matériau gélifié sous la forme d'un film mince sur un substrat, il est nécessaire de le finaliser en appliquant un traitement thermique qui a pour objectif d'éliminer les restes d'alcool, d'eau et de solvant piégés dans la matrice ($T \sim 100^\circ\text{C}$), et/ou de densifier le matériau [BRI92].

C'est ce type d'élaboration sol-gel qu'utilisait, dans le cadre de ma thèse, le laboratoire LPMCNC pour synthétiser les couches SiO₂/TiO₂ dopées en nanoparticules de Maghémite, avec des températures de traitements de plusieurs centaines de degrés. Elle est encore utilisée par notre équipe pour l'élaboration des cristaux magnéto-photoniques par voie sol-gel (Chapitre 6). Cependant, comme indiqué au paragraphe 2.4, ce type de matrice conduisait à des couches minces guidantes avec des biréfringences de mode de

l'ordre de 2.10^{-3} . C'est une valeur trop importante qui limite énormément la conversion de mode. Cette valeur de biréfringence étant principalement due à la forte anisotropie de la couche induite par les contraintes mécaniques, nous avons fait le choix d'utiliser une synthèse sol-gel hybride organique-inorganique.

- **Elaboration sol-gel organique-inorganique**

Il s'agit ici d'utiliser un précurseur métallique dont l'un des groupements OR a été remplacé par un groupement organique qui contient notamment une double liaison carbone [LI95]. La Figure 3.5 donne, pour illustration, la formule chimique du précurseur de silice organique inorganique que nous utilisons : le Methacryloxypropyltriméthoxysilane MAPTMS [SAR98]. Ce type de précurseur se comporte comme précédemment lors des phases d'hydrolyse et de condensation. Mais une fois gélifié par la construction du réseau minéral, il est soumis à une illumination UV (~ 300 nm), qui par l'intermédiaire d'un photo-initiateur ajouté au sol de départ, provoque l'ouverture des doubles liaisons C=C pour aboutir à une polymérisation organique par construction de chaîne carbonée -C-C-C-. Ce type de synthèse sol-gel permet d'aboutir à une qualité optique parfaite pour le guidage, même pour des épaisseur de plusieurs μm , alors que les dépôts sol-gel de type minéral ont tendance à générer des fissures dès que l'épaisseur dépasse plusieurs centaines de nanomètres. Cela est dû à la présence du réseau organique qui apporte de la flexibilité à la matrice [LAN05]. Cette flexibilité qui permet de baisser le niveau de contrainte dans la couche, permet par conséquent de réduire fortement la biréfringence intrinsèque de la couche par rapport à une couche minérale. Ce point sera détaillé au paragraphe 3.2.2. De plus, le réseau inorganique polymérisant à basse température sous insolation UV, cela permet de réduire fortement le budget thermique à des valeurs de l'ordre de 100 °C. C'est un critère important en vue de l'utilisation du matériau sur une plateforme d'optique intégrée.

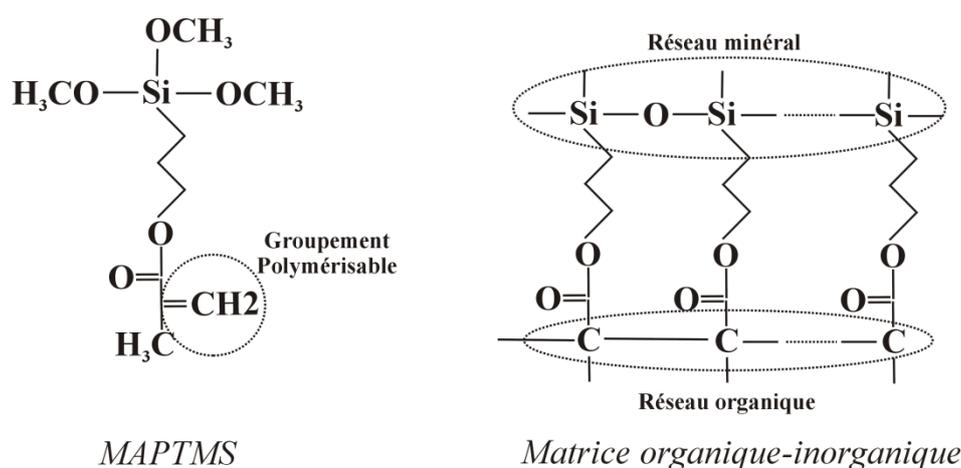


Figure 3.5 : Formule chimique du précurseur hybride utilisé (MAPTMS : Methacryloxypropyltriméthoxysilane), et représentation de la constitution des deux réseaux polymériques dans une matrice sol-gel organique inorganique.

- **Dopage**

Pour obtenir une matrice d'oxyde métallique avec une activité magnéto-optique, la voie choisie consiste à ajouter à la préparation sol-gel liquide des nanoparticules de ferrite de Cobalt (CoFe_2O_4) dispersées dans l'eau (ferrofluide) (voir Figure 3.6).

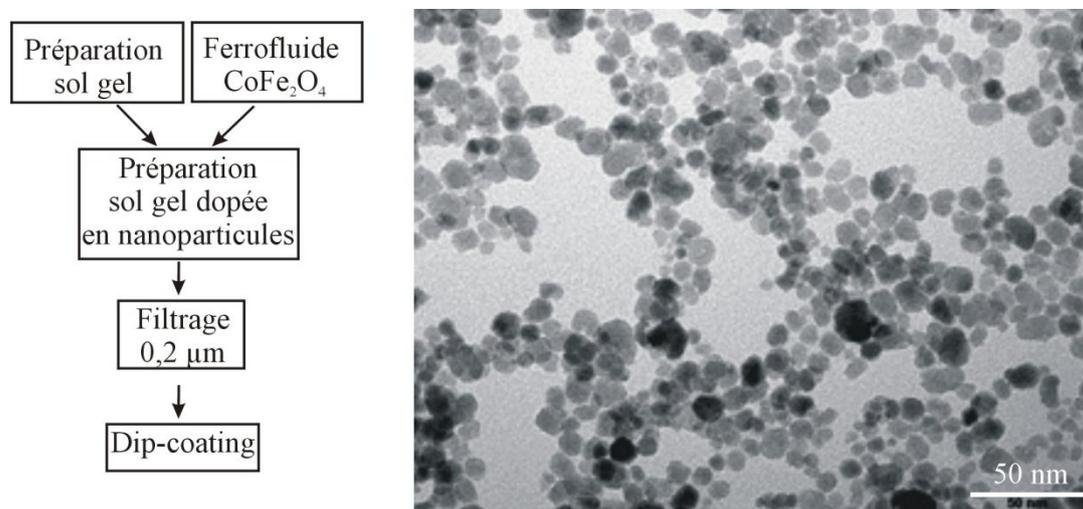


Figure 3.6 : *Gauche* : Protocole d'élaboration des sol dopés. *Droite* : Image de microscopie électronique en transmission de nanoparticules de ferrite de cobalt issu d'un ferrofluide acide.

L'objectif est, par ce dopage, d'aboutir à une matrice solide au sein de laquelle les nanoparticules sont piégées au travers d'une distribution aléatoire de particules individuelles. Il faut éviter tout effet d'agrégation qui, à partir de nanoparticules d'environ 10 nm, pourrait conduire à la formation de structures de plusieurs dizaines de nanomètres à l'origine d'effets de diffusion et donc de pertes optiques. Cette étape de dopage nécessite donc une excellente compatibilité chimique entre les nanoparticules en phase aqueuse et la solution sol-gel. Pour cela, l'étude a été menée en collaboration étroite avec S. Neveu du Laboratoire PECSA pour déterminer les conditions assurant cette compatibilité. En jouant sur les propriétés acido-basiques des solutions, il devient possible de trouver les conditions pour obtenir une bonne dispersion des nanoparticules à la fois dans le liquide magnétique et dans la préparation sol-gel. En effet, l'hydrolyse de la préparation sol-gel étant catalysée par l'acide chlorhydrique, la solution présente un PH acide de l'ordre de 2. Il faut donc travailler avec un ferrofluide stable dans cette zone de PH. Or les nanoparticules de ferrite de Cobalt ne sont pas stables en l'état en solution acide. Ainsi, une fois synthétisées par co-précipitation d'hydroxydes de Fe(III) et Co(II), elles sont traitées par du nitrate de fer qui passive leur surface et évite leur dégradation en milieu acide [TOU90]. Il devient alors possible d'obtenir un ferrofluide stable en milieu acide [LEF98], avec des concentrations volumique qui peuvent atteindre 10%. La taille moyenne des nanoparticules utilisées est de l'ordre de 10 nm, leur forme restant de type « cailloux » (Figure 3.6).

Une fois le sol-dopé, il est filtré à $0,2\ \mu\text{m}$, et utilisé pour obtenir des films minces par dip-coating. Les traitements thermiques et UV sont ensuite appliqués. Pour ce type de matériau basé sur l'utilisation d'une matrice organique-inorganique, la concentration finale ϕ en nanoparticules dans le matériau atteint un maximum de l'ordre de 2%. Au-delà, le dopage perd en qualité.

3.2. Propriétés du matériau en couches minces

Cette partie est désormais consacrée aux résultats de caractérisations optiques et magnéto-optiques menées sur les couches minces dopées et élaborées selon le principe précédent.

3.2.1. Couches minces guidantes

Les couches minces dopées devant servir à la réalisation de structures guidantes, il faut s'assurer de la qualité de la dispersion et vérifier la capacité de guidage. Tout d'abord, l'image MEB reportée sur la Figure 3.7 montre la bonne distribution des nanoparticules au sein de la matrice d'oxyde métallique. Cette répartition est aléatoire avec une absence d'agrégat, ce qui garantit une absence de diffusion de la part des nanoparticules.

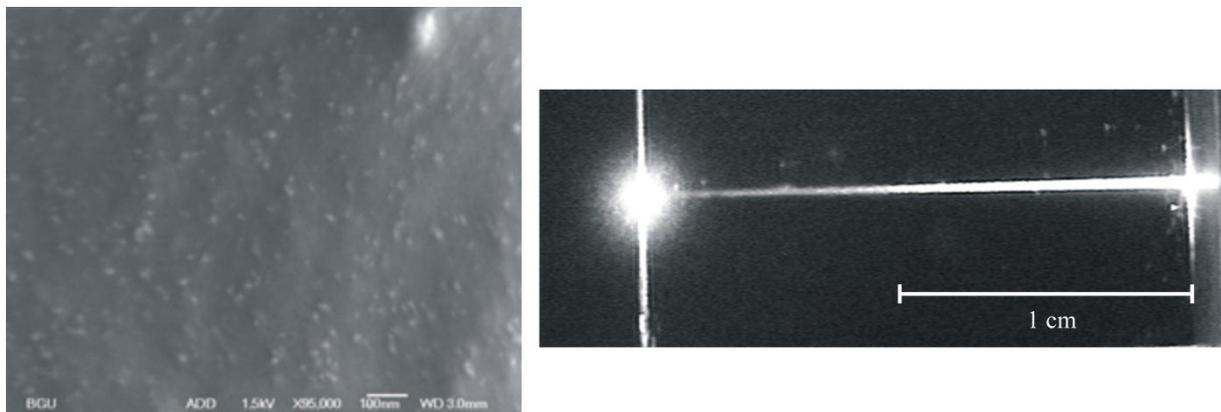


Figure 3.7 : *Gauche* : Image de microscope électronique à balayage illustrant la bonne distribution des nanoparticules dans la matrice hôte. *Droite* : Trait de guidage observé dans une couche dopée à 0,1% pour une longueur d'onde de 820 nm.

D'autre part, l'image du trait de guidage reportée sur la même figure, montre que la propagation de la lumière est possible sur plusieurs centimètres à la longueur d'onde 820 nm. Cela atteste qu'il n'y a pas de fissures dans la matrice susceptible d'empêcher cette propagation. C'est un élément indispensable pour réaliser des structures « guidantes ». Cette image, obtenue dans une couche mince dopée à 0,1 % et déposée sur un substrat de pyrex, montre l'atténuation de la lumière au cours de la traversée du matériau. En

analysant la décroissance exponentielle de la lumière, on peut en déduire un coefficient d'atténuation de 29 dB/cm, soit 290 dB/cm/% si on le ramène à la concentration volumique en nanoparticules. Par comparaison, le coefficient d'atténuation que l'on peut déduire de la Figure 3.2 à la même longueur d'onde est de 340 dB/cm/%. Il est intéressant de voir que le dopage, puis le dépôt en couche mince, n'ont pas généré une augmentation de l'absorption. Une valeur plus faible indique simplement que le mode guidé n'est pas totalement confiné dans la couche mince dopée, mais aussi un peu dans le substrat, ce qui réduit son atténuation par rapport au matériau en volume. Nous avons d'ailleurs toujours observé que l'atténuation des modes supérieurs moins confinés dans la couche magnéto-optique est inférieure à celle du mode fondamental [CHO08].

3.2.2. Biréfringence

La biréfringence de mode TE/TM est une des caractéristiques clé des convertisseurs de modes magnéto-optiques. Comme indiqué au paragraphe 2.1.2, elle peut limiter fortement l'efficacité de conversion de mode magnéto-optique. De façon générale, dans une structure guidée cette biréfringence de mode ΔN peut être décomposée de la façon suivante [DAM86] :

$$\Delta N = \Delta N_{géo} + \Delta n_i$$

$\Delta N_{géo}$ est la biréfringence géométrique ou biréfringence de guidage qui existe même si le matériau constituant le guide est isotrope. Elle est dûe au confinement de la lumière entre différentes interfaces qui ont un impact différent sur l'onde selon sa polarisation. Sa valeur dépend donc des caractéristiques opto-géométriques de la structure et de la longueur d'onde de travail. Par exemple, plus l'écart d'indice entre le cœur et le substrat est important, plus cette biréfringence est grande.

Δn_i est la biréfringence intrinsèque du matériau constituant le guide d'onde. Elle peut être due à une anisotropie cristalline de ce matériau, ou plus classiquement en couches minces, aux contraintes résiduelles au sein de la couche. De plus, dans le cas des couches dopées par des nanoparticules magnétiques optiquement anisotropes, une anisotropie des particules peut contribuer à cette biréfringence.

Le Tableau 3.1 donne une comparaison des niveaux de biréfringence observés pour le mode fondamental dans les couches sol-gel réalisées soit par un sol-gel minéral (cadre de ma thèse avant 2004), soit par un sol gel hybride organique-inorganique. La biréfringence de mode est mesurée directement au M-lines avec une incertitude de 10^{-4} , et la biréfringence géométrique est calculée à partir des valeurs d'indice et d'épaisseur. On peut ensuite en déduire la biréfringence intrinsèque. Ce tableau montre que la biréfringence géométrique n'est pas d'influence notable, et c'est la biréfringence

intrinsèque qui contribue quasiment entièrement à la biréfringence de mode. Le résultat important est que le passage à une matrice sol-gel organique-inorganique permet de baisser d'un facteur 10 la valeur de la biréfringence. Il faut pour cela utiliser un traitement UV doux avec une densité de puissance de $1\text{mW}/\text{cm}^2$. Ce traitement UV est précédé d'un traitement thermique de 90°C pendant 1H. Ce type d'enchaînement « thermique puis UV » est celui qui contribue à créer la biréfringence la plus faible [CHO08]. Pour assurer, néanmoins, qu'un tel traitement « doux » conduit à une bonne finalisation de la couche, nous avons fait une étude de vieillissement qui a montré qu'une durée d'insolation de 20 min assure la stabilité de l'indice de la couche dans le temps [CHO08].

	Sol gel minéral sans traitement UV	Sol-gel hybride Traitement UV « dur »	Sol-gel hybride Traitement UV « doux »
Indice	1,57	1,5 – 1,54	1,5 – 1,54
Épaisseur	1,9 μm	3 – 6 μm	3 – 6 μm
ΔN_0	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$\Delta N_{géo}$	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}	10^{-5}
Δn_i	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

Tableau 3.1 : Comparaison des valeurs de biréfringences des modes fondamentaux entre la matrice sol-gel minéral et hybride organique-inorganique. Les mesures sont effectuées par la technique Mlines à 633 nm. Le traitement « dur » correspond à une densité de puissance de $1\text{ W}/\text{cm}^2$, alors que le traitement « doux » correspond à une densité de $1\text{mW}/\text{cm}^2$.

Sur la Figure 3.8, sont reportées les biréfringences des modes fondamentaux de couches minces de $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ dopées par des nanoparticules magnétiques pour deux niveaux de concentration en particules et différentes orientations du champ magnétique appliqué pendant l'élaboration des couches (dépôt, traitement thermique et UV).

De la même façon que ce que j'avais observé sur les couches minérales, l'application d'un champ magnétique pendant la gélification induit une modification de la biréfringence de mode [ROY05]. Cela est dû à l'anisotropie cristalline des nanoparticules qui possèdent un axe optique dont la direction est confondu avec celle de son axe de facile aimantation. Durant la phase de gélification, les particules ne sont pas encore figées et l'application d'un champ magnétique oriente les moments magnétiques des particules et, par là même les axes optiques. Cela créé donc une anisotropie Δn_p au sein de la couche en augmentant l'indice dans la direction du champ [JAM01]. Si le champ est perpendiculaire, l'indice transverse est augmenté ce qui augmente l'indice effectif du mode TM et réduit la biréfringence. Cet effet d'orientation a été vérifié par des mesures d'ellipsométrie en transmission qui valident ce raisonnement.

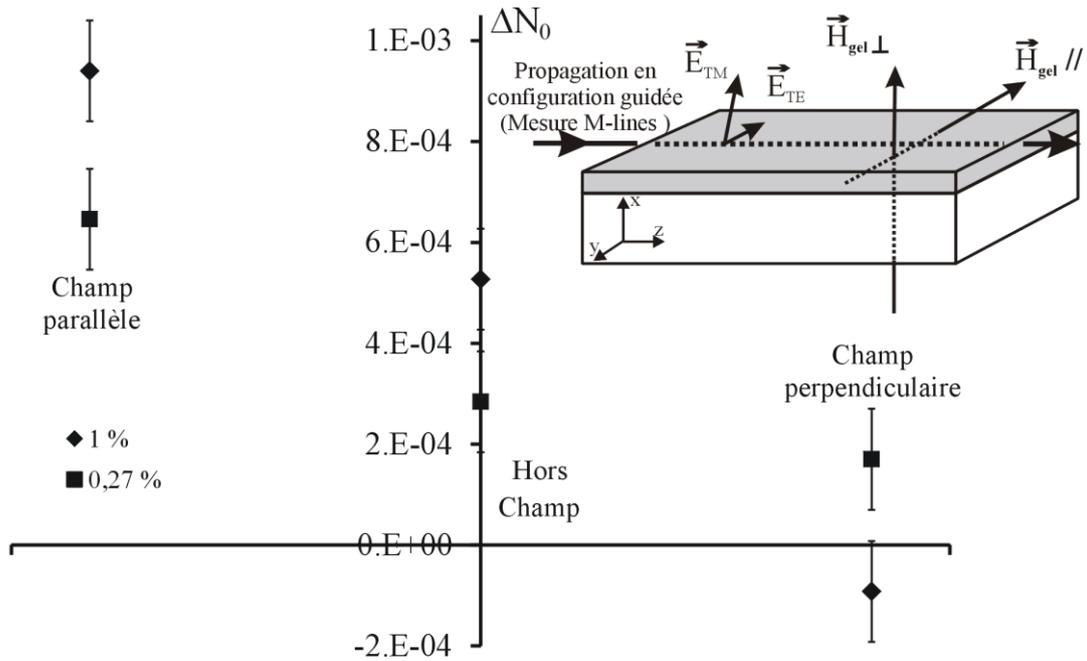


Figure 3.8 : Biréfringence modale à 820 nm de couches mince de $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ dopées par des nanoparticules de ferrite de cobalt avec une concentration volumique de 0,27 ou 1%. La biréfringence est donnée en fonction de la direction du champ magnétique (0,5T) appliqué pendant l'élaboration. Le schéma en insert explicite les directions de champ magnétique de gélification et l'orientation des champ électriques TE et TM.

L'effet d'orientation obtenu ici avec des nanoparticules de ferrite de cobalt est, en terme de biréfringence, plus faible que celui obtenu antérieurement avec la Maghémite. Cela est lié à l'anisotropie intrinsèque des nanoparticules de Maghémite qui est plus importante [DAV96]. Néanmoins, dans la mesure où le niveau de biréfringence « hors champ » est beaucoup plus faible, l'application d'un champ perpendiculaire permet ici d'inverser le signe de la biréfringence, ce qui offre la possibilité d'obtenir un accord de phase (biréfringence nulle) par ajustement de la valeur du champ. L'étude est ici faite à la longueur d'onde 820 nm dans une structure multimode sur la biréfringence du mode fondamentale pour laquelle la contribution géométrique est faible. Si l'on passe à 1550 nm, la structure devient monomode et cette biréfringence géométrique est plus élevée. Dans ce cas, comme illustré sur la Figure 3.9, l'application d'un champ magnétique perpendiculaire ne permet pas d'inverser le signe de la biréfringence, mais néanmoins de l'abaisser à une valeur de l'ordre de 10^{-4} . Cette figure montre également que l'amplitude de la variation de biréfringence induite par les particules Δn_p dépend de l'amplitude du champ avec une forme de saturation à fort champ caractéristique d'orientation magnétique.

Au final, suite à l'application d'un champ magnétique de gélification, la biréfringence de mode peut être décomposé en tenant compte de la contribution des particules au sein de la biréfringence intrinsèque :

$$\Delta N = \Delta N_{géo} + \Delta n_i = \Delta N_{géo} + \Delta n_c + \Delta n_p$$

où Δn_c est la biréfringence due aux contraintes.

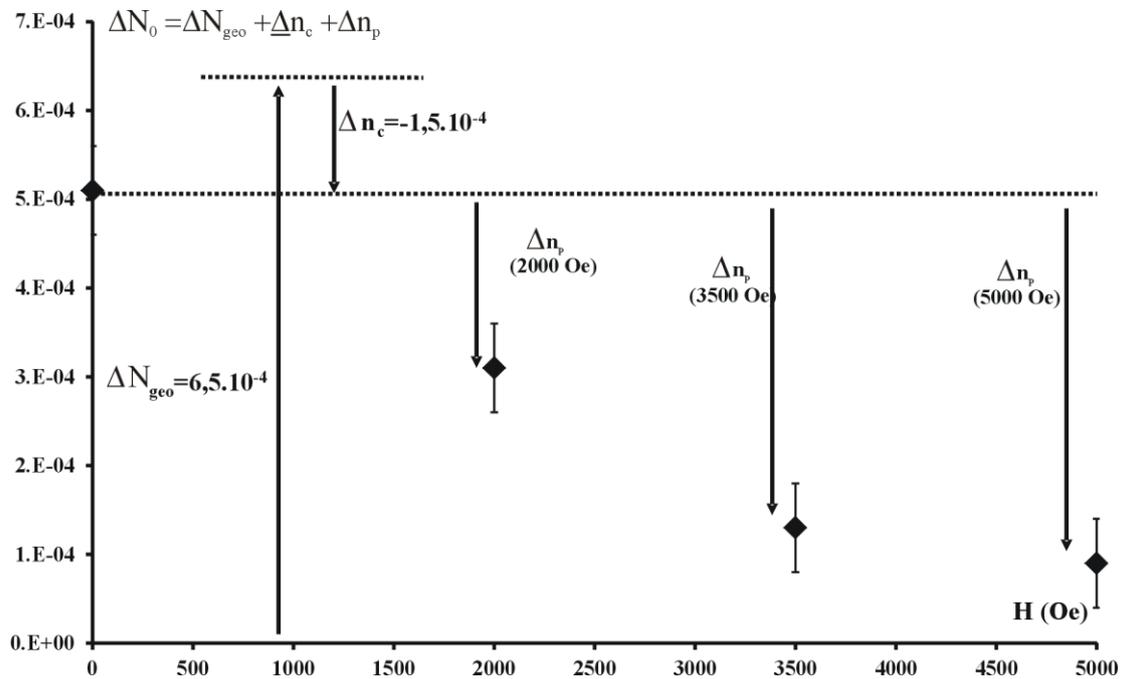


Figure 3.9 : Biréfringence modale mesurée à 1550 nm sur une couche mince de $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ dopée par des nanoparticules de ferrite de cobalt en fonction de l'amplitude du champ magnétique perpendiculaire appliqué pendant la gélification. La décomposition des différentes contributions de biréfringence est représentée.

3.2.3. Potentialité magnéto-optique

La fonction première du matériau composite déposé en couche mince est de produire des effets magnéto-optiques non réciproques que l'on souhaite appliquer aux composants. Ainsi, les propriétés magnéto-optiques du matériau composite sont illustrées sur la Figure 3.10 par la représentation de la rotation Faraday en fonction du champ magnétique appliqué. Cette rotation est mesurée ici en espace libre dans la direction perpendiculaire au plan de la couche mince dopée. La rotation à saturation est de l'ordre de $250^\circ/\text{cm}$ à 820 nm pour un dopage de 1,5 %, ce qui correspond à une rotation de $310^\circ/\text{cm}$ pour la longueur d'onde 1550 nm. Par rapport aux couche minces dopées en Maghémite réalisées pendant ma thèse, la rotation Faraday est augmentée de plus de 10 fois : $310^\circ/\text{cm}$ à 1,5 % contre $30^\circ/\text{cm}$ à 2%. De plus, cette amplitude d'effet est tout à fait comparable à celle obtenue avec un Grenat d'Yttrium et de Fer : $\sim 200^\circ/\text{cm}$ en massif à 1550 nm. Evidemment un YIG substitué à un effet plus important, mais il est intéressant de noter que par une approche composite avec une concentration inférieure à 2%, la rotation atteint des valeurs similaires au matériau magnéto-optique classique.

Cette amplitude de rotation Faraday est proportionnelle à la concentration volumique en nanoparticules, et nous pouvons reprendre pour le composite la relation obtenue pour les particules en suspension à savoir : $\theta_F(^{\circ}/cm/\%) = 200$ (@ 1550 ou 750 nm).

Nous verrons au chapitre 6 que nous avons par exemple augmenté la rotation Faraday spécifique à plus de $6000^{\circ}/cm$ en augmentant la concentration à des taux de supérieurs à 30%. La courbe de la Figure 3.10 montre également la présence d'un cycle d'hystérésis sur la rotation. Cet effet, dû à l'anisotropie magnétique des nanoparticules de ferrite de Cobalt, sera analysé plus en détail au paragraphe suivant.

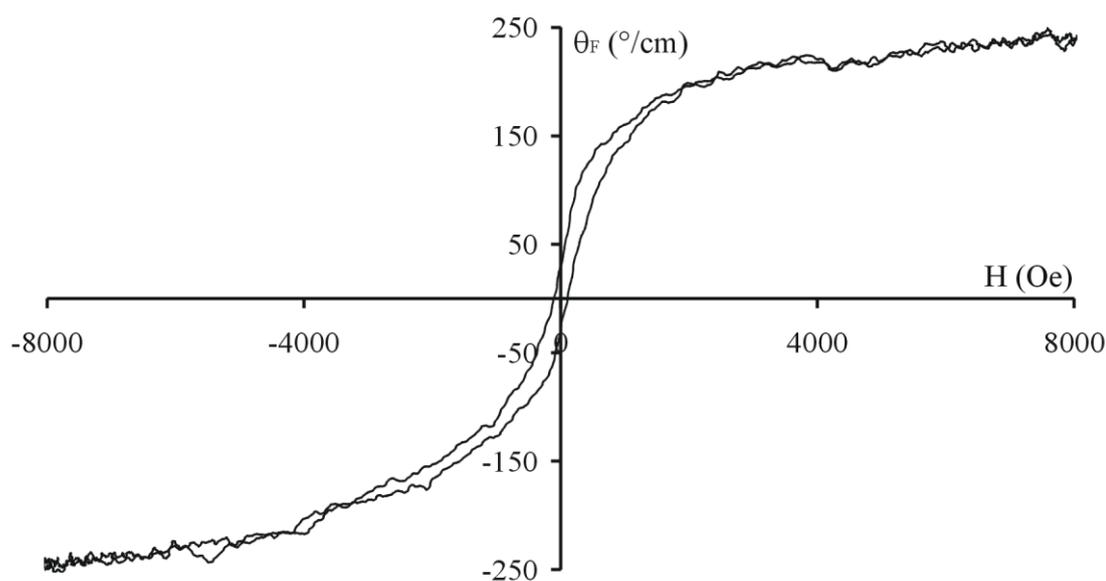


Figure 3.10 : Rotation Faraday spécifique $\theta(^{\circ}/cm)$ d'une couche magnéto-optique en fonction du champ appliqué. La concentration volumique en nanoparticules ($\sim 9nm$) dans la couche est de 1,5% pour une longueur d'onde de mesure de 820 nm.

Plus généralement, l'absorption et la rotation Faraday dans les couches minces sont donc liées aux nanoparticules de la même façon que lorsqu'elles ont en suspension, le facteur de mérite représenté en suspension Figure 3.3 reste valable pour les couches minces. La vérification expérimentale a évidemment été faite.

En terme de capacité de ce matériau composite à jouer le rôle de convertisseur de mode magnéto-optique, il est désormais possible d'évaluer le bénéfice que nous avons obtenu en passant d'une matrice sol-gel minérale dopée en nanoparticules de maghémite à une matrice organique-inorganique dopée en ferrite de cobalt. En se basant sur une concentration en nanoparticules de 2% dans les deux cas, et en assimilant la rotation Faraday intrinsèque au coefficient de couplage TE/TM κ , sont tracés sur la Figure 3.11 les rendements maximaux de conversion en fonction de la biréfringence de mode. Une biréfringence de l'ordre de 10^{-3} obtenu dans une matrice minéral/maghémite produit un rendement très faible, bien inférieur à 0,5. Il faudrait une biréfringence de 10^{-5} pour

atteindre cette valeur. Par contre la biréfringence de l'ordre de 10^{-4} obtenue dans la matrice hybride/ferrite de cobalt, produit des rendements qui peuvent dépasser 0,5. Cela montre, au final, tout l'intérêt de l'attention portée au développement de ce matériau composite afin qu'il devienne capable de produire des effets de rotation de polarisation non-réciproques intéressants. Nous verrons au chapitre suivant que les structures hybrides permettent de réduire encore la biréfringence de presque un ordre de grandeur, ce qui permet de gagner encore en efficacité de conversion.

Sur cette base de matériau composite en couche mince, il a été ainsi possible de démontrer une conversion de mode TE/TM dans un guide planaire par couplage par prisme [ROY11]. Cela a permis de valider l'approche avant de l'appliquer aux structures hybrides.

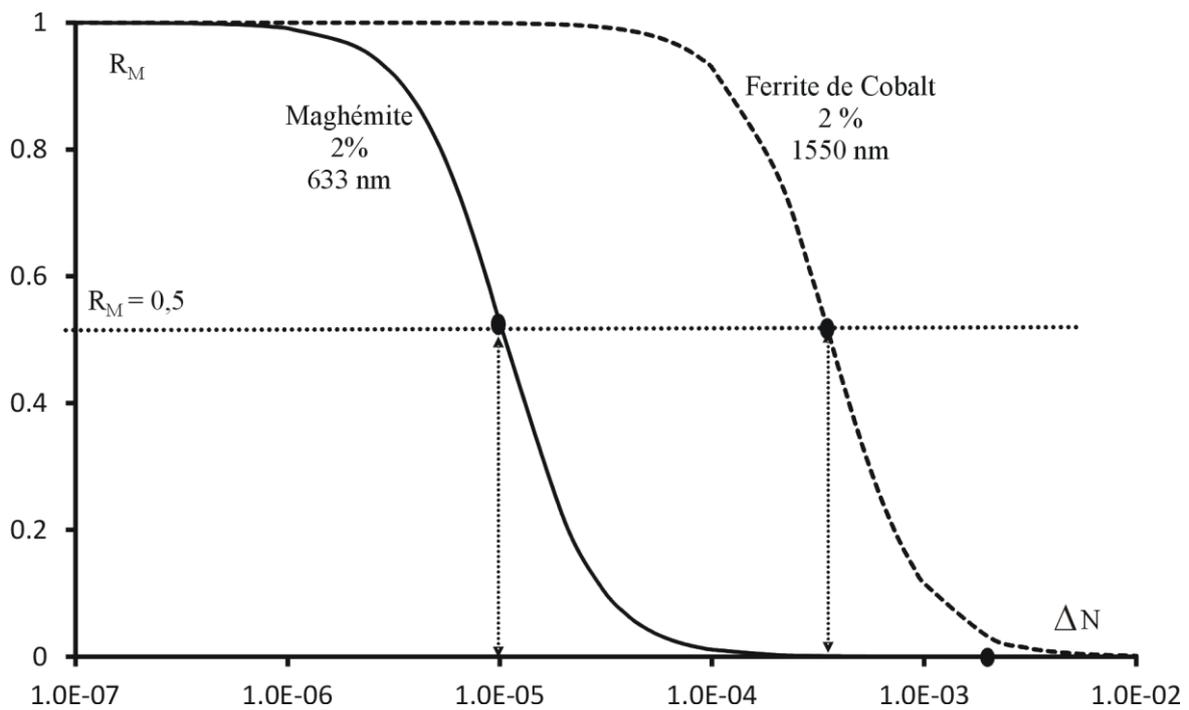


Figure 3.11 : Evolution du rendement maximal de conversion R_M en fonction de la biréfringence modale pour deux valeurs distinctes de coefficient de couplage correspondant à deux dopage à 2% en nanoparticules de maghémite (633 nm) et ferrite de cobalt (1550 nm).

3.2.4. Hystérésis magnétique

Une autre spécificité de l'emploi de nanoparticules de ferrite de cobalt par rapport à la maghémite est l'apparition d'un cycle d'hystérésis sur les courbes de rotation Faraday des couches dopées. Pour que cela soit plus visible, sont représentées sur la Figure 3.12, les rotations Faraday normées en suspension liquide et en couches minces dopées de

nanoparticules de ferrite de cobalt de taille moyenne 12 nm. En suspension, il n'y a aucune hystérésis alors qu'en couches minces dopées où les nanoparticules sont bloquées, un cycle apparaît avec un coercitif H_c et une rotation rémanente θ_R . L'intérêt fondamental de la présence de ce cycle d'hystérésis vient du fait que l'on obtient un matériau auto-polarisé : même sans application d'un champ magnétique, une rotation Faraday rémanente existe. Cela signifie que sur un composant éventuel utilisant ce matériau, aucun aimant ne doit être intégré par-dessus le dispositif pour le polariser magnétiquement. Evidemment, il est indispensable que la rotation rémanente soit suffisante, mais cela enlève une étape technologique difficile pour l'intégration.

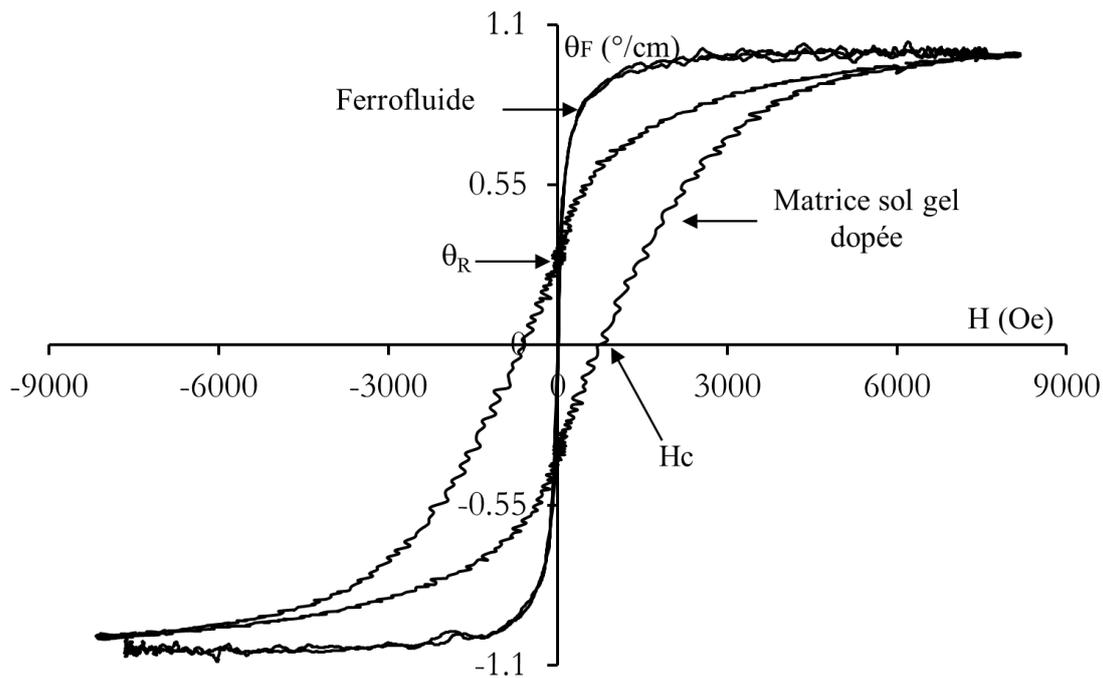


Figure 3.12 : Comparaison entre la rotation Faraday de nanoparticules magnétiques de ferrite de Cobalt dans l'eau (ferrofluide), et bloquée dans une matrice solide d'oxyde métallique (Matrice sol-gel dopée). L'échelle de rotation en ordonnée est arbitraire.

Pour comprendre l'origine physique de ce phénomène, il faut s'intéresser aux propriétés magnétiques des nanoparticules de ferrite de cobalt. Du point de vue magnétique, une nanoparticule est monodomaine et porte un moment magnétique \vec{m} dont la norme est proportionnelle à la taille de la particule et à l'aimantation à saturation du matériau $|\vec{m}| = m_s \cdot V$. Si le matériau est soumis à un champ magnétique \vec{H} , le moment magnétique a tendance à s'orienter le long de ce champ sous l'effet de l'énergie d'interaction Zeeman E_Z :

$$E_Z = -\mu_0 \cdot \vec{m} \cdot \vec{H} = -\mu_0 \cdot m_s \cdot V$$

Plus la taille de la particule est importante, ou plus le champ est important, plus cette interaction est forte et plus le moment s'oriente le long du champ. Dans une assemblée de

nanoparticules, une fois que tous les moments sont orientés, l'aimantation globale atteint une saturation. Cet effet d'interaction explique les courbes en champ de la rotation Faraday qui est proportionnelle à l'aimantation avec une pente à faible champ et une saturation à fort champ.

De plus, ce moment magnétique possède au sein de la nanoparticule un axe de facile aimantation. La vigueur du lien entre le moment magnétique et son axe de facile aimantation est donnée par l'énergie d'anisotropie E_a liée à la constante d'anisotropie magnéto-cristalline du matériau et au volume de la particule [TRE99]:

$$E_a = K_V \cdot V$$

L'énergie d'agitation thermique $K_B \cdot T$ intervient évidemment dans les mécanismes d'orientation du moment et de la particule. Dans le cas de nanoparticules de ferrite de cobalt de taille supérieure à 9 nm, E_a est très grande devant $K_B \cdot T$ et le moment magnétique est ainsi fortement lié à son axe de facile aimantation. On parle de dipôle rigide. Pour les particules de taille plus faible, le lien est moins marqué et l'agitation thermique éloigne le moment de son axe de facile aimantation.

On peut alors expliquer la différence de comportement observé sur la Figure 3.12 entre la suspension et la couche dopée. Dans le cas de la suspension (Figure 3.13), en l'absence de champ l'agitation thermique induit un brassage des nanoparticules et de leur moment et aucune aimantation globale n'apparaît. Lors de l'application d'un champ magnétique, l'énergie Zeeman oriente dans la direction de celui-ci le moment magnétique qui, à son tour, oriente la particule en attirant l'axe de facile aimantation (représentée en pointillé sur les schémas). Ainsi, une aimantation globale apparaît. Si on coupe le champ, l'agitation thermique refait disparaître les orientations et l'aimantation redevient nulle.

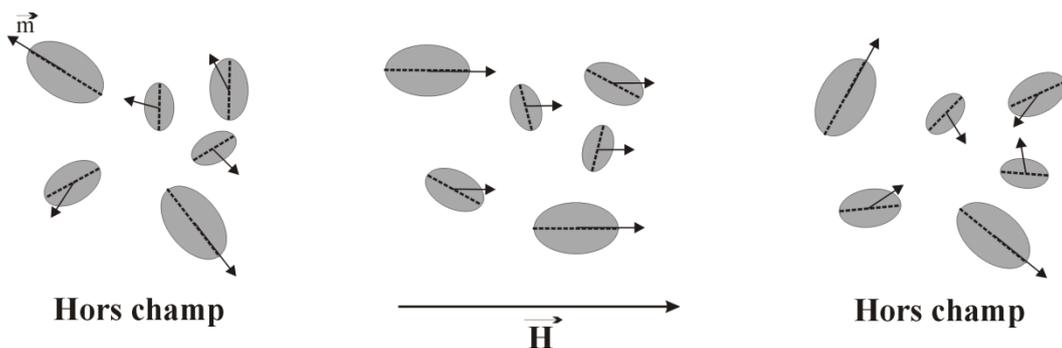


Figure 3.13 : Représentation schématique des effets d'orientation des nanoparticules magnétiques dans le cas d'une suspension dans un liquide. La direction de l'axe de facile aimantation est représentée en pointillé pour chaque particule.

Dans le cas de la matrice dopée (Figure 3.14), les mêmes phénomènes existent mais cette fois-ci, les particules sont bloquées ce qui fige les axes de facile aimantation : seuls les moments magnétiques peuvent bouger. Les conséquences sont les suivantes :

- Il faut un champ plus important que dans le cas de la suspension pour saturer le matériau puisque l'énergie Zeeman doit lutter contre l'énergie d'anisotropie.
- Après application d'un champ de saturation, les dipôles les plus rigides reprennent une orientation selon l'axe de facile aimantation mais dans la direction la plus proche de la direction du champ de saturation. Ainsi, il reste une aimantation globale rémanente, donc une rotation Faraday rémanente.

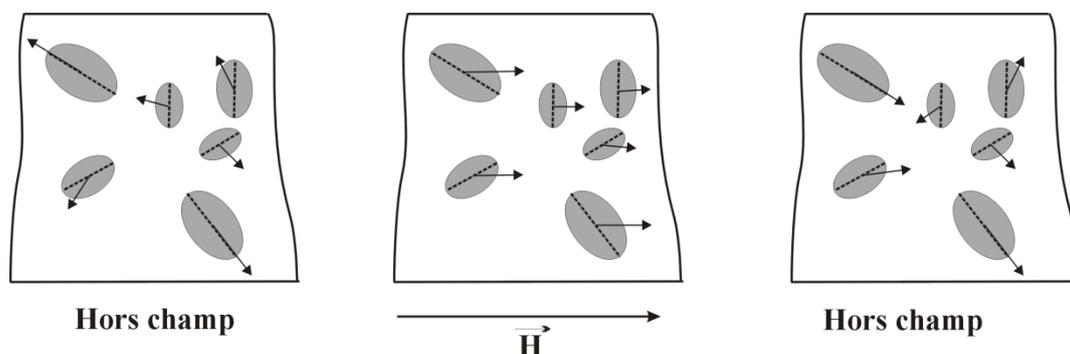


Figure 3.14 : Représentation schématique des effets d'orientation des nanoparticules magnétiques dans le cas où elles ont bloquées dans une matrice sol-gel.

Cette illustration montre que la rémanence finale de l'aimantation et donc de la rotation tient à l'orientation du moment magnétique des plus grosses particules. Cela se retrouve dans les éléments rassemblés dans le Tableau 3.2, où l'on observe que plus la taille augmente plus la rotation rémanente et le champ coercitif augmentent.

Taille moyenne	5,5 nm	9 nm	12 nm
θ_R/θ_S	0	0,11	0,4
H_c en Oe	0	110	700 Oe

Tableau 3.2 : Rotation Faraday rémanente ramenée à la saturation, et champ coercitif associé pour des couches minces dopées avec des nanoparticules de différentes tailles.

Les résultats de biréfringence du paragraphe 3.2.2 ont montré que l'application d'un champ magnétique durant la gélification permettait d'orienter les nanoparticules et générait une anisotropie de particules. L'axe de facile aimantation est en fait confondu avec l'axe d'anisotropie optique de ces nanoparticules, et orienter l'axe optique revient à orienter l'axe de facile aimantation. Ainsi, le cycle de rotation Faraday peut être modifié par l'application d'un champ magnétique pendant la phase de gélification comme reporté sur la Figure 3.15. Si le champ de gélification est de direction perpendiculaire au plan de la couche, les axes de faciles aimantations des particules sont donc orientés majoritairement dans cette direction qui est aussi la direction de mesure. La rémanence augmente à une valeur de 0,6 par rapport à 0,4 pour la couche « hors champ », ainsi que le champ coercitif. Dans la direction opposée, la rémanence et le champ coercitif sont inférieurs.

Dans l'optique d'une utilisation de ce matériau comme matériau magnéto-optique auto-polarisé, on remarque que l'on peut ainsi maximiser la rémanence à 60 % de l'effet à saturation.

Ces mesures de cycle d'hystérésis sur la rotation Faraday en fonction de la taille des nanoparticules ou de l'orientation ont été validé par des mesures d'aimantation faite par SQUID à l'Académie Slovaque des Sciences de Kosice sur les mêmes échantillons.

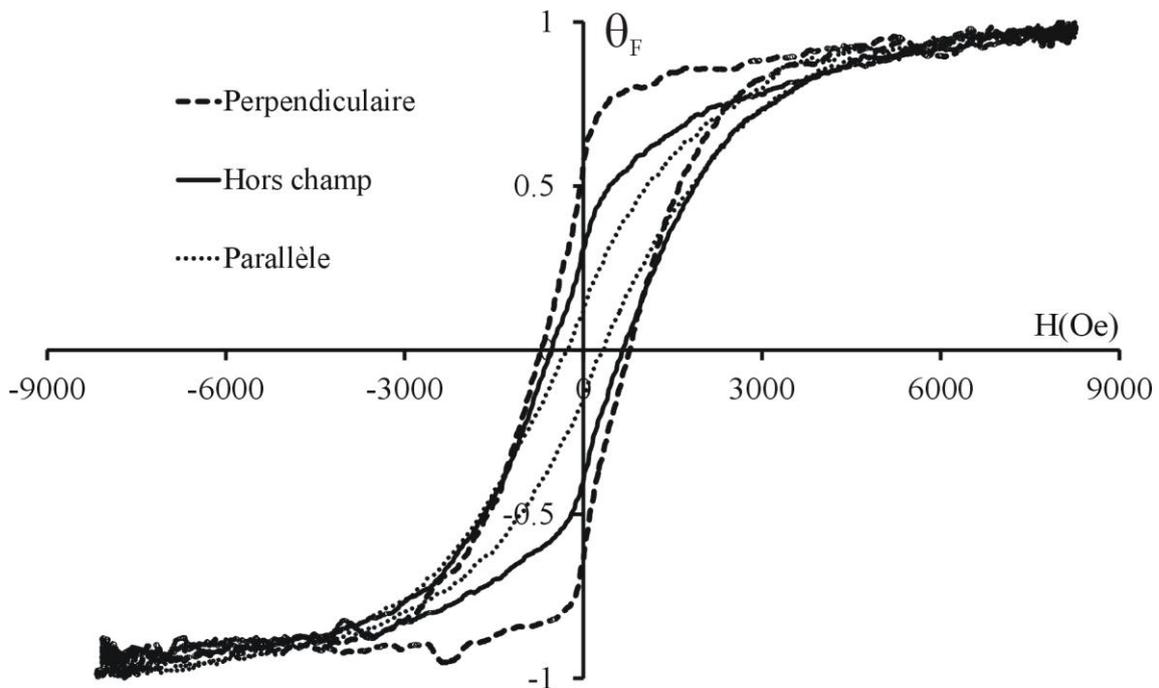


Figure 3.15 : Rotation Faraday normalisée de trois couches minces de $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ dopées par des nanoparticules de ferrite de Cobalt en fonction du champ magnétique de mesure. La légende indique la direction, par rapport au plan de la couche, du champ magnétique (0.5T) appliqué pendant la gélification.

Afin de conclure sur les propriétés du matériau composite développé depuis 2004, il est possible de ressortir les points suivants :

- L'utilisation de nanoparticules de ferrite de cobalt donne une rotation Faraday spécifique de $200^\circ/\text{cm}/\%$, et une atténuation de $100 \text{ dB}/\text{cm}/\%$ à 1550 nm . Le facteur de mérite associé à savoir $2^\circ/\text{dB}$ est identique à celui en solution.
- L'utilisation d'une matrice sol-gel organique-inorganique donne des niveaux de biréfringence de quelques 10^{-4} .
- La conjugaison de ces deux éléments donne une conversion magnéto-optique en configuration guidée dont l'efficacité n'est plus nulle, mais peut atteindre 50%.

- Les nanoparticules magnétiques de ferrite de Cobalt présentant un magnétisme dur, le matériau composite présente une rémanence d'effet Faraday qui peut atteindre 0,6 par orientation magnétique lors de la gélification.

Parallèlement aux études sur le composite, nous avons continué à mener des travaux plus amont sur les propriétés des nanoparticules magnétiques dans l'optique de pouvoir faire évoluer à terme les potentialités magnéto-optiques de notre matériau.

3.3. Etudes prospectives d'autres particules

Cette dernière partie présente l'étude des potentialités magnéto-optiques de trois types de nanoparticules (ferrite de cobalt, YIG et magnétosomes). Les matériaux composites correspondants sont en cours de développement et l'objectif scientifique de ces études prospectives est de vérifier leur intérêt pour nos applications. En d'autres termes, on cherche à définir si ces nouveaux matériaux pourraient présenter des facteurs de mérite intéressants ou encore une autopolarisation.

3.3.1. Nanoparticules de ferrite de cobalt

Une première étude est dédiée aux nanoparticules de ferrite de Cobalt. En effet, j'avais pu observer pendant ma thèse, que la taille des nanoparticules en suspension dans l'eau jouait un rôle sur leurs propriétés optiques et magnéto-optiques. De même, les cycles d'hystérésis de rotation Faraday des nanoparticules bloquées dans la matrice sol-gel (paragraphe 3.2.4) possèdent également une dépendance à la taille. Nous avons donc souhaité consacrer une étude plus complète aux propriétés physiques des nanoparticules de ferrite de cobalt. Ce travail s'effectue notamment au travers de la thèse de Nandigum Lamaï Hubert, enseignant Tchadien, financé par l'Agence Universitaire Francophone à raison de 5 mois par an en France. Par deux séjours au laboratoire consacrés principalement à la prise en main des techniques de dopage et d'élaboration mais aussi des moyens de mesures, une première étude systématique a été réalisée. Des analyses doivent encore être faites mais un élément important semble se dégager. Il est illustré sur la Figure 3.16 représentant le facteur de mérite en fonction de la longueur d'onde pour trois solutions de nanoparticules de ferrite de cobalt dans l'eau. Les nanoparticules de taille 5 et 10 nm présentent une allure de facteur de mérite semblable à celle de la Figure 3.3 avec une valeur de l'ordre de 2-2,5°/dB autour de 1500 nm, ce qui signifie environ 20 dB pour 45° de rotation. Par contre, les nanoparticules de ferrite de cobalt de taille 20 nm ont un facteur qui atteint presque 5°/dB, soit 9 dB pour 45° de rotation. C'est une différence

fondamentale en vue de l'application de notre matériau aux isolateurs optiques. Avec ce type de particules les pertes dues à l'absorption du matériau pourraient être divisées par 2.

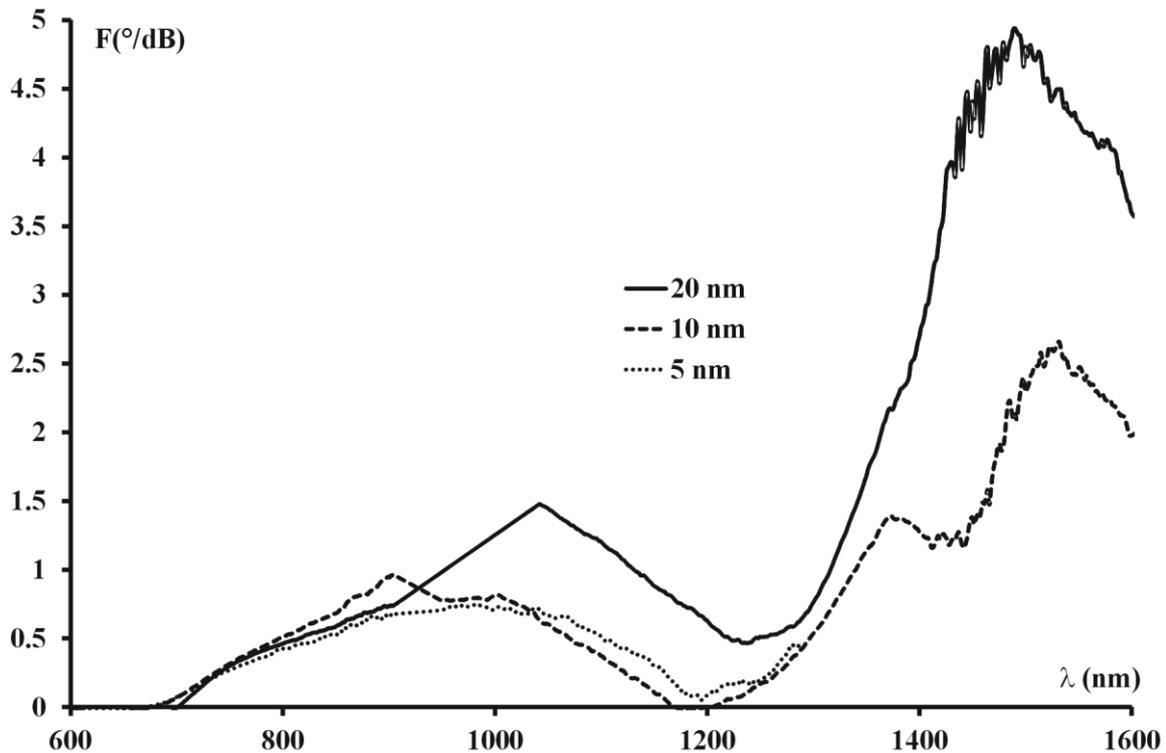


Figure 3.16 : Facteur de mérite magnéto-optique en fonction de la longueur d'onde pour trois types de nanoparticules de ferrite de cobalt en suspension dans l'eau.

Ces nanoparticules de 20 nm ont été préparées par une nouvelle méthode d'élaboration qui consiste à appliquer un traitement hydrothermal après l'étape de coprécipitation. L'équipe de PECSA a montré que cette méthode fournit des nanoparticules plus grosses, mais surtout avec une meilleure qualité cristalline [CAB11]. Pour nous, cela semble signifier que le facteur de mérite est bien meilleur et nous ouvre une porte importante vers l'amélioration de la qualité magnéto-optique de notre matériau. Il faut aussi désormais s'attacher à vérifier la qualité du dopage et des propriétés magnéto-optiques en matrice solide.

Les travaux de nos collègues ont également montré que ce traitement modifie les propriétés magnétiques ainsi que la forme des particules avec une allure plus « facettées » (voir insert Figure 3.17) [CAB11]. Les mesures de rotation Faraday effectuées sur des couches de silice dopées par ce type de particules montre un cycle d'hystérésis bien plus important que précédemment. Cependant, l'orientation magnétique augmente la valeur du champ coercitif mais par celle de la rotation rémanente qui reste de l'ordre de 0,6. Il y a là, néanmoins, un élément intéressant à creuser.

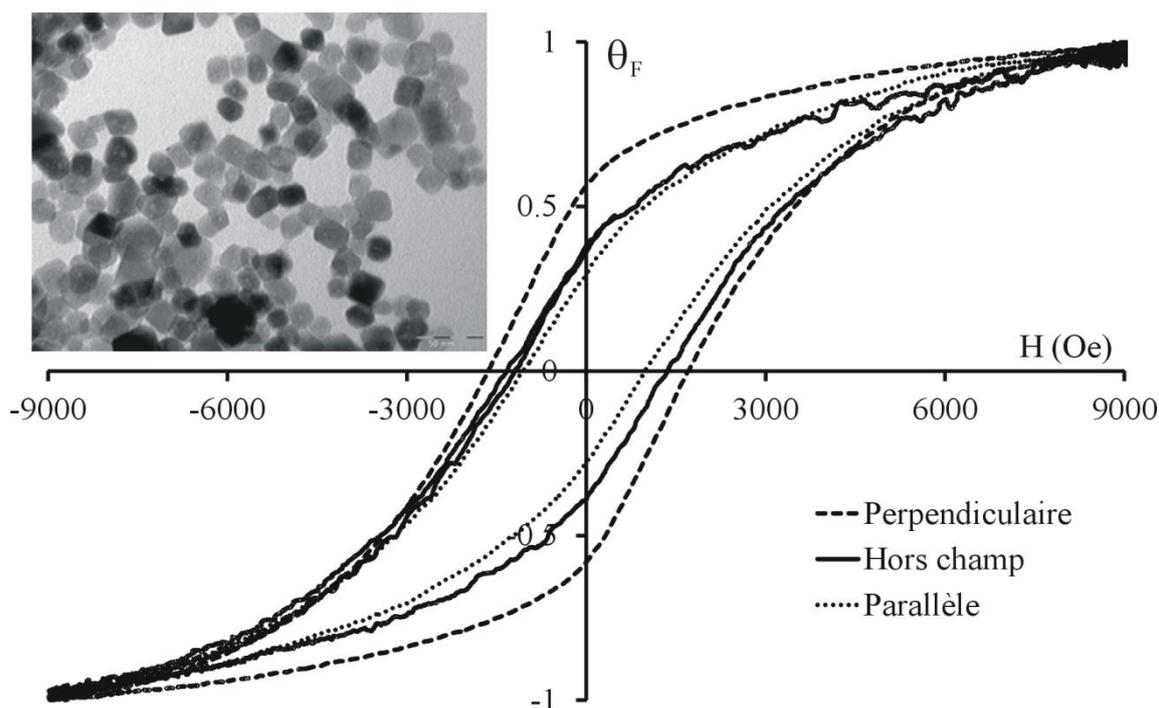


Figure 3.17 : Rotation Faraday normée d'une matrice $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ dopées par des nanoparticules de ferrite de cobalt synthétisées par bombe hydrothermal. L'image TEM en insert montre de telles nanoparticules.

3.3.2. Nanoparticules de YIG

D'après les éléments rassemblés dans le Tableau 2.1, le matériau connu présentant le meilleur facteur de mérite à 1550 nm est le Ce-YIG à $570^\circ/\text{dB}$, le YIG étant à $10,2^\circ/\text{dB}$. Dans l'optique d'améliorer les capacités de notre matériau, tout en restant sur une approche composite, il est apparu intéressant de se tourner vers les nanoparticules de YIG ou Ce-YIG. Mais synthétiser de telles nanoparticules de grenat est loin d'être aussi simple que les ferrites obtenues par co-précipitation à basse température. En effet, pour que le YIG possède les qualités requises, il doit, de la même façon qu'en couche mince, être cristallisé correctement et donc être traité à une température de l'ordre de 800°C [VAJ07]. Ainsi, même si une première étape de synthèse a permis l'obtention de particules de taille nanométrique, ce traitement provoque irrémédiablement des phénomènes d'agglomération conduisant à des particules de tailles micrométriques. Il faut ainsi trouver un moyen de réduire ensuite la taille des agglomérats.

Pour démarrer un tel travail de synthèse, nous avons débuté une collaboration avec le département de chimie de l'Université de Szeged en Hongrie. Il s'agit de l'équipe du Pr Etelka Tombacz qui travaille principalement à l'élaboration de nanoparticules magnétiques pour des applications biomédicales. E. Tombacz ayant effectué plusieurs séjours au laboratoire, les enjeux de la réalisation de telles nanoparticules ainsi que les

exigences pour réaliser des dopages de matrice sol-gel sont bien compris. Pour obtenir des particules de taille nanométrique après traitement thermique, son équipe utilise des équipements d'ultrasonication à haute puissance qui casse les agglomérats pour atteindre des particules de l'ordre de 20-50 nm. De telles particules ont ensuite pu être stabilisées en milieu acide. Même si la stabilité en solution n'est pas parfaite avec une tendance à « retomber » au fond des cellules, nous avons pu mesurer la rotation Faraday d'une suspension de nanoparticules de YIG de taille 20 nm. Elle est reportée sur la Figure 3.18 pour une mesure à 633 nm en fonction du champ magnétique appliqué. On retrouve une allure typique d'effet Faraday avec une pente à faible champ puis une saturation. La pente à faible champ est relativement forte ce qui s'explique par la grande taille des particules. Même si cette courbe est très bruitée, elle démontre l'activité magnéto-optique de ces particules et leur taille nanométrique. De plus, des mesures d'aimantation faites par SQUID à Kosice en Slovaquie ont confirmé le caractère magnétique des particules, ce qui démontre l'efficacité du traitement thermique.

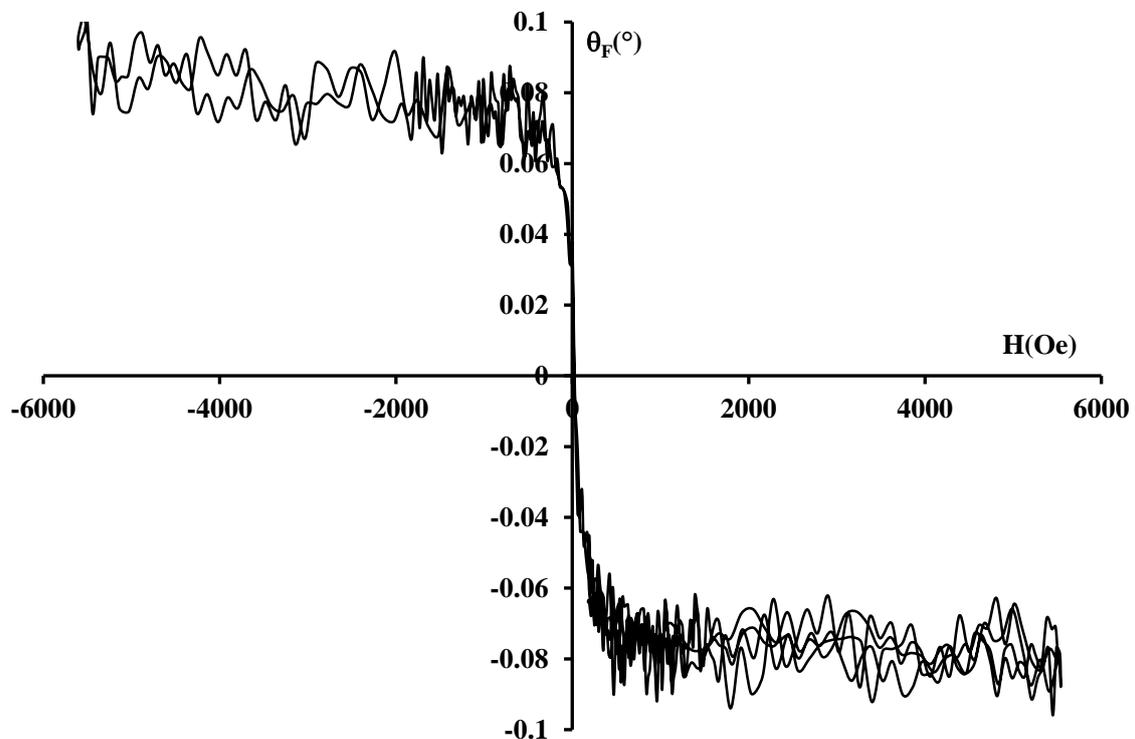


Figure 3.18 : Rotation Faraday en fonction du champ magnétique appliqué pour une solution de nanoparticules de YIG dans l'eau.

Les nanoparticules de YIG, qui avaient été mises en suspension dans un milieu acide, ont ensuite été utilisées comme dopant d'une préparation sol-gel. La rotation Faraday de la matrice d'oxyde $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ dopée par de telles nanoparticules est donnée sur la Figure 3.19 en fonction du champ magnétique, et sur la Figure 3.20 en fonction de la longueur d'onde. L'obtention d'une activité magnéto-optique dans une matrice dopée démontre la réussite de l'étape de dopage. On peut remarquer que la pente à faible champ est plus faible pour la matrice dopée rapport à la suspension. Cela est cohérent puisque les

particules étant bloquées, l'énergie d'anisotropie des nanoparticules oppose une résistance à l'alignement imposé par le champ.

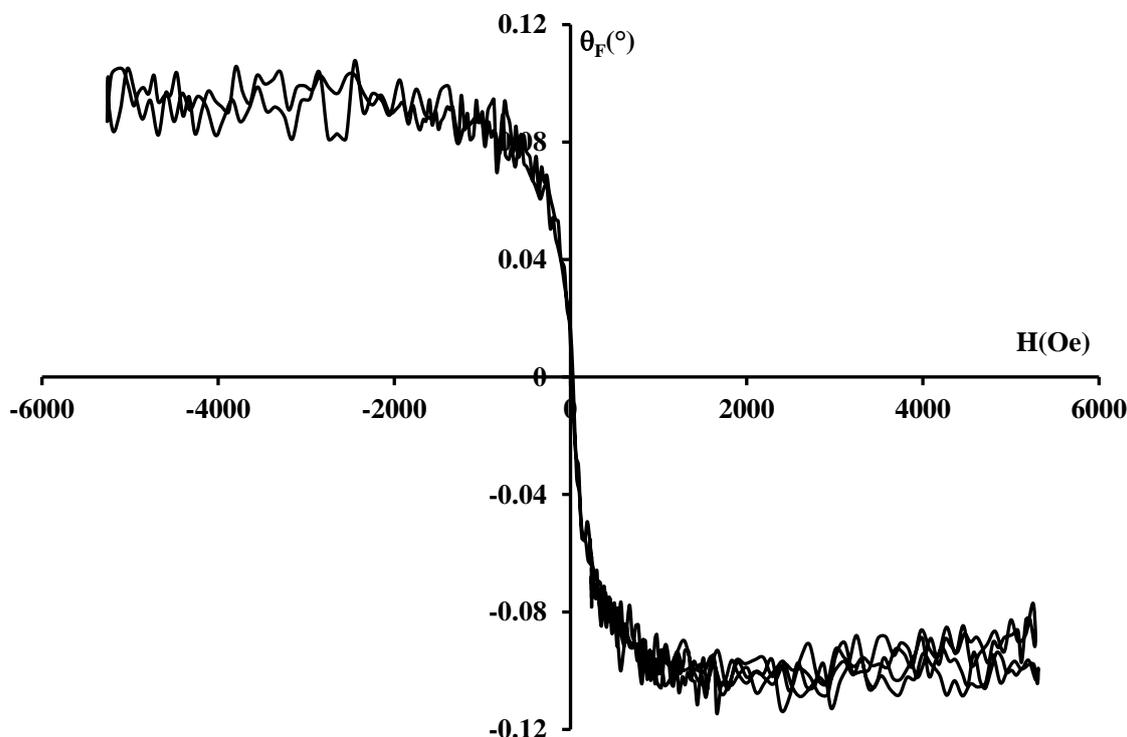


Figure 3.19 : Rotation Faraday en fonction du champ magnétique appliquée pour des nanoparticules de YIG dans une matrice solide de $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$.

De plus, le spectre de rotation Faraday obtenu est relativement similaire à celui d'un dépôt de YIG massif sur GGG, ce qui semble indiquer que la cristallographie des nanoparticules est correcte. Néanmoins, la faible valeur de rotation ne permet pas d'évaluer sa valeur dans la zone infrarouge.

Enfin, l'évaluation du facteur de mérite faite en liquide donne une valeur très faible de l'ordre de $0.01^\circ/\text{dB}$. Cela est certainement dû au fait que la mesure est en fait réalisée sur un surnageant de la solution, les particules ayant tendance à tomber.

Le bilan de cette étude très positive montre la capacité d'élaborer des nanoparticules de YIG de taille nanométrique, la capacité de doper des matrices sol-gel avec et de mettre en évidence une activité magnéto-optique dans le matériau dopé. Un article est en cours de rédaction avec nos collègues hongrois sur ces résultats.

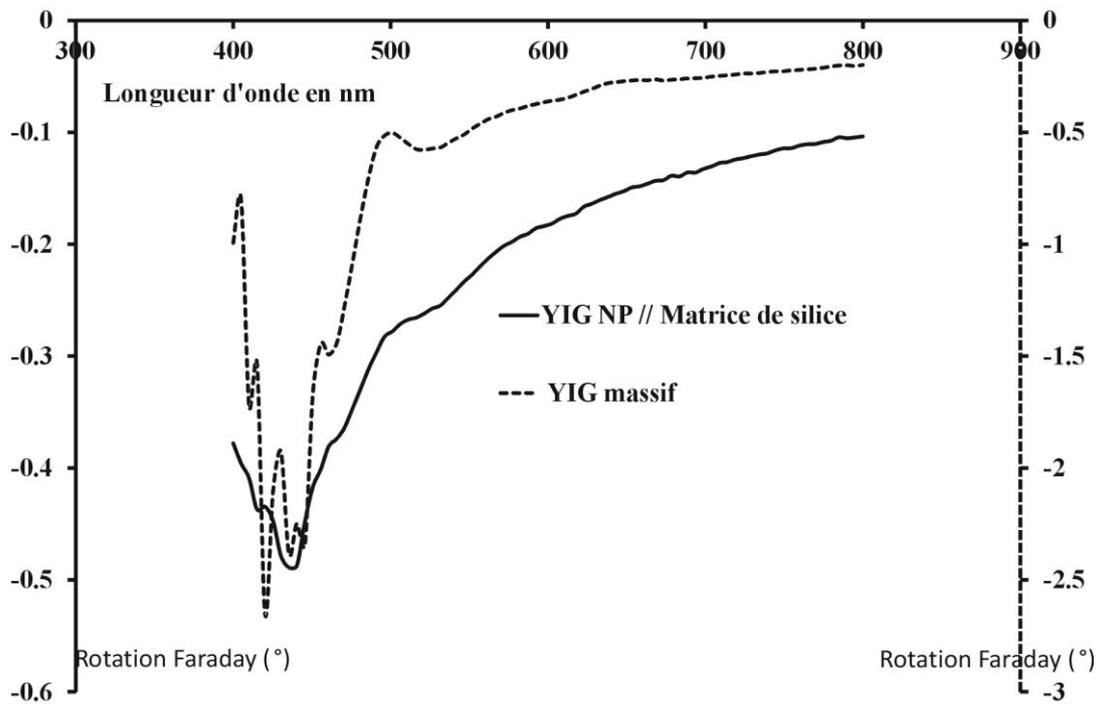


Figure 3.20 : Rotation Faraday à saturation en fonction de la longueur d'onde pour des nanoparticules de YIG dans une matrice solide de $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ et pour un film mince de YIG sur GGG.

3.3.3. Magnétosomes

Depuis l'Université Européenne d'été que nous avons organisée au laboratoire en septembre 2007 avec le soutien du Ministère des Affaires Etrangères et Européennes sur le thème « Magnetic Nanoparticles, Composite Materials and Optical Applications », j'ai gardé contact notamment avec l'Académie Slovaque de Kosice. Il s'agit de l'équipe du Professeur Milan Timko, qui travaille à l'élaboration et l'utilisation de nanoparticules magnétiques. Même si certains travaux ont un caractère relativement fondamental, les applications étaient historiquement tournées sur les huiles de transformateur à base de ferrofluides. Mais, depuis plusieurs années, de nouvelles applications sont désormais visées dans le domaine biomédical avec l'élaboration de nanoparticules magnétiques qui soient compatibles avec le corps humain pour l'administration ciblée de médicaments ou de l'hyperthermie [MOR02]. Les collègues ont souhaité, pour compléter les caractérisations physiques faites sur leurs échantillons, tester les propriétés magnéto-optiques. Nous avons donc mené des travaux par l'intermédiaire de deux programmes d'échanges Hubert Curien Stefanik du MAE, et également lors du séjour doctoral de trois mois d'Anezka Dzarova au laboratoire à l'automne 2009.



Nous avons ainsi mesuré les anisotropies magnéto-optiques de solutions de magnétosomes. Comme il est possible de la voir sur l'image MEB de la Figure 3.21, il s'agit de chaînes de particules de magnétite synthétisées par une bactérie, puis isolées de cette bactérie mais laissées au sein de leur membrane biologique pour assurer leur stabilité.

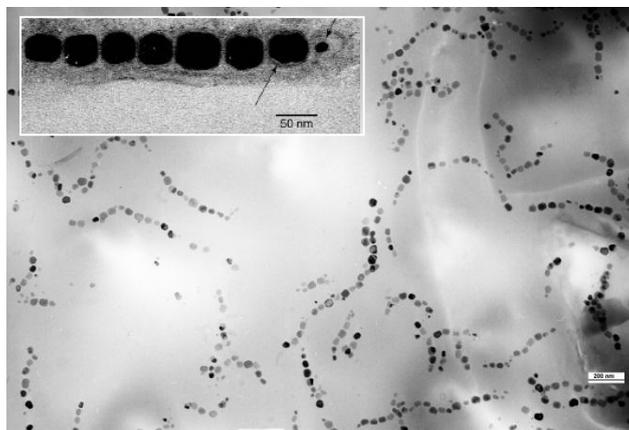


Figure 3.21 : Image MEB de chaînes de magnétosomes.

Au sein d'une chaîne, chaque particule est un monodomaine magnétique et porte un moment magnétique propre, mais vu la proximité de ces nanoparticules dans la chaîne, l'ensemble des moments sont orientés dans la même direction et forme un macro-moment magnétique. C'est ce que démontre la mesure de dichroïsme présentée sur la Figure 3.22 qui compare une solution de magnétosomes à une solution de nanoparticules magnétiques « classiques » de même taille.

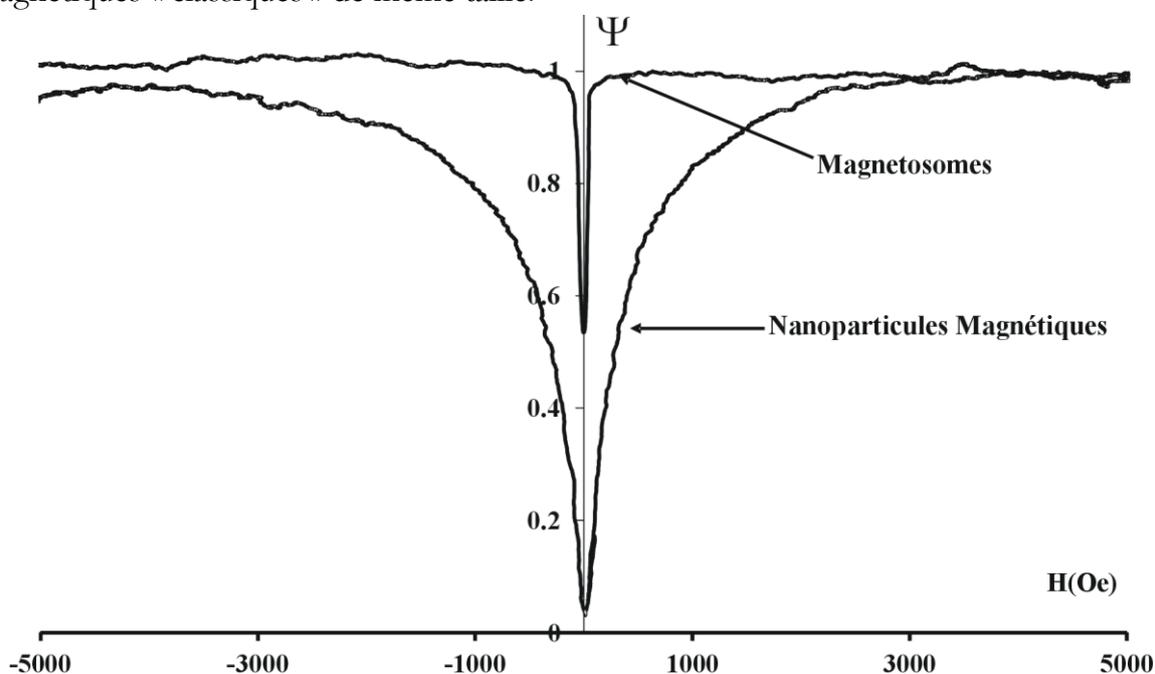


Figure 3.22 : Dichroïsme linéaire normé en fonction du champ appliqué, pour une solution de nanoparticules de magnétite dans l'eau et une solution de magnétosomes.

Là où il faut un champ magnétique d'environ 3000 Oe pour orienter les particules classiques et obtenir une saturation d'anisotropie, un champ de quelques Oe est suffisant pour les magnétosomes. Nous avons pu démontrer par ajustement de ces courbes à un modèle d'aimantation de Langevin que le nombre moyen de nanoparticules dans la chaîne est de 12 [DZA11]. C'est un indicateur important pour mes collègues slovaques qui ont besoin de connaître et réduire ce nombre jusqu'à l'unité pour leurs applications. La mesure magnéto-optique peut s'avérer un moyen relativement simple pour le vérifier. Néanmoins, la qualité de la suspension ne permet pas toujours la mesure et actuellement les travaux portent sur son amélioration. Au-delà des publications « classiques », ce travail a par ailleurs fait l'objet d'une communication dans les bulletins Electroniques du Ministère des Affaires Etrangères et Européennes (<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/66212.htm>). L'anisotropie induite par les chaînes de magnétosomes a également été mesurée dans des polymères dopés. Les polymères synthétisés sous champ magnétique sont anisotropes à l'inverse de ceux synthétisés hors champ [DZAR11].

Du point de vue des applications magnéto-optiques que nous développons, il est apparu intéressant de tester la rotation Faraday de ces structures pour évaluer si les chaînes peuvent présenter une facilité à produire une rémanence une fois orientée. Pour l'instant, nous avons mesuré l'ellipticité Faraday d'une suspension de magnétosomes et comparé l'effet à celui de nanoparticules classiques de même taille. On peut remarquer sur la Figure 3.23 que l'effet Faraday sature beaucoup plus rapidement pour les magnétosomes.

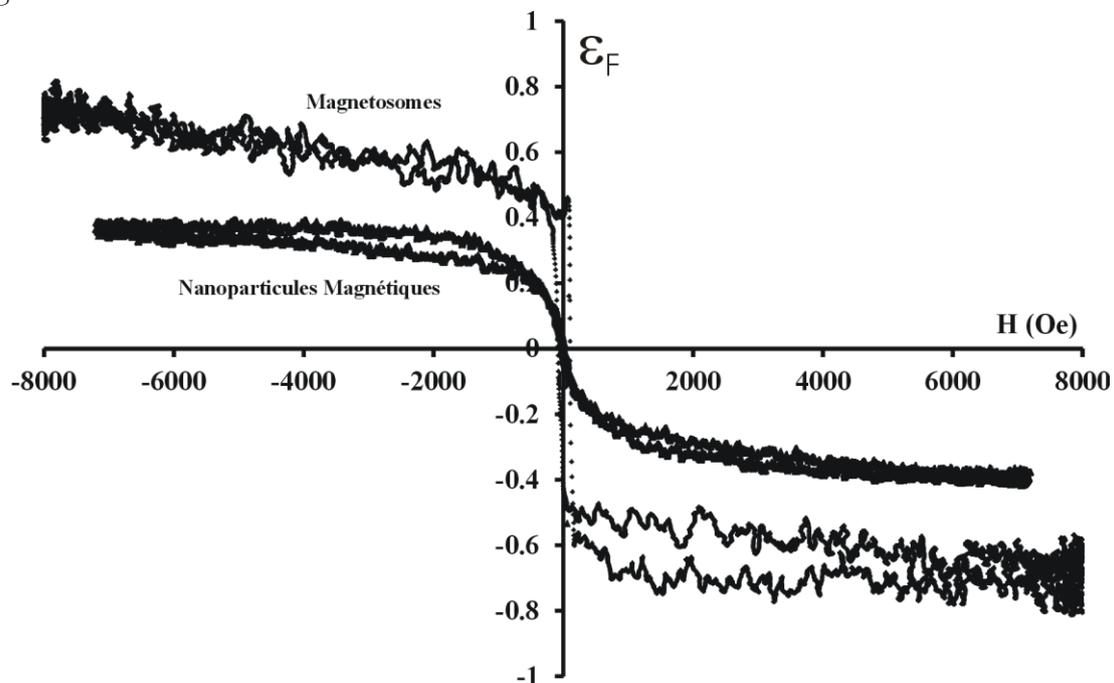


Figure 3.23 : Ellipticité Faraday normée en fonction du champ magnétique appliqué pour une solution de nanoparticules de magnétite dans l'eau, et une solution de magnétosomes.

C'est un point intéressant qui laisse espérer une hystérésis et une rémanence importantes pour les polymères dopés orientés. Mais pour l'instant, la qualité des dopages obtenus ne permet pas de mesurer l'effet Faraday dans ces polymères.

Les travaux se poursuivent sur ce point, et également sur l'étude optique et magnéto-optique de cristaux liquides dopés en nanoparticules magnétiques

3.4. Bilan

Dans ce chapitre, j'ai souhaité revenir sur l'ensemble des travaux dédiés au développement du matériau composite et aux propriétés des nanoparticules magnétiques. Cela a permis de mettre en lumière que nous avons acquis un savoir-faire sur l'élaboration de matrices d'oxyde métallique ($\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$) dopées en nanoparticules de ferrite de cobalt. Ce matériau composite réalisé en sol-gel organique inorganique possède une biréfringence relativement faible (10^{-4}) associée à une activité magnéto-optique de $200^\circ/\text{cm}/\%$ à 1550 nm, ce qui donne un rendement de conversion assurant sa mise en évidence en couche mince. De plus, les nanoparticules de taille supérieure à 12 nm présentent une rotation Faraday rémanente qui fait du composite un matériau autopolarisé. L'orientation des particules pendant la gélification permet d'atteindre 60 % de l'effet à saturation.

La dernière partie, consacrée à des études plus amont a démontré l'intérêt des nouvelles méthodes d'élaboration mis en œuvre à PECSA avec des particules de l'ordre de 20 nm fournissant une forte rémanence, mais aussi une augmentation du facteur de mérite d'un facteur 2. Cela induit une division par deux des pertes à rotation égale comparativement aux synthèses précédentes. Enfin, les nanoparticules de YIG faites à l'Université de Szeged ont démontré leur capacité à jouer le rôle de dopant et leur activité magnéto-optique a été mise en évidence. Ces deux pistes laissent à penser que les capacités magnéto-optiques du composite pourront encore être améliorées. En ce qui concerne les magnétosomes, leur forte capacité d'orientation magnétique a été démontrée en liquide et l'équipe slovaque travaille actuellement à l'amélioration de la qualité des polymères dopés.

Les deux chapitres suivants sont consacrés à la mise en œuvre du matériau composite dans les convertisseurs de mode hybrides sur verre (Chapitre 4) et les cristaux magnéto-photoniques (Chapitre 5).

4. CONVERTISSEURS DE MODE HYBRIDES SUR VERRE

De façon à valoriser notre activité de développement d'un nouveau matériau magnéto-optique en l'appliquant à des composants, je me suis rapproché en 2008 du groupe « Optique intégrée » du laboratoire IMEP-LAHC à Grenoble. Les contacts ont été rapidement établis avec le responsable de ce groupe, Jean Emmanuel Broquin, notamment parce qu'il fut mon enseignant de DEA en 2000-2001. Au-delà de cette dimension humaine, une proximité technologique paraissait toute naturelle entre leurs composants intégrés sur verre par échange ionique et nos couches minces déposées sur verre à basse température. De plus, l'IMEP avait développé le concept de structure hybride en rapportant sur les guides sur verre, soit une couche de matériau actif [GAR04], soit un réseau de Bragg [GAR06], soit même une couche mince de YIG par collage moléculaire [JOU08]. Sans pour autant viser immédiatement l'isolateur, il nous est apparu prometteur de déposer une couche magnéto-optique sur des guides par échange d'ions sur verre pour construire des structures hybrides magnéto-optiques. Le fait que nos dépôts se fassent à une température inférieure à 120 °C était le garant de la compatibilité de l'ensemble.

Les travaux de collaboration se sont structurés autour de deux programmes de recherche financés par la région Rhône-Alpes. Le premier fut un programme CIBLE 2008/2012 autour de la thèse de Hadi Amata, doctorant dans notre équipe. Son travail, soutenu l'an dernier, concernait principalement la mise en œuvre des convertisseurs de modes hybrides sur verre. Le deuxième fut un programme CLUSTER 2010/2013 autour de la thèse de François Parsy, doctorant à l'IMEP-LAHC qui soutient sa thèse en cette fin d'année. Son travail concernait principalement le développement des fonctions passives de polarisation utiles à la réalisation d'un isolateur : sélecteur de polarisation, rotateur réciproque.

Dans la première partie de ce chapitre, je reviendrai sur les objectifs et les intérêts de cette approche de composants hybrides sur verre. La deuxième partie sera dédiée à une étude comportementale de ces structures, notamment sur l'aspect conversion de mode et pertes. Dans la troisième partie, je présenterai rapidement la méthode d'élaboration des structures hybrides et les moyens techniques développés spécialement pour caractériser les dispositifs. Enfin, les résultats démontrés sur les structures seront exposés.

4.1. Objectifs et intérêts

Comme indiqué dans le paragraphe 2.1.2, il existe principalement deux méthodes pour réaliser des effets non-réciproques magnéto-optiques en configuration guidée : soit la conversion de mode TE/TM similaire à l'effet Faraday d'espace libre, soit la génération de constantes de propagation et/ou d'atténuation non réciproques. Nous avons choisi de nous orienter sur la conversion de mode car cela nous paraissait la méthode la plus naturelle après avoir démontré une telle conversion dans un guide planaire de matériau composite. Dans un isolateur à rotation (Figure 2.9), la conversion de mode TE/TM doit être de 50%, soit 45° de rotation pour s'ajouter ou se retrancher aux 45° d'un rotateur réciproque. L'objectif est donc de réaliser un rotateur non réciproque de 45° en utilisant la structure décrite sur la Figure 4.1 en travaillant à la longueur d'onde 1550 nm. Une couche de matériau composite magnéto-optique est déposée sur un substrat de verre dans lequel a été préalablement réalisé un guide par la méthode de l'échange ionique.

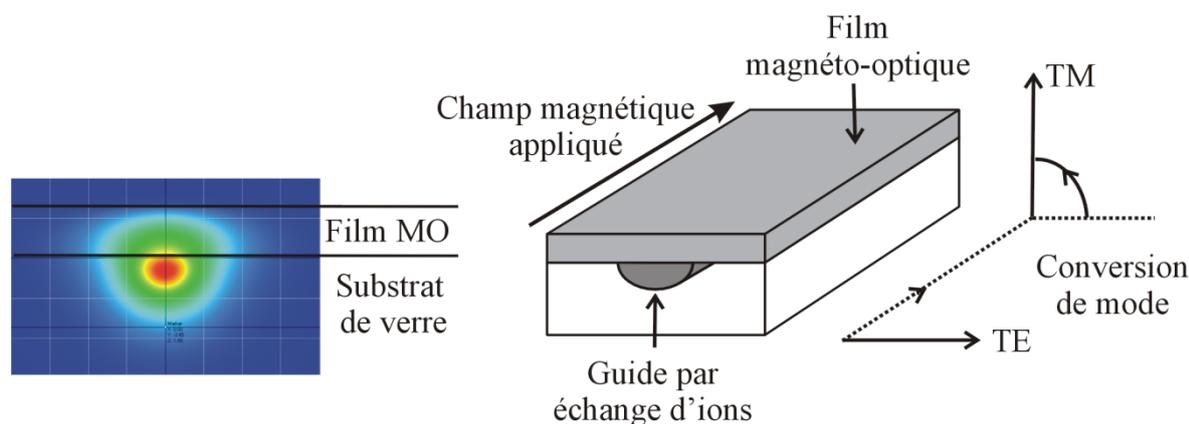


Figure 4.1 : Schéma de principe du convertisseur de mode magnéto-optique intégré sur verre avec un exemple de répartition spatiale du mode guidé.

Vu leur proximité d'indice, le mode de propagation est confiné autour de l'interface entre le guide et la couche, avec une répartition spatiale qui dépend des paramètres opto-géométriques de l'ensemble. Une partie du mode étant dans la couche magnéto-optique, l'application d'un champ magnétique longitudinal induit une conversion de mode TE/TM. Cette conversion doit atteindre un rendement de 0,5 qui correspond aux 45° de rotation requis pour obtenir un isolateur. Par rapport aux travaux dédiés à l'isolateur optique décrits dans le chapitre 3, cette approche présente certaines originalités que l'on peut résumer de la façon suivante :

- Il s'agit de la seule approche dédiée à l'intégration de l'isolateur optique sur une plateforme d'optique intégrée sur verre.

- La technologie d'échange ionique sur verre est une technologie d'intégration de fonctions optiques totalement éprouvée. Robuste et versatile, elle produit pour le marché des composants optiques des dispositifs à bas coût et à faibles pertes de propagation [TER11]. Elle permet également de maximiser l'efficacité de couplage avec les fibres optiques par un enterrage sélectif des extrémités des guides [ONE11].
- Le matériau composite offre un certain nombre de degrés de liberté en termes d'indice de réfraction ou de type de nanoparticules. Comparativement à d'autres méthodes d'intégration de matériau magnétique, le dépôt sol-gel produit également des rugosités de surface très faibles, ce qui doit permettre de minimiser les pertes de propagation.
- Le comportement ferromagnétique des nanoparticules de ferrite de cobalt qui produisent un effet Faraday rémanent important ouvre la voie aux composants auto-polarisés. Cela signifie que l'étape d'intégration des aimants de polarisation magnétiques peut être supprimée.
- Les travaux actuels sur l'isolateur intégré sont exclusivement basés sur l'utilisation de constantes de propagation/atténuation non-réciproque ou sur des structures résonnantes. Cela donne une bande passante de fonctionnement très fine [MIZ12] (par exemple 0,1 nm pour les résonateurs « ring »). Les particules de ferrite de cobalt ayant une activité magnéto-optique assez large-bande entre 1400 et 1600 nm, une bande passante du même type peut être escomptée sur l'isolateur final.

4.2. Etude comportementale

Il a été montré dans le chapitre 2 que la conversion de mode TE/TM en configuration guidée se fait au travers du coefficient de couplage \mathcal{K} . Ce coefficient dépend évidemment de l'activité magnéto-optique du matériau au travers du coefficient ϵ_{MO} , mais également du recouvrement des champs électriques des modes TE et TM dans la partie magnéto-optique.

$$\mathcal{K} = i \cdot \epsilon_{MO} \frac{\omega \cdot \epsilon_0}{4\sqrt{P_{TE}P_{TM}}} \int_{MO} E_y^{TE} \cdot E_x^{TM} dx \cdot dy$$

Pour illustrer ce recouvrement dans une structure hybride, nous avons reporté sur la Figure 4.2 la répartition spatiale de ces champs calculée par F. Parsy à l'IMEP-LAHC avec un solveur de modes semi-vectoriel. On peut remarquer que les modes TE et TM ont des répartitions qui sont tout à fait semblables en tout point de la structure. De plus, les modes ont une répartition qui s'étale à la fois dans le verre et dans la couche magnéto-optique. Seule la partie des champs située dans la couche magnéto-optique contribue au coefficient de couplage.

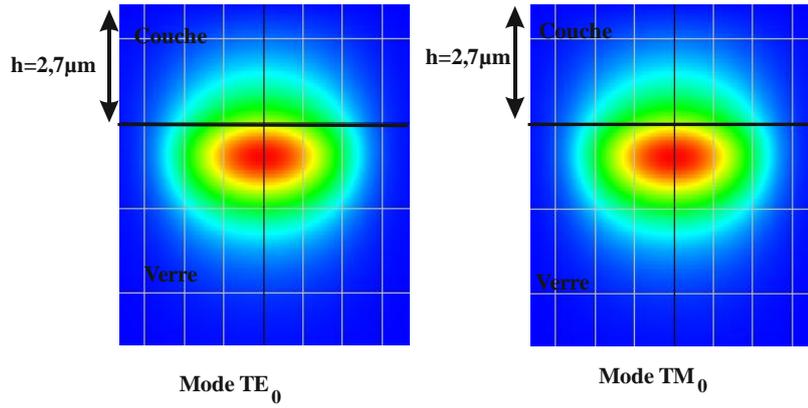


Figure 4.2 : Répartition spatiale des champs des modes TE_0 et TM_0 dans une structure hybride constituée d'un guide par échange d'ions sur verre sur lequel est déposé une couche de matériau composite de $2,7\mu\text{m}$ d'épaisseur.

Ce coefficient peut donc être écrit de la façon suivante :

$$\kappa = i \cdot \varepsilon_{MO} \frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{4 \cdot P_{TE}} \int_{MO} |E_y^{TE}(x, y)|^2 dx \cdot dy$$

On peut ici introduire le confinement magnéto-optique η_{MO} comme le rapport de l'énergie du mode confinée dans la couche magnéto-optique et de l'énergie globale du mode. L'expression du coefficient de couplage devient alors :

$$\kappa = i \cdot \theta_F \cdot \eta_{MO}$$

Cette relation montre que le coefficient de couplage est ainsi proportionnel à la rotation Faraday intrinsèque θ_F du matériau magnéto-optique et à la quantité d'énergie normalisée présente dans ce matériau η_{MO} . On peut donc jouer sur ces deux éléments pour faire varier κ . Comme indiqué au paragraphe 3.2.3, la rotation Faraday spécifique est proportionnelle à la concentration volumique Φ en nanoparticules de ferrite de cobalt dans la matrice au travers de la relation : $\theta_F(^{\circ}/\text{cm}) = 200 \cdot \Phi$. Le coefficient de couplage peut donc être ajusté en modifiant la concentration des nanoparticules lors de la phase de dopage du matériau composite.

Quant au confinement magnéto-optique η_{MO} , il est lié à la répartition du mode dans la structure hybride et dépend donc des caractéristiques opto-géométriques de la structure. Cela est illustré sur la Figure 4.3 où est tracé ce confinement en fonction de la valeur de l'indice de réfraction de la couche magnéto-optique pour différentes largeurs de guides. L'épaisseur de la couche magnéto-optique est laissée fixe. Il faut tout d'abord préciser que le guide obtenu par échange ionique dans le verre présente un indice en surface de 1,55 à 1550 nm, puis décroît jusqu'à 1,5 dans la profondeur. Les courbes de la Figure 4.3 montre que plus l'indice de réfraction de la couche magnéto-optique est élevé,

plus le mode est confiné dans cette couche. Pour ce qui est de la largeur, plus elle est petite plus le mode est confiné dans la couche magnéto-optique et ainsi plus le coefficient de couplage est élevé. Modifier l'indice de réfraction du composite suppose de modifier la composition initiale des précurseurs métalliques. Nous avons ainsi montré qu'en augmentant la quantité de Zr ou de Ti dans le sol, l'indice de réfraction des couches minces pouvait atteindre 1,58. [AMA10]. En ce qui concerne la largeur du guide, nous verrons que sur une « plaquette » d'échantillons, des guides de largeur allant de 0,7 à 5 μm sont présents. En passant d'un guide à l'autre, on a accès à différentes valeurs de confinement magnéto-optique et donc différentes valeurs de coefficients de couplage.

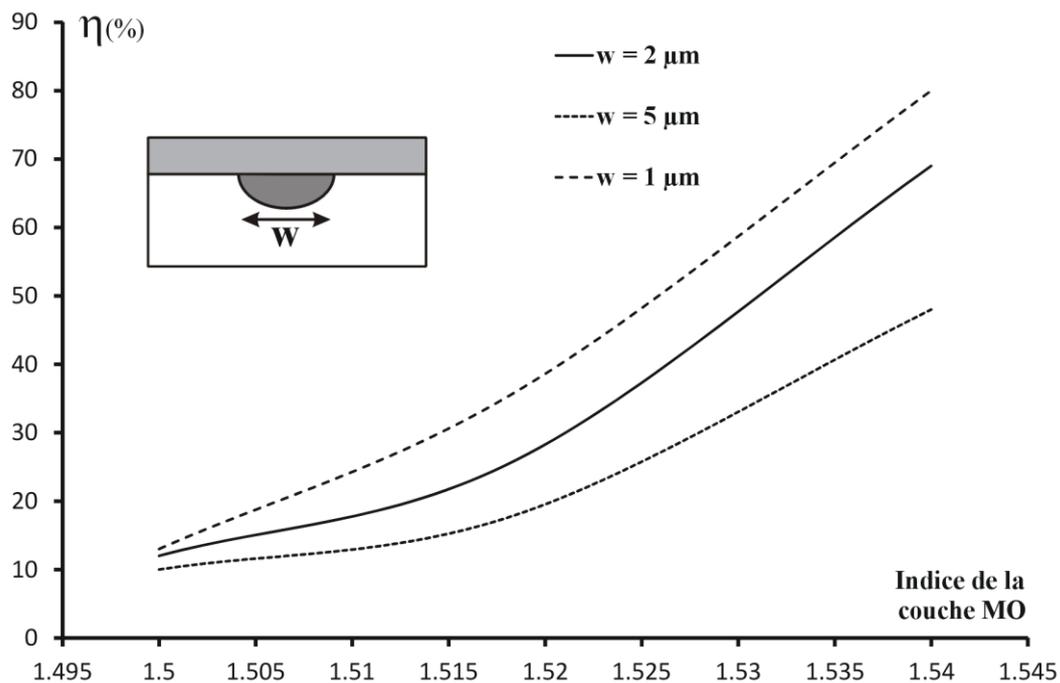


Figure 4.3 : Calcul théorique du facteur de confinement magnéto-optique en fonction de l'indice de la couche magnéto-optique pour différentes largeurs de guides.

Une fois défini le comportement du coefficient de couplage, il faut désormais s'intéresser à la conversion de mode TE/TM. Pour rappel, celle-ci doit permettre d'obtenir une rotation de 45° . Elle doit donc atteindre un rendement de 50%. Cette conversion de mode en configuration guidée est liée au coefficient de couplage κ , mais elle est limitée par la biréfringence de mode $\Delta N = N_{TE} - N_{TM}$. Pour rappel, le rendement de conversion obtenu au bout d'une distance z s'écrit :

$$R(z) = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (k \cdot \Delta N / 2)^2} \cdot \sin^2 \left[\sqrt{\kappa^2 + (k \cdot \Delta N / 2)^2} \cdot z \right] = R_M \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot L_C} \right] \quad (5.1)$$

La conversion a donc un comportement périodique au cours de la propagation avec un rendement maximal R_M limité par la présence de ΔN au dénominateur. Cette conversion maximale est atteinte une première fois au bout de la distance L_C . Selon les

valeurs de \mathcal{K} et ΔN , la conversion peut ne pas atteindre 0,5 (ou 50 %) qui correspond aux 45° de rotation requis. La Figure 4.4 donne la valeur de ce rendement maximal R_M en fonction de la biréfringence de mode et du coefficient de couplage.

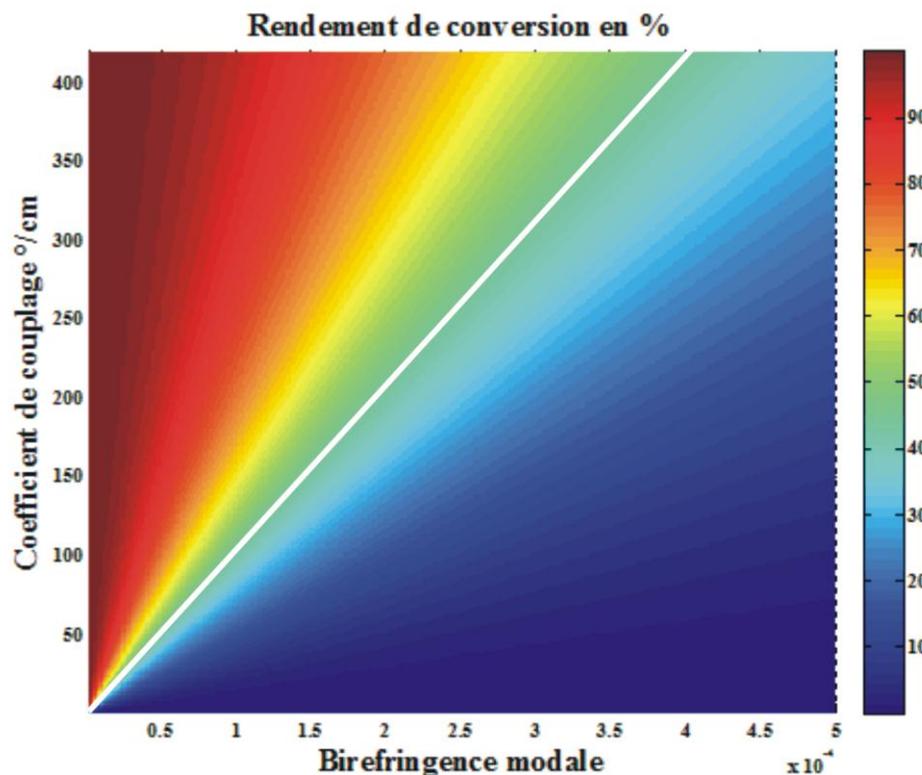


Figure 4.4 : Rendement de conversion TE/TM maximal exprimé en % en fonction de la biréfringence modale en abscisse et du coefficient de couplage en ordonnée. La longueur d'onde est 1550 nm. A droite du trait blanc, le rendement est inférieur à 50 %.

Pour obtenir un rendement maximal de conversion R_M supérieur à 50 %, il faut dans cette représentation se tenir à gauche du trait blanc. Pour un coefficient de couplage de $400^\circ/\text{cm}$ obtenu avec 2% de nanoparticules et un confinement magnéto-optique de 100 %, il faut avoir une biréfringence inférieure à 4.10^{-4} pour atteindre 45° de rotation. Pour cette même concentration de particules, si le confinement magnéto-optique baisse à 20 %, soit $80^\circ/\text{cm}$ pour \mathcal{K} , la biréfringence doit être inférieure à 10^{-4} pour assurer les 45° . Il est donc indispensable de travailler à biréfringence faible et aussi de connaître assez précisément cette valeur de biréfringence qui joue un rôle fondamental sur la conversion. Un banc expérimental dédié à cette mesure sera présenté au paragraphe 4.3.2.

La couche magnéto-optique présentant une absorption, la propagation de l'onde dans le convertisseur de mode TE/TM est assortie de pertes de propagation. Le guide sur verre ayant lui des pertes très faibles [TER11], on peut considérer que le coefficient d'absorption de la structure hybride α_H est uniquement lié à la quantité d'énergie confinée dans la couche magnéto-optique, soit : $\alpha_H \text{ (dB/cm)} = \alpha \cdot \eta_{MO} \cdot \Phi$

$\alpha = 100 \text{ dB/cm/\%}$ est le coefficient d'absorption du matériau composite donné au chapitre 3 et ramené à une concentration volumique de nanoparticules de 1%. Cette expression montre que toute augmentation du coefficient de couplage \mathcal{K} , par une augmentation de la concentration Φ en particules ou du confinement η_{MO} induira une augmentation du même ordre du coefficient d'absorption. Donc, pour augmenter le rendement maximal de conversion d'une structure guidée, il est préférable de chercher à réduire la biréfringence modale qui n'a pas d'influence directe sur le coefficient d'absorption plutôt que d'augmenter \mathcal{K} .

Pour terminer cette étude comportementale, j'ai représenté sur la Figure 4.5 les pertes de propagation en dB obtenues au bout de la distance assurant une conversion de mode TE/TM de 50 % soit une rotation de 45° . Pour cela, pour chaque valeur de \mathcal{K} et ΔN , on détermine tout d'abord la distance z assurant un rendement de 0,5 en inversant l'équation 5.1. \mathcal{K} étant connu, le coefficient d'absorption de la structure hybride est connu et on en déduit les pertes.

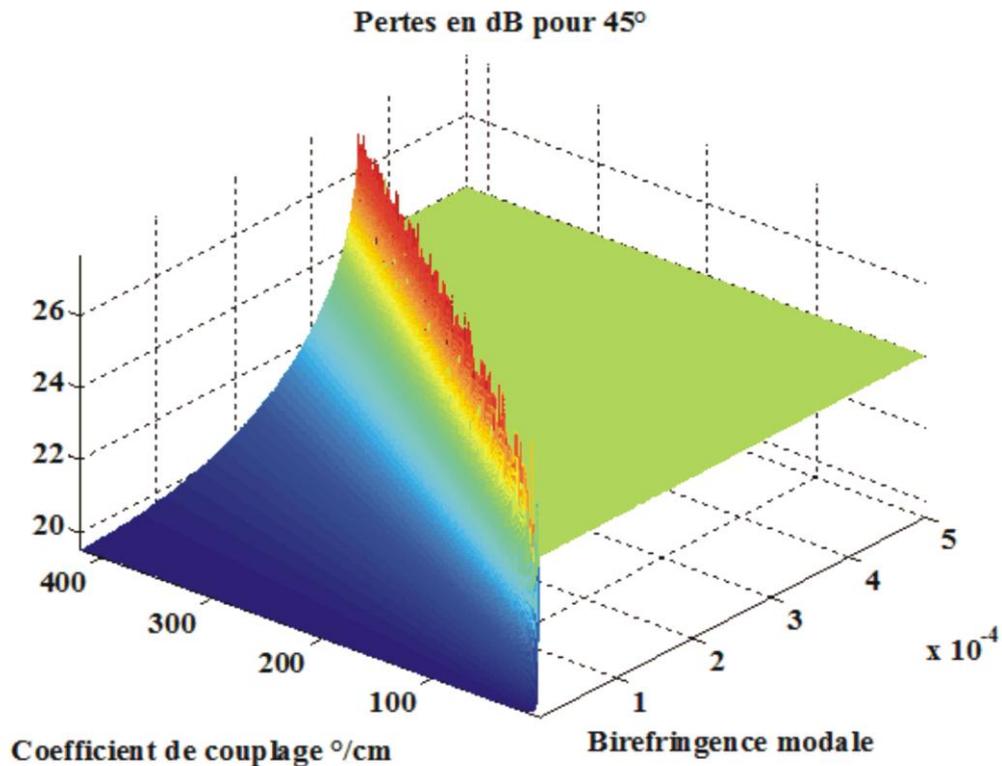


Figure 4.5 : Pertes de propagation en dB obtenues au bout de la distance assurant une conversion de mode de 50 %, soit 45° de rotation. Représentation en fonction de la biréfringence modale et du coefficient de couplage.

Dans le cas où le rendement maximal de conversion ne dépasse pas 50 %, cas des points situés à droite du trait blanc sur la Figure 4.4, ces pertes ne peuvent pas être définies. Dans le cas où le rendement maximal est supérieur à 50 %, on s'aperçoit que les pertes augmentent quand on s'approche de la limite de 50 %. Autrement dit, si on

travaille avec des structures à biréfringence très faible, la conversion est très efficace et le comportement est identique à celui de l'espace libre : une rotation de 45° induit des pertes de 20 dB. Par contre, si la biréfringence est plus grande, elle réduit l'efficacité et augmente la distance nécessaire pour atteindre 45° : les pertes peuvent alors augmenter fortement. Il est donc indispensable de ce point de vue également d'avoir des structures avec des biréfringences bien inférieures à 10^{-4} , surtout si l'on travaille à faible confinement, et donc à faible coefficient de couplage.

4.3. Mise en œuvre expérimentale

4.3.1. Elaboration

Les étapes technologiques utilisées pour la réalisation des structures hybrides magnéto-optiques sont représentées sur la Figure 4.6. Tout d'abord, la réalisation des guides sur verre relève du savoir-faire de l'IMEP-LAHC.

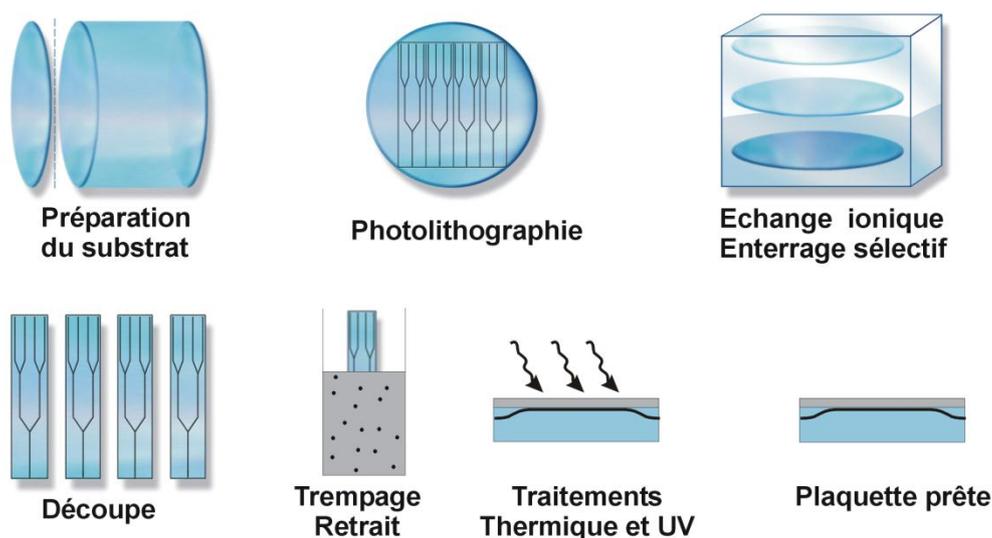


Figure 4.6 : Etapes technologiques pour l'élaboration des structures hybrides magnéto-optiques. Jusqu'à la découpe, le travail est fait à l'IMEP-LAHC. La suite est faite au LT2C.

La première étape consiste à découper, nettoyer le substrat et le recouvrir d'une couche d'alumine imperméable au passage des ions. Puis une photolithographie de cette couche permet de délimiter les zones qui subiront l'échange ionique. Sur la représentation schématique de la Figure 4.6, il s'agit de jonctions 1 vers 4. Dans notre cas, il s'agit principalement de séries de guides droits de largeurs différentes allant de $0,5$ à $5 \mu\text{m}$, séparés par des interféromètres de MachZehnder. Le substrat est ensuite plongé dans un bain de sel d'argent à température contrôlée ce qui induit un échange ionique Ag^+/Na^+ : les ions Ag^+ de la solution sont diffusés dans le verre en échange des ions Na^+ du verre

qui diffusent dans la solution. La diffusion graduelle des ions Ag^+ dans le substrat provoque ainsi une augmentation locale de l'indice de réfraction du verre avec un profil à gradient d'indice. La couche d'alumine est ensuite enlevée et le substrat est soumis à un enterrage sélectif du guide dans le verre. Celui-ci est obtenu par application d'un champ électrique qui fait migrer les ions Ag^+ plus profondément dans le verre. Pour obtenir un enterrage sélectif un masque isolant est appliqué sur le substrat pour modifier les lignes de champ électrique. L'enterrage est ici réalisé sur les extrémités des guides pour ensuite faciliter l'injection de lumière dans les dispositifs. De plus, la taille de la zone non enterrée qui assure ensuite l'interaction avec la couche magnéto-optique peut ainsi être ajustée en fonction de la longueur de conversion de mode souhaitée. Après découpe et polissage des arêtes, la couche magnéto-optique est déposée par trempage-retrait dans une solution sol-gel dopée de la même façon que pour les couches minces présentées au chapitre 3. Les traitements ultérieurs de la couche sont un étuvage à 90°C pendant une heure, et une insolation UV de faible puissance pendant 40 min (voir paragraphe 3.1.2). La température utilisée est inférieure à la température barrière de 120°C provoquant une diffusion des ions dans le verre et donc une modification du profil d'indice initial. Cela assure une compatibilité parfaite entre le guide et la couche magnéto-optique et constitue l'un des intérêts majeurs de cette approche.

4.3.2. Moyens de caractérisation expérimentaux

Pour mesurer la conversion et la biréfringence de mode des structures hybrides, nous avons dû développer un banc de mesure dédié en configuration guidée. Ce banc, décrit sur la Figure 4.7 a été réalisé par D. Jamon, ingénieur de recherche au LT2C. La configuration polarimétrique est identique à celle utilisée au laboratoire depuis plusieurs années pour les mesures d'anisotropie ou ellipsométrie en espace libre [CHO09]. La lumière issue d'une diode laser à 1550 nm est polarisée rectilignement par un polariseur à fort taux d'extinction de type GlanThomson. L'injection dans le guide et la collecte de sortie sont assurées par des objectifs de microscope. La lumière issue de l'échantillon traverse ensuite un modulateur photo-élastique de fréquence 50 kHz, et un analyseur avant d'être séparé en deux faisceaux. Le premier est dirigé vers une caméra Infrarouge pour visualiser le mode en sortie de guide. Le deuxième est envoyé à un détecteur relié à une détection synchrone référencée à la fréquence F du modulateur. Dans cette configuration polarimétrique, on peut aisément montrer que l'intensité I_F fournie par la détection est proportionnelle à l'ellipticité de l'état de polarisation en sortie de l'échantillon, alors que l'intensité I_{2F} est proportionnelle à la rotation de cet état de polarisation par rapport à la direction incidente [CHO09]. Pour appliquer un champ magnétique longitudinal, nous utilisons des aimants permanents de tailles calibrées variant de 0,5 millimètre à quelques centimètres. L'amplitude du champ appliqué est modifiée en

jouant sur la distance entre l'aimant et le guide. Cette configuration permet donc de mesurer la conversion de mode TE/TM dans les structures hybrides en fonction du champ appliqué.

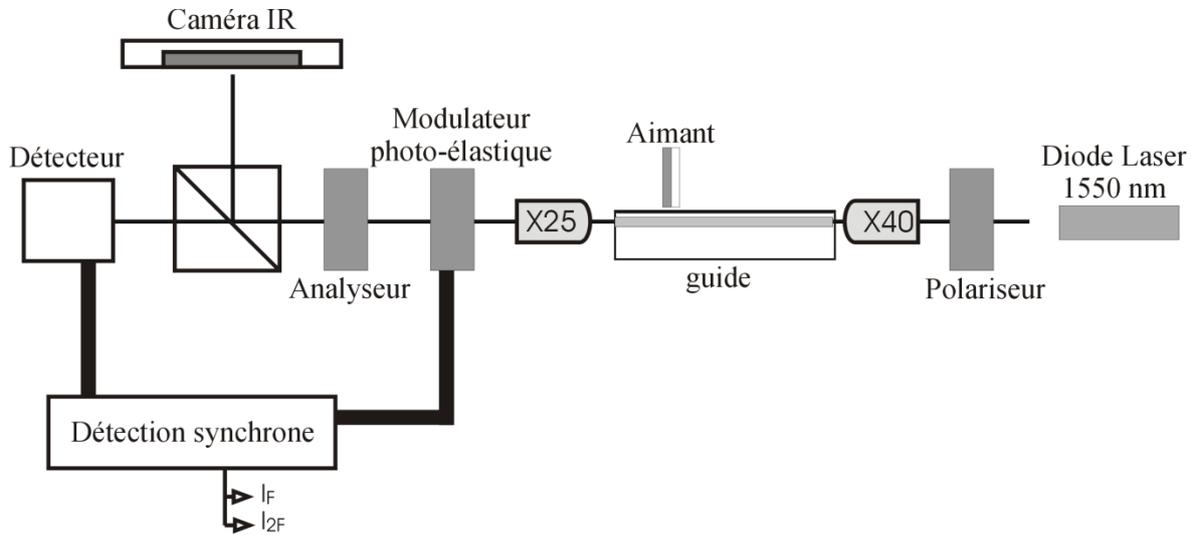


Figure 4.7 : Banc de mesure polarimétrique en configuration guidée, développé pour l'étude magnéto-optique des structures hybrides.

Ce banc de mesure est également utilisé pour la mesure de la biréfringence de mode TE/TM des structures, que ce soit avec un guide par échange d'ions non recouvert ou un guide hybride. La mesure est basée sur l'analyse du battement entre les modes TE et TM le long de la propagation. Le principe, que nous avons décrit récemment dans une publication [JAM13], est le suivant. Un mode TE d'amplitude de champ E_0^{TE} est injecté dans le guide en $z = 0$. En z_p , un aimant placé à la surface du guide génère un couplage de mode magnéto-optique, créant ainsi un champ électrique TM d'amplitude E_p^{TM} . L'aimant étant de petite taille l'amplitude du mode TM est bien plus faible que celle du mode TE : $E_p^{TM} \ll E_0^{TE}$. On peut parler de perturbation. Cela est d'autant plus vrai dans les guides nus sans couche magnéto-optique. Pendant leur propagation entre z_p et la sortie du guide en z_L , les deux modes se déphasent car ils ne possèdent pas la même constante de propagation. Ce déphasage s'écrit :

$$\varphi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta N \cdot (z_L - z_p)$$

Ainsi l'état de polarisation de l'onde d'espace libre en sortie se caractérise par deux composantes orthogonales : E_0^{TE} et $E_p^{TM} \cdot e^{j\varphi}$. Selon la valeur de φ , cet état de polarisation peut être linéaire ou elliptique. Une façon simple de faire varier ce déphasage est de déplacer la position z_p de la perturbation. La mesure consiste alors à déplacer l'aimant à la surface du guide tout en enregistrant l'évolution de la rotation γ et de l'ellipticité ε de l'état de polarisation de sortie. Cela est représenté sur la Figure 4.8, notamment à gauche pour un guide de surface non enterré.

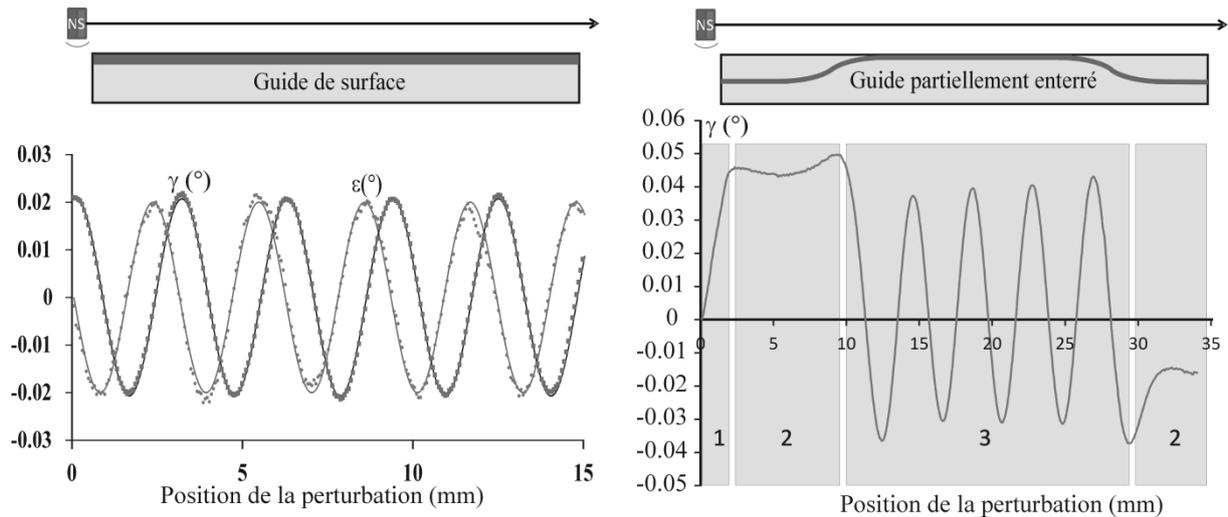


Figure 4.8 : Mesures de battement par perturbation magnéto-optique. *Gauche* : inclinaison et ellipticité de l'état de polarisation en sortie en fonction de la position de la perturbation dans un guide de surface. *Droite* : idem avec seulement l'inclinaison pour un guide partiellement enterré.

Le déphasage φ étant une fonction périodique en z à 2π près, le déplacement de la perturbation donne une variation périodique à la rotation et l'ellipticité. La période de cette fonction, qui dépend de la biréfringence de mode, est appelée longueur de battement :

$$L_B = \frac{\lambda}{\Delta N}$$

La mesure de cette longueur de battement permet donc de déterminer la biréfringence. Par exemple, sur la Figure 4.8 à gauche, la rotation et l'ellipticité ont une longueur de battement de 3,1 mm, ce qui signifie une biréfringence de mode de $4,99 \cdot 10^{-4}$ à 1550 nm. La détermination de L_B étant faite à quelques pourcents, la précision sur la mesure de la biréfringence est de quelques 10^{-6} . On a ainsi une méthode de mesure précise, simple et non-destructive. Elle suppose seulement d'enregistrer correctement le battement. Si la biréfringence est trop faible, le guide peut ne pas être assez long pour pouvoir enregistrer un battement. Dans ce cas, la mesure du déphasage φ peut être faite sur le même banc qui intègre une calibration ellipsométrique. Cela nous permet de mesurer des biréfringences aussi faibles que 10^{-5} . Si la biréfringence est plus élevée, supérieur à 10^{-3} , de nombreux battements apparaissent. Une analyse FFT permet alors une bonne mesure de la période.

Cette méthode de mesure présente également l'avantage de fournir une information localisée de la biréfringence. En effet, comme le montre la Figure 4.8 à droite, la variation de la rotation de l'état de polarisation de sortie est modifiée selon la profondeur d'enterrage du guide. Au centre, le guide d'onde de surface génère un battement régulier associé à une biréfringence de $2 \cdot 10^{-4}$. Par contre, aux extrémités, là où le guide est plus enterré, on ne voit pas de battement complet mais une évolution bien plus lente du signal.

Ceci signifie une biréfringence bien plus faible évaluée à quelques 10^{-5} . Il est donc possible, avec cette méthode, d'avoir une information localisée de la biréfringence de mode, ou au moins une information par zone. Cela pourra certainement être bénéfique à l'avenir pour d'autres structures : séparateur, rotateur de polarisation....

La qualité de ce banc de mesure est à la base des résultats que je vais présenter dans la partie suivante.

4.4. Résultats

Pour s'assurer de la compatibilité entre le guide par échange d'ions et la couche magnéto-optique, le premier point a consisté à étudier le guidage dans les structures. Les échantillons testés étaient du type représenté en haut à droite sur la Figure 4.9, à savoir une couche déposée sur un guide droit.

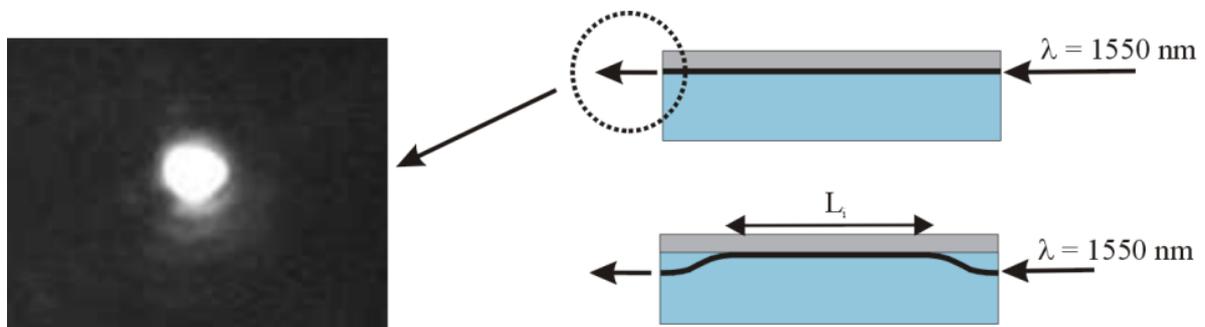


Figure 4.9 : *Gauche* : Image de la lumière en sortie d'une structure hybride dans le cas où la couche est déposée sur un guide non enterré sélectivement (cas en haut à droite). *Droite* : Illustration des deux types de structures hybrides réalisées, à guide droit en haut et à guide partiellement enterré en bas.

Pour assurer un bon couplage/découplage de la lumière sur les interfaces, il a fallu polir les arrêtes des échantillons. Ce fut une étape très délicate car le matériau sol-gel dopé se prête très mal à ce polissage. L'image de sortie donnée à gauche sur la même figure démontre qu'il est possible de coupler, guider puis découpler de la lumière dans les structures hybrides. De plus le confinement latéral du mode est illustré par la forme arrondie du spot. Dans cette structure, le confinement magnéto-optique a été calculé à 17%.

Une fois la compatibilité acquise et l'étude du mode à l'interface guide-couche réalisée, nous avons choisi de travailler sur des structures à guides partiellement enterrés comme illustré en bas à droite de la Figure 4.9. Les accès au guide en entrée et en sortie sont mieux protégés pendant le dépôt sol-gel et les manipulations de l'échantillon. De plus cela évite l'étape difficile de polissage de la couche sol-gel. Enfin en termes d'intégration, les guides enterrés présentent un couplage plus efficaces avec les fibres optiques [ON11].

4.4.1. Biréfringence

Même si nous l'avons précisé dans la partie précédente, il faut tout d'abord mentionner que la biréfringence $\Delta N = N_{TE} - N_{TM}$ dépend de la profondeur d'enterrage des guides non recouverts. Nous avons ainsi mesuré que les guides de surface non enterrés présentent des biréfringences de mode de l'ordre de 10^{-3} . Ensuite plus le guide est enterré, plus sa biréfringence est faible. Par exemple, pour un enterrage à une profondeur de l'ordre de $5 \mu\text{m}$ la biréfringence a une valeur de l'ordre de 10^{-5} et peut même s'annuler voir changer de signe selon la largeur des guides.

La majorité des structures étudiées sont à enterrage sélectif comme représenté sur la Figure 4.9 en bas à droite, et nous avons fait varier la longueur d'interaction L_i . Dans ce type de structure, la biréfringence évolue le long de la propagation vu que la profondeur d'enterrage varie, mais on s'intéressera dans la suite à la biréfringence dans la partie centrale, là où il y a interaction avec la couche magnéto-optique.

Un exemple de résultats est reporté sur la Figure 4.10 en fonction de la largeur de la fenêtre de diffusion utilisée pour construire le guide. On parlera plus simplement de largeur de guides. Il s'agit ici d'un échantillon dont la longueur d'interaction L_i vaut 1,5 cm. La biréfringence a été mesurée avant dépôt de la couche magnéto-optique (Guides nus) et après dépôt (Structures hybrides). Le premier élément qui ressort de cette figure est que la biréfringence est très différente entre le guide nu et la structure hybride. Le fait de rapporter une couche mince d'indice 1,51 sur le guide nu fait fortement baisser la biréfringence de mode. Elle passe de valeurs de l'ordre de $2 \cdot 10^{-4}$ à des valeurs de l'ordre de 10^{-5} voire en dessous pour les structures hybrides. C'est un point très important par rapport à ce qui a été discuté au paragraphe 4.2, car des niveaux de biréfringences aussi faibles assurent des structures très efficaces pour la conversion de mode avec en plus une influence négligeable de la biréfringence sur les pertes. Par comparaison, les biréfringences les plus faibles obtenues sur les couches minces dans le chapitre 3 étaient de l'ordre de 10^{-4} .

La diminution observée sur la Figure 4.10 entre le guide nu et la structure hybride est attribuée au fait que la structure hybride présente un profil opto-géométrique plus symétrique que le guide nu. Celui-ci possède une interface avec le verre d'indice 1, alors que dans la structure hybride, le guide a une interface avec la couche magnéto-optique qui a un indice de 1,51. Les évolutions de la biréfringence avec la largeur du guide sont liées aux modifications induites sur le profil du mode par la largeur. Pour les guides nus, quand la largeur augmente, elle devient plus grande que la profondeur du guide obtenue par l'échange ionique (de l'ordre de $2 \mu\text{m}$). Cela conduit à une répartition spatiale du mode de forme ellipsoïdale, ce qui augmente la biréfringence. Pour les structures hybrides, plus la largeur augmente, moins le mode « monte » dans la couche magnéto-optique. Celle-ci

présentant une biréfringence de l'ordre de 10^{-4} , cela contribue à réduire la biréfringence globale.

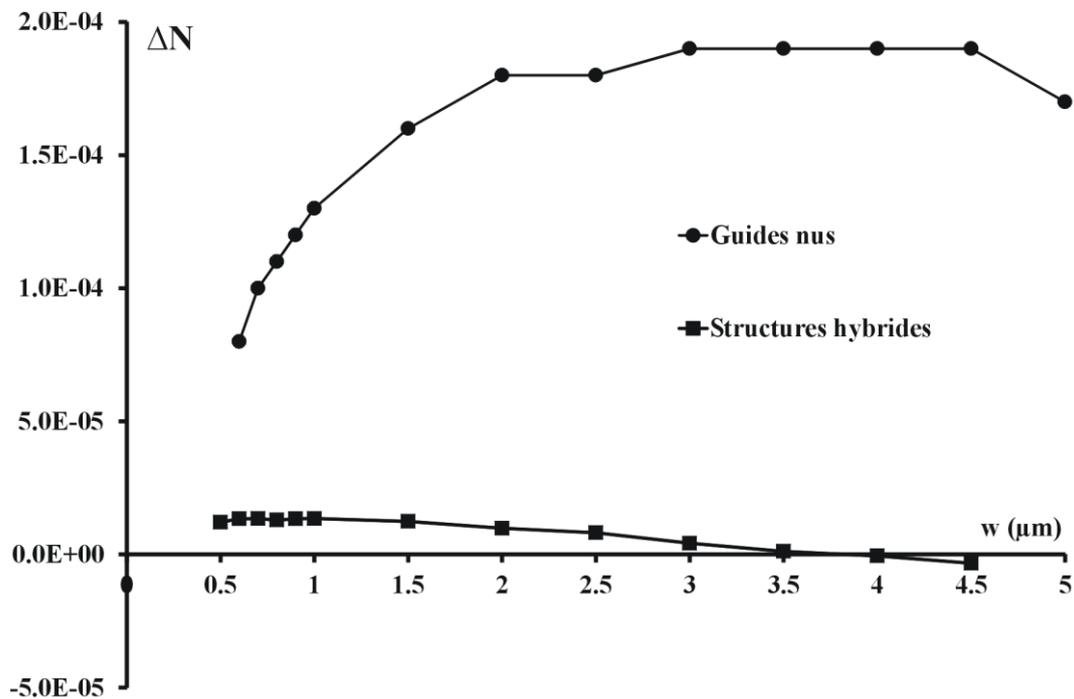


Figure 4.10 : Biréfringence modale en fonction de la largeur de guide. Une première mesure est effectuée sur les guides avant dépôt de couches magnéto-optiques (guides nus), puis après dépôt (structures hybrides).

Différents échantillons à structures hybrides ont été mesurés, avec des longueurs d'interaction différentes ou des taux de dopage différents. Cette réduction de la biréfringence entre les guides nus et les structures hybrides a toujours été observée de façon très nette, produisant des biréfringences faibles pour les structures hybrides. Par contre, le niveau de biréfringence des guides nus peut varier selon la valeur de la longueur d'interaction, et la diminution observée sur les structures hybrides selon le taux de dopage en nanoparticules. Cependant ces variations n'ayant pas encore été étudiées de façon systématique, il est difficile de les présenter ici de façon objective.

4.4.2. Conversion de mode

Dès les premières structures hybrides réalisées, il a été possible de mesurer des rotations de polarisation sous l'influence d'un champ magnétique longitudinal. Les rotations étaient faibles ($1,6^\circ$), mais cela a permis de rapidement valider notre approche et de positionner nos travaux dans la communauté [AMA11]. En faisant évoluer ensuite les structures en termes de biréfringence, confinement magnéto-optique, longueur d'interaction ou taux de dopage, il a été possible d'augmenter notablement la valeur de la

rotation. Sur la Figure 4.11, est reportée la conversion de mode d'une structure en fonction du champ magnétique longitudinal appliqué. L'amplitude mesurée est de l'ordre de 6° quand le matériau est saturé, et on retrouve un cycle d'hystérésis typique de nanoparticules de taille de l'ordre de 9 nm. Le comportement magnétique en configuration guidée est donc tout à fait identique à celui mesuré en espace libre et détaillé au chapitre 3. On peut ainsi envisager de construire des composants hybrides non-réciproques et autopolarisés magnétiquement en utilisant des nanoparticules de plus grande taille.

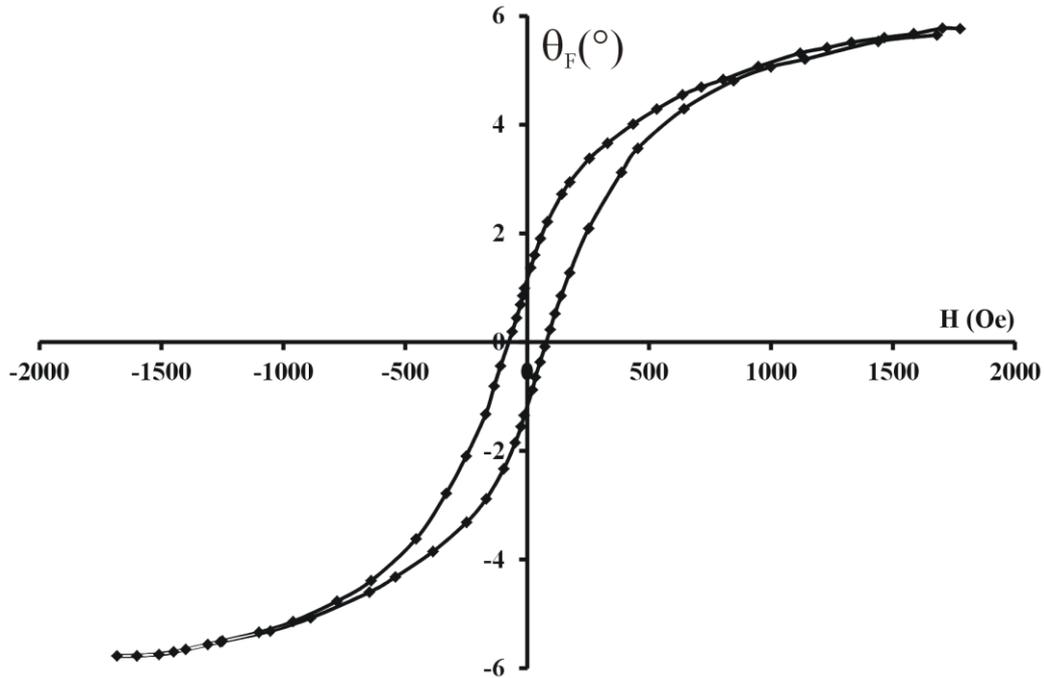


Figure 4.11 : Angle de rotation Faraday dû à la conversion de mode dans une structure hybride en fonction du champ magnétique appliqué.

Dans le Tableau 4.1, je reporte des valeurs de rotations typiques recensées sur trois échantillons différents. Ils varient principalement par le taux de dopage de la couche magnéto-optique qui induit des rotations Faraday intrinsèques égales à 36, 60 et $420^\circ/\text{cm}$. Les longueurs d'interaction ont également été adaptées au taux de dopage pour ne pas engendrer trop de pertes.

	θ_F	L_i	ΔN	R_M	Rotation mesurée	Pertes MO
Faible	$36^\circ/\text{cm}$	1,5 cm	$2,6 \cdot 10^{-5}$	59 %	$1,6^\circ$	/
Moyen	$60^\circ/\text{cm}$	1 cm	$1,7 \cdot 10^{-5}$	90 %	10°	5 dB
Fort	$420^\circ/\text{cm}$	0,5 cm	$2,7 \cdot 10^{-4}$	64 %	50°	/

Tableau 4.1 : Récapitulatif des caractéristiques de trois types de structures hybrides. L'ensemble des mesures sont faites pour une longueur d'onde de 1550 nm.

On peut constater que la rotation mesurée suit l'évolution du taux de dopage et qu'elle peut atteindre 50° . Ceci démontre donc la capacité des structures hybrides magnéto-optiques à réaliser un rotateur de polarisation de 45° non réciproque. C'est un

résultat fondamental qui démontre tout l'intérêt de nos travaux : il est désormais possible de construire des rotateurs non réciproques sur verre par utilisation d'une couche de matériau composite à base de nanoparticules magnétiques.

Enfin, la bande passante optique des structures hybrides magnéto-optiques a été mesurée en relevant la rotation en fonction de la longueur d'onde incidente. Pour cela, une source de l'IMEP-LAHC accordable sur la plage [1,5-1,65 μm] a été utilisée. Les mesures démontrent une bande passante légèrement supérieure à 75 nm. Une telle largeur de bande est rendue possible par les nanoparticules de ferrite de cobalt qui présentent une rotation Faraday assez large bande autour de 1500 nm (voir Figure 3.2). Cela constitue un autre intérêt de ces structures.

4.4.3. Pertes

Dans la troisième colonne du Tableau 4.1, une mesure de pertes est reportée pour l'échantillon à dopage moyen. Cette mesure a été réalisée par François Parsy avec les équipements de l'IMEP-LAHC. Elle montre une perte de 5dB associée à une rotation de 10° . En terme de facteur de mérite magnéto-optique cela revient à $2^\circ/\text{dB}$, ce qui est exactement la valeur obtenue pour le matériau en couches minces. Ainsi les pertes de la fonction rotateur magnéto-optique sur verre sont donc intégralement dues aux pertes d'absorption intrinsèques du matériau magnéto-optique. L'association avec un guide sur verre ne produit pas de pertes significatives supplémentaires. Cela traduit un comportement différent de ce que l'on peut observer de l'intégration d'un matériau magnéto-optique sur une plate-forme d'optique intégrée. Par exemple, l'intégration monolithique du Ce-YIG sur silicium fournit un matériau de rotation Faraday intrinsèque de $1260^\circ/\text{cm}$ [BI11] alors que le même matériau déposé sur son substrat dédié (GGG Grenat de Gadolinium et Gallium, voir paragraphe 2.2) possède une rotation de $4500^\circ/\text{cm}$. De même lorsque le matériau Ce-YIG est rapporté sur les structures par collage moléculaire ou direct, des pertes supplémentaires sont générées par les défauts d'interface [GHO12], et le facteur de mérite de l'ensemble chute. Ici, le facteur de mérite initial n'est pas aussi élevé que celui du Ce-YIG, mais l'intégration du matériau ne conduit aucunement à sa dégradation.

Enfin, en ce qui concerne les pertes, un point important à attirer notre attention. Il s'agit du dichroïsme linéaire observé sur la propagation des modes TE et TM : les modes TE présentent un coefficient d'absorption plus important que les modes TM. Cela s'observe d'autant plus que la couche magnéto-optique présente un dopage élevé. Il s'agit d'un phénomène tout à fait normal et bien expliqué par Manfred Lomeyer dans sa thèse sur les guides rectangulaires magnéto-optiques [LOH99]. A l'image de la biréfringence de mode géométrique, la propagation dans un guide plan asymétrique dont l'une des couche est absorbante conduit à des coefficients d'absorption différents selon la polarisation du

mode. Ce phénomène a d'ailleurs été observé par Shintaku *et al* dans des guides de Ce-YIG sur GGG [SHI97] avec une absorption de 5,8 dB/cm en TM et 9,7 dB/cm en TE. Dans notre cas, le problème est que ce dichroïsme a un impact sur la rotation mesurée en configuration guidée dont l'amplitude dépend de la polarisation d'entrée. En effet, la polarisation TE étant plus absorbée cela provoque une augmentation artificielle de l'énergie du mode TM en sortie. L'interprétation de la rotation magnéto-optique observée en sortie est donc « faussée ». Cela pose un problème important pour le fonctionnement de l'isolateur à rotation puisque la rotation doit être de 45° quelle que soit la polarisation. C'est un point sur lequel nous devons apporter des réponses dans les mois à venir.

4.5. Bilan

Dans ce chapitre, j'ai présenté les travaux consacrés à la réalisation de convertisseurs de modes magnéto-optiques sur verre. Le principe est basé sur le dépôt d'une couche magnéto-optique composite sur un substrat de verre dans lequel ont été préalablement réalisés des guides par échange ionique. L'étude comportementale a montré qu'il était absolument indispensable de travailler à des niveaux de biréfringence faibles si possible de l'ordre de 10^{-5} . Cela permet d'avoir une conversion de mode qui peut dépasser 50% et de minimiser l'influence de la biréfringence sur les pertes. Si la structure est efficace, donc de comportement identique à l'espace libre, les pertes sont celles de la couche magnéto-optique modérées du facteur de confinement.

La biréfringence étant une caractéristique essentielle de ces dispositifs, un banc de mesure dédié a été construit. Basé sur l'analyse du battement intermode, il permet de faire une mesure à la fois simple, non-destructive, précise et localisée de cette biréfringence.

L'analyse des structures hybrides magnéto-optiques a démontré les éléments suivants :

- La compatibilité entre la couche magnéto-optique composite et les guides par échange d'ions sur verre est attestée par le guidage de la lumière dans les structures.
- Les structures hybrides se comportent comme des convertisseurs de mode non-réciproques avec une rotation qui peut atteindre les 45° requis pour l'isolateur. La bande passante optique associée est de 75 nm.
- Les pertes de la structure sont, aux sensibilités de mesure près, égales aux pertes d'absorption dues à la propagation dans la couche magnéto-optique. L'approche technologique poursuivie ici n'induit pas de pertes supplémentaires, et le facteur de mérite reste égal à celui du matériau composite à savoir 2°/dB.
- Les convertisseurs présentent un dichroïsme linéaire dû à la propagation dans une couche absorbante. Les modes TE sont plus absorbés que les

modes TM. L'amplitude de la rotation dépend alors de la polarisation d'entrée. Il s'agit d'un point à étudier car il peut constituer un inconvénient majeur.

Cet ensemble de résultats obtenus depuis 2008 est, de mon point de vue, très prometteur. Il a le mérite de valider l'approche composite que nous avons initiée depuis 2004. Je discuterai dans le chapitre 6 les pistes de travail envisagées sur le sujet des convertisseurs hybrides. On peut néanmoins voir ici que le facteur limitant est lié au facteur de mérite de notre matériau qui est limité à $2^\circ/\text{dB}$. Pour assurer des pertes inférieures à 1 dB pour 45° de rotation dans un isolateur, ce facteur de mérite doit être augmenté à au moins $45^\circ/\text{dB}$. C'est en partie le sujet des travaux présentés dans le chapitre suivant.

5. CRISTAUX MAGNETO-PHOTONIQUES PAR VOIE SOL-GEL

Les caractéristiques magnéto-optiques du matériau composite que nous utilisons sont liées aux propriétés intrinsèques des nanoparticules de ferrite de cobalt qui présentent un facteur de mérite de $2^\circ/\text{dB}$. Même s'il fut intéressant de constater que ce facteur de mérite est le même en phase liquide, dans les couches minces dopées voire même au sein des composants intégrés, nous avons pointé assez rapidement le fait qu'une telle valeur ne permettra pas d'atteindre les caractéristiques requises pour un isolateur intégré. Ainsi, en 2008, nous avons débuté des travaux sur des cristaux magnéto-photoniques 3D parce la littérature montrait qu'une organisation périodique d'un matériau magnéto-optique peut conduire à une exaltation de la rotation Faraday et du facteur de mérite [KAH04]. De plus, nous n'avions pas à l'époque de pistes sérieuses pour travailler avec d'autres nanoparticules.

Dans la mesure où nous souhaitons conserver notre approche composite qui nous différencie dans la communauté, l'objectif a été de réaliser des cristaux magnéto-photoniques par voie sol gel. Deux financements de thèse par bourses ministérielles ont été obtenus auprès de l'UJM pour soutenir cette activité. Il s'agit de la thèse de Renata Kekesi débutée en 2008 et soutenue en octobre 2011, puis celle de Elie Abou-Diwan débutée en 2010. De plus, R. Kekesi, aujourd'hui en PostDoc à Madrid dans un laboratoire de magnéto-plasmonique, a bénéficié d'un support de Post Doc de 10 mois en 2012 par l'abondement Carnot de Telecom Saint Etienne.

Dans la première partie de ce chapitre, je reviendrai sur les objectifs et les intérêts de la réalisation de cristaux magnéto-photoniques. La deuxième partie sera dédiée à une étude comportementale de tels cristaux, notamment pour expliquer pourquoi une organisation périodique peut conduire à une exaltation des effets magnéto-optiques. Dans la troisième partie, je présenterai rapidement la méthode d'élaboration et les moyens techniques développés spécialement pour caractériser ces nouveaux matériaux. Enfin, les résultats démontrés seront exposés en termes de propriétés optiques et magnéto-optiques.

5.1. Objectifs et intérêts

Suite au développement des cristaux photoniques et des procédés technologiques associés, de nombreux travaux ont été lancés à la fin des années 90 sur la réalisation de cristaux magnéto-photoniques. Ces travaux sont motivés par la capacité des cristaux photoniques à modifier la dispersion des ondes lumineuses et les interactions onde-matière qui en découlent. Des études ont donc été consacrées à l'exaltation des effets magnéto-optiques au sein de structures magnétiques périodiquement organisées. Il a ainsi été montré qu'une alternance 1D de couches magnétiques haut indice et de couches diélectrique bas indice permettait d'obtenir une augmentation significative de la rotation Faraday au centre ou au bord de la bande interdite photonique de la structure [INO99]. Cette exaltation peut même donner lieu à une augmentation du facteur de mérite magnéto-optique du matériau [KAH04]. Le même principe a également été appliqué dans un guide canal de YIG avec une exaltation de l'effet qui est ici surtout recherchée afin de réduire la taille du dispositif intégré [LEV06]. Bien la littérature soit abondante sur les cristaux magnéto-photoniques, beaucoup de travaux sont restés sur une organisation 1D. Quelques publications font état de résultats sur des organisations 2D ou 3D [BEL05] [CAI11][BAR04], mais les démonstrations d'exaltation sont clairement beaucoup moins claires que dans le cas 1D.

Vu le peu de démonstrations réalisées en 3D, il nous est apparu intéressant de nous orienter dans cette direction. De plus, cela permettait d'étudier les phénomènes en configuration d'espace libre, ce qui nous paraissait plus facile à ce moment-là. Et puis surtout, une équipe japonaise avait montré la possibilité de réaliser des cristaux photoniques 3D par voie sol-gel [NIS07]. Une opale directe réalisée par l'auto-assemblage de billes de polystyrène micrométriques est imprégnée par une solution de précurseur métallique de silice. Après traitement thermique à 90°C, les billes sont dissoutes laissant place à une opale inverse constituée de trous d'air en organisation cubique faces centrées dans une matrice de silice. Cette méthode nous est apparue tout à fait adaptable en utilisant une préparation sol-gel dopée.

Comme représenté de façon schématique sur la Figure 5.1, l'objectif fixé était donc de construire un réseau périodique de trous d'air dans notre matériau magnéto-optique composite, puis de mesurer les modifications spectrales induites par cette structuration sur la rotation Faraday du composite. Il était également indispensable de choisir des tailles de motifs qui conduisent à des études à proximité des résonnances d'effet Faraday de notre matériau, soit autour de 750 et 1550 nm (voir Figure 3.2).

Nous avons ensuite comme objectif d'appliquer ce type de cristal magnéto-photonique aux convertisseurs de mode hybrides sur verre.

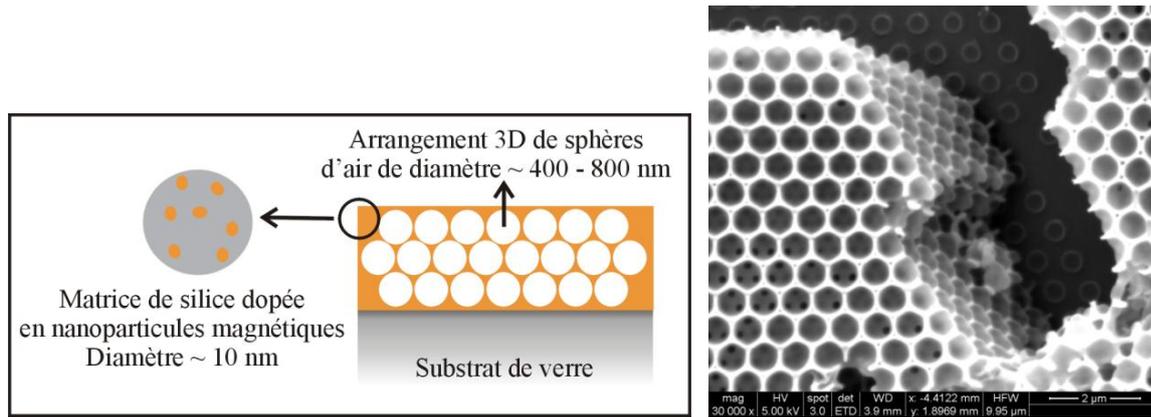


Figure 5.1 : Schéma de principe d'un cristal magnétophotonique 3D (gauche) et image MEB de la réalisation pratique d'une telle structure (droite).

5.2. Etude comportementale

Il est connu qu'une organisation périodique de trous d'air en arrangement cubique faces centrées dans un diélectrique génère une bande interdite photonique complète [JOA08]. En incidence normale, la position spectrale du centre de cette bande interdite photonique est donnée par la longueur d'onde de Bragg [NIS07] :

$$\lambda_c = 2 \cdot D_{sph} \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{[0,26 \cdot n_m^2 + 0,74 \cdot n_{air}^2]}$$

où, D_{sph} est le diamètre des trous d'air, n_m est l'indice du diélectrique. 0,26 et 0,74 sont les facteurs de remplissage respectifs en air et en diélectrique. La présence de la bande photonique est due au fait qu'à la longueur d'onde de Bragg, les motifs périodiques produisent des interférences destructives pour la lumière en transmission. A titre d'illustration, la Figure 5.2 donne un exemple de diagramme de dispersion pour un arrangement 1D périodique d'un diélectrique d'indice 1,5 et d'air. La bande interdite est la zone centrale où pour une gamme de pulsation ω aucune solution de vecteur d'onde n'apparaît. Du point de vue de l'interaction onde-matière et des effets magnéto-optiques, ce n'est pas forcément le centre de cette bande qui est intéressant mais plutôt les bords. En effet, cette figure montre que les courbes de dispersion ont tendance à s'aplatir sur les bords de bandes. Dans ces zones, une petite variation de pulsation induit une plus grande différence de vecteurs d'onde.

Comme indiqué au paragraphe 2.1.1, l'effet Faraday magnéto-optique est lié au déphasage accumulé par les vibrations droite et gauche au cours de leur propagation au sein d'un matériau aimanté :

$$\Theta_F = \left(\frac{\pi \cdot l}{\lambda}\right) \text{Re}(\nu_G - \nu_D) = \left(\frac{l}{2}\right) \text{Re}(k_G - k_D)$$

Ces vibrations droites et gauche ont des indices de propagation donnés par :

$$\nu_D = \sqrt{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{MO}} \text{ et } \nu_G = \sqrt{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{MO}}.$$

ε_{MO} étant très faible devant ε_{xx} , il n'est pas possible de distinguer sur la Figure 5.2 les deux courbes de dispersion tracées pour ces vibrations. Néanmoins l'insert qui fait un zoom sur le bord de bande montre que l'aplatissement des courbes provoque une augmentation de la différence de vecteurs d'ondes entre les polarisations droite et gauche.

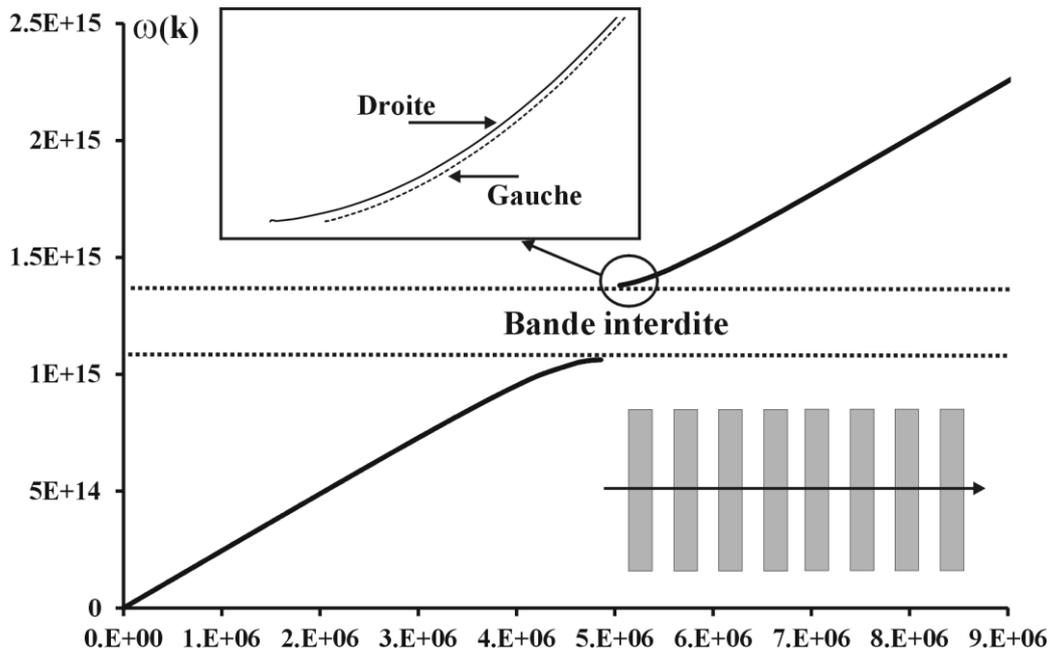


Figure 5.2 : Relation de dispersion d'un cristal photonique 1D réalisé par l'alternance d'un matériau magnéto-optique d'indice 1,5 (épaisseur 258 nm) et d'air (387nm). L'insert effectue un zoom sur la zone de la bord de bande photonique pour les vibrations circulaires droite et gauche.

On peut vérifier ce phénomène sur la Figure 5.3 qui donne cette différence $\Delta k = k_G - k_D$ en fonction de la longueur d'onde. Sur les deux bords de bande photonique cette différence est exaltée, provoquant une exaltation de la rotation Faraday.

Une autre interprétation peut être donnée en terme de vitesse de groupe. Quand la courbe de dispersion s'aplatit, la vitesse de groupe diminue jusqu'à devenir nulle dans la bande photonique. La vitesse étant plus faible, l'onde est donc plus longtemps en contact avec les matériaux et l'interaction onde-matière est plus efficace. Pour nous cela signifie une augmentation des interactions magnéto-optiques.

En transposant cette interprétation aux cristaux photoniques 3D, nous avons donc cherché à réaliser des structures à bandes photoniques interdites dans notre matériau magnéto-optique pour étudier l'effet Faraday en bord de bande.

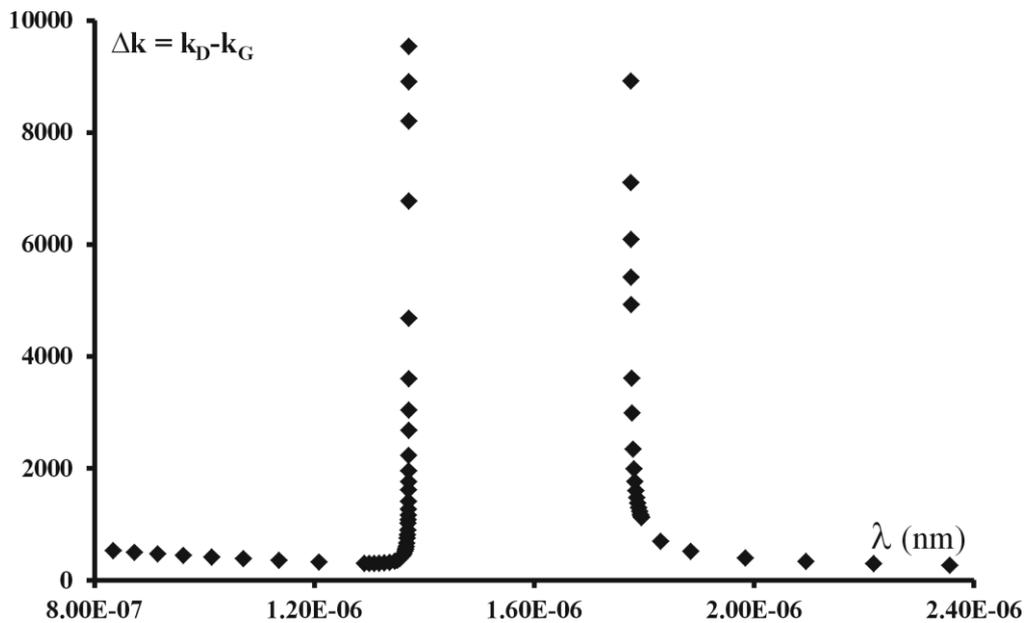


Figure 5.3 : Evolution spectrale de la différence de vecteurs d'onde entre les vibrations circulaires droite et gauche.

5.3. Mise en œuvre expérimentale

5.3.1. Elaboration

Les étapes poursuivies pour la réalisation d'un cristal magnéto-photonique 3D par voie sol-gel sont présentées sur la Figure 5.4. La première étape est la réalisation d'une opale directe de billes de polystyrène. Pour cela, une méthode d'auto-organisation par dépôt vertical est utilisée [GAL11]. Il s'agit de tremper un substrat de verre dans une solution aqueuse de billes de polystyrène avec un angle de 20° , pendant plusieurs jours jusqu'à évaporation complète du solvant. Les mouvements de convection entretenus par un chauffage à 45°C entraînent les billes dans le ménisque qui se forme sur le substrat à l'interface air-liquide. Les forces de tension de surface au sein de ce ménisque organisent les billes dans une structure cubique faces centrées à plus forte densité. Ce processus se poursuit tout au long de l'évaporation du solvant conduisant au dépôt de l'opale sur l'ensemble du substrat immergé. Un exemple d'opale directe est donnée sur la Figure 5.5 (a). Une excellente organisation avec une bonne homogénéité sur plusieurs centaines de μm^2 est obtenue.

La taille des billes de polystyrène a été choisie pour obtenir des bandes interdites dans les zones spectrales où la ferrite de cobalt présente un effet Faraday important, soit

750 et 1550 nm. En utilisant la relation de Bragg donnée précédemment, nous avons opté pour des tailles de 400 /450 nm d'une part et 800/900 nm d'autre part.

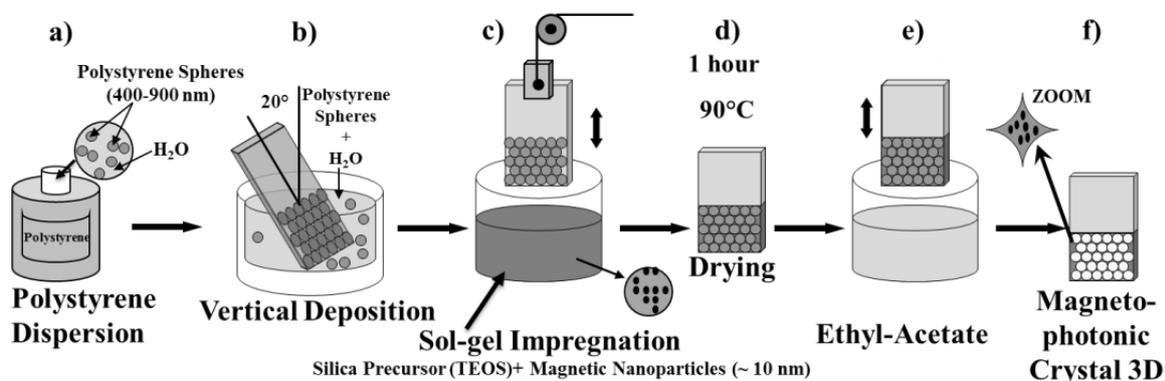


Figure 5.4 : Représentation des étapes permettant l'élaboration des opales inverses dopées.

Après un séchage servant à éliminer les résidus de solvant, l'opale directe est imprégnée par une solution sol-gel dopée en nanoparticules magnétiques. Ici, il s'est avéré impossible d'utiliser la matrice sol-gel organique-inorganique. Apparemment la viscosité trop forte de la solution l'empêchait de pénétrer dans les interstices de l'opale directe. Nous avons donc opté pour le même sol-gel que celui utilisé par Nishijima *et al*, à savoir une préparation sol-gel purement minérale à base de TEOS (Tetraethylorthosilicate) [NIS07]. Avec ce type de préparation dopée en nanoparticules, l'imprégnation est très efficace. La matrice sol-gel est ensuite consolidée par un traitement thermique à 90°C pendant 1H, puis les billes de polystyrène sont dissoutes par trempage dans l'éthyle acétate. Ceci conduit à la formation d'une opale inverse de silice dopée en nanoparticules magnétiques. La taille de ces particules, de l'ordre de 10 nm, est faible devant la taille des interstices de l'opale directe ce qui assure une bonne pénétration de ces particules avec la préparation sol-gel.

Les images de microscopie électronique à balayage reportées sur la Figure 5.5 illustrent le type de structures réalisées avec différentes tailles de billes de polystyrène initiales. Ces images montrent que l'on obtient de belles organisations 3D sur une hauteur de plusieurs μm . Par contre, l'homogénéité en surface est limitée à quelques $40 \mu\text{m}^2$ alors qu'elle peut être 10 fois plus grande dans les opales inverses non dopées. Le dopage réduit manifestement la qualité de ces structures.

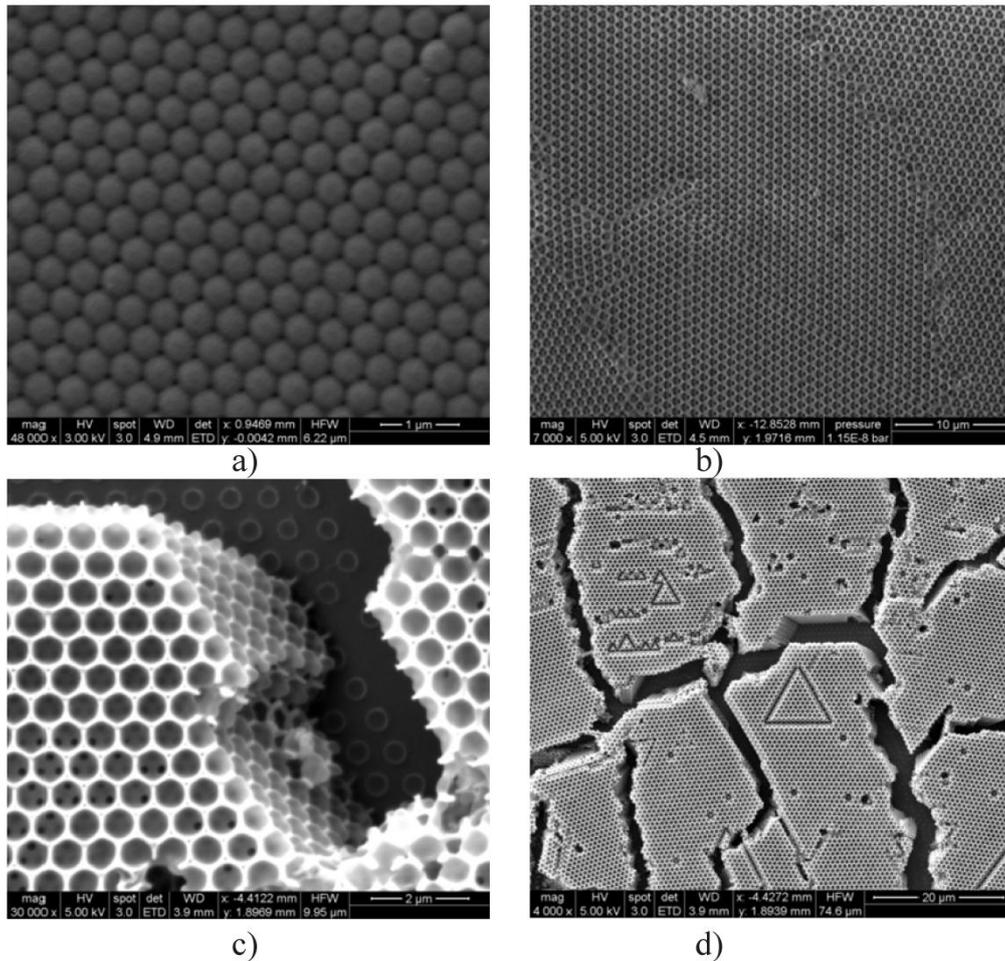


Figure 5.5 : Images de Microscope Electronique à balayage de différents échantillons . (a) Opale directe avec des billes de 4500 nm. (b) Opale inverse non-dopée avec des billes de 900 nm. (c)-(d) Opale inverse dopée à base de billes de 800 nm

5.3.2. Taux de dopage

Les images d'opales inverses de la Figure 5.5 montrent que le matériau final est constitué en majeure partie d'air. En effet, pour une structure cubique faces centrées parfaite, le taux de remplissage en air est de 74%. Il n'y a donc dans ce cristal que 26% de composite magnéto-optique. Pour espérer mesurer des effets Faraday en traversant quelques μm de matériau, il a fallu augmenter fortement la concentration en nanoparticules magnétiques par rapport aux concentrations utilisées pour les convertisseurs de modes sur verre qui sont toujours inférieures à 2%.

La Figure 5.6 donne la rotation Faraday mesurée à 820 nm pour quatre couches minces réalisées par trempage dans une solution de TEOS dopée par un ferrofluide de ferrite de Cobalt. Le rapport volumique entre la solution de TEOS et le ferrofluide a été modulé de 2:5 à 2:2. Les courbes présentées ont une allure typique de rotation Faraday

non-réciproque avec une valeur à saturation qui suit l'augmentation de la quantité de ferrofluide. Cette valeur à saturation atteint même $6601^\circ/\text{cm}$ pour la plus forte concentration. Cela correspond à un taux de dopage de 39 % dans la silice. C'est une valeur très importante obtenue dans une couche mince d'épaisseur 337 nm. Une telle concentration est rendue possible par la forte rétraction des matrices sol-gel minérales lors de la gélification. Ce phénomène qui m'a longtemps gêné pendant ma thèse puisque source de contraintes et biréfringences [LAN05], s'est avéré dans cette étude très positif.

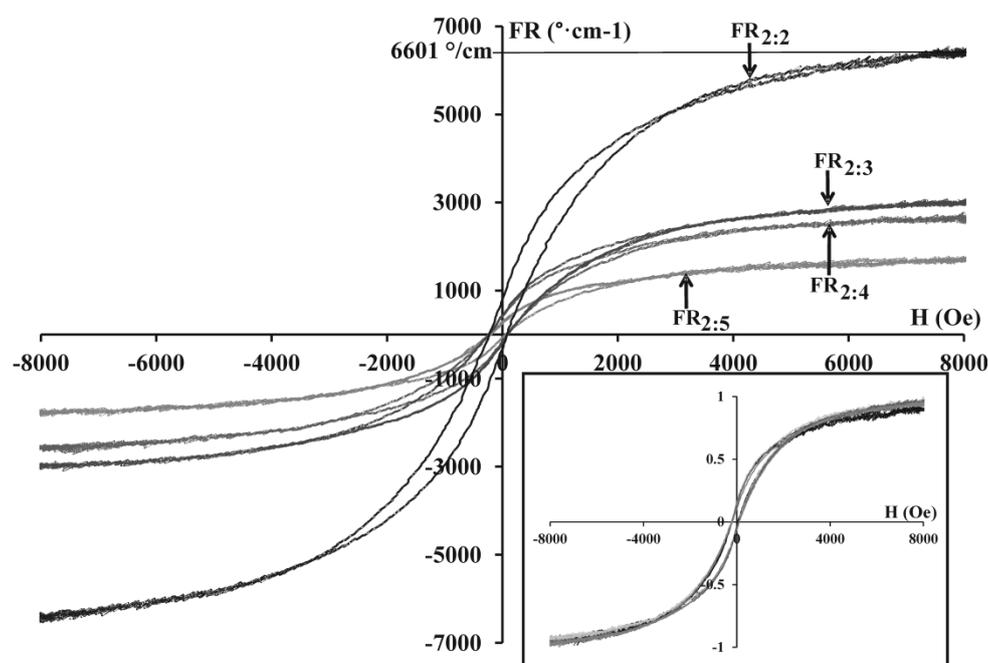


Figure 5.6 : Rotation Faraday en fonction du champ magnétique appliqué pour 4 couches minces de TEO dopées. La mesure est faite à 820 nm. $x:y$ indique le rapport volumique entre le ferrofluide de ferrite de cobalt et la solution de TEOS. En insert, les mêmes courbes normalisées à leur amplitude maximale.

L'allure normalisée des mêmes courbes donnée en insert de la Figure 5.6 montre que le cycle d'hystérésis est identique pour chacun des dopages. Ceci est une indication que la qualité du dopage n'est pas détériorée lors de l'augmentation de la quantité de ferrofluide. L'état magnétique des particules reste le même sans naissance d'agrégats de tailles plus importantes.

5.3.3. Moyens de caractérisation

Les effets recherchés dans ces cristaux magnéto-photoniques 3D sont une modification de la rotation Faraday dans la zone de la bande interdite photonique comparativement au spectre présenté par le même matériau sans structuration. Nous avons dû développer des instruments de mesures dédiés non présents au laboratoire avant

cette étude. Pour mesurer les bandes photoniques, nous utilisons une lampe blanche halogène de 7 W associée à deux spectrophotomètres CCD permettant de couvrir la gamme [400-1600] nm. Ces équipements nous permettent une mesure simple et rapide de la transmittance des échantillons et ainsi de déterminer les positions où l'arrangement produit une bande interdite photonique.

En ce qui concerne la mesure des effets magnéto-optiques, un banc dédié a été réalisé par D. Jamon, ingénieur de recherche au laboratoire. Ce banc, illustré sur la Figure 5.7, est basé sur la même configuration polarimétrique présentée au chapitre précédent, à savoir l'utilisation d'une modulation photoélastique associée à une détection synchrone. L'intensité à la fréquence fondamentale fournit une image de l'ellipticité Faraday et celle du second harmonique une image de la rotation Faraday. Pour faire varier la longueur d'onde de la lumière incidente, une lampe Xénon de 450 W est associée à un monochromateur. L'ensemble des optiques de mise en forme est constitué de miroirs sphériques. Un électroaimant percé placé sur le chemin de l'onde permet d'appliquer à l'échantillon sous test un champ magnétique longitudinal ajustable dans la gamme [0-0,8 T].

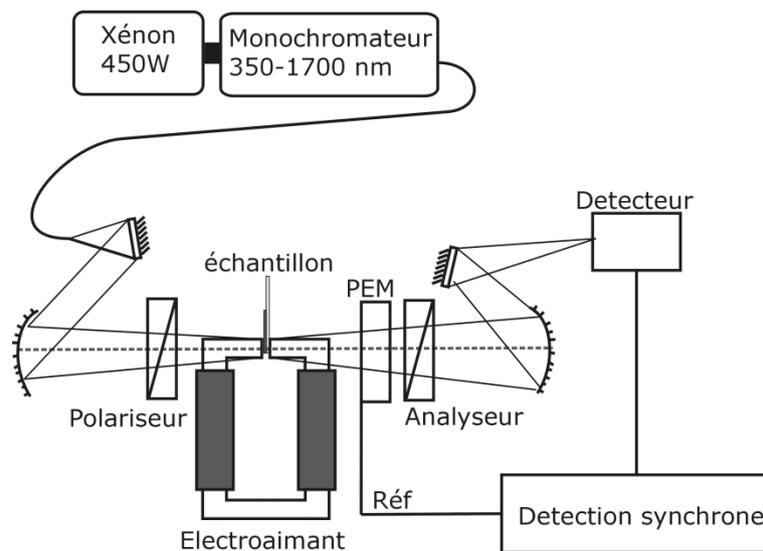


Figure 5.7 : Banc de mesure spectrale de la rotation et de l'ellipticité Faraday, développé pour l'étude des cristaux magnéto-photoniques.

La détection synchrone fournissant des intensités proportionnelles aux grandeurs mesurées, il est nécessaire d'effectuer un calibrage pour obtenir une mesure absolue. Vu la constitution du banc, le coefficient de calibrage dépend évidemment de la longueur d'onde. Pour la rotation Faraday, une rotation connue du polariseur d'entrée fournit une référence totalement achromatique. Par contre, pour l'ellipticité nous n'avons pas encore trouvé le moyen de générer une ellipticité de référence calibrée dans un domaine spectral aussi large. Ainsi, pour la rotation Faraday, les mesures sont absolues alors que pour l'ellipticité elles sont relatives.

5.4. Résultats

Sur la Figure 5.8, sont reportées les transmittances de quatre opales inverses dopées en nanoparticules magnétiques, réalisées avec les 4 tailles de billes de polystyrène disponibles. Chaque courbe présente une bande photonique qui apparaît comme un creux de transmittance assez marqué. La position spectrale du centre de la bande photonique suit l'augmentation de la taille de billes comme indiqué sur l'insert de cette courbe. Ceci est cohérent avec la loi de Bragg donnée au paragraphe 5.2 qui montre que si l'organisation est de type cubique à faces centrées, la longueur d'onde centrale est proportionnelle au diamètre des billes. Conjointement aux image MEB du paragraphe 5.3.1, ces mesures illustrent la capacité de la méthode d'élaboration de produire des organisations périodiques 3D à bande interdite.

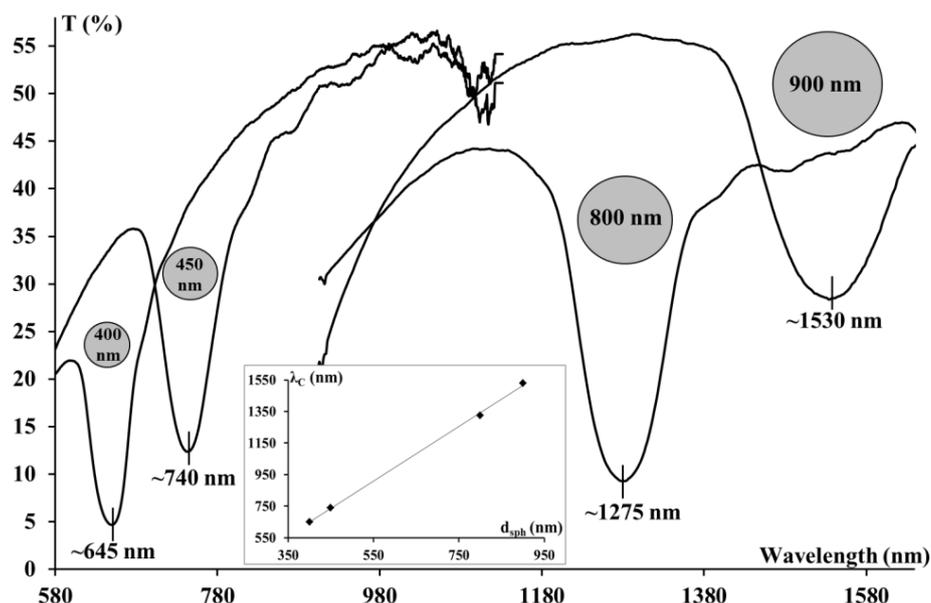


Figure 5.8 : Transmittance de différentes opales inverses dopées réalisées avec 4 taille de billes différentes. Le graphe en insert montre la position spectrale de la bande interdite en fonction du diamètre des billes.

La transmittance d'une opale dopée est comparée sur la Figure 5.9 à celle d'une couche mince de référence en silice dopée par les même nanoparticules. On retrouve pour l'opale dopée une bande interdite centrée vers 750 nm. La comparaison avec la couche de référence montre l'apparition d'une bande d'absorption en dessous de 900 nm, qui est en tout point similaire à celle des nanoparticules de ferrite de cobalt présentée sur la Figure 3.2. Ceci indique que l'opale inverse possède à la fois une organisation 3D et un dopage en nanoparticules magnétiques, ce qui valide le principe d'élaboration.

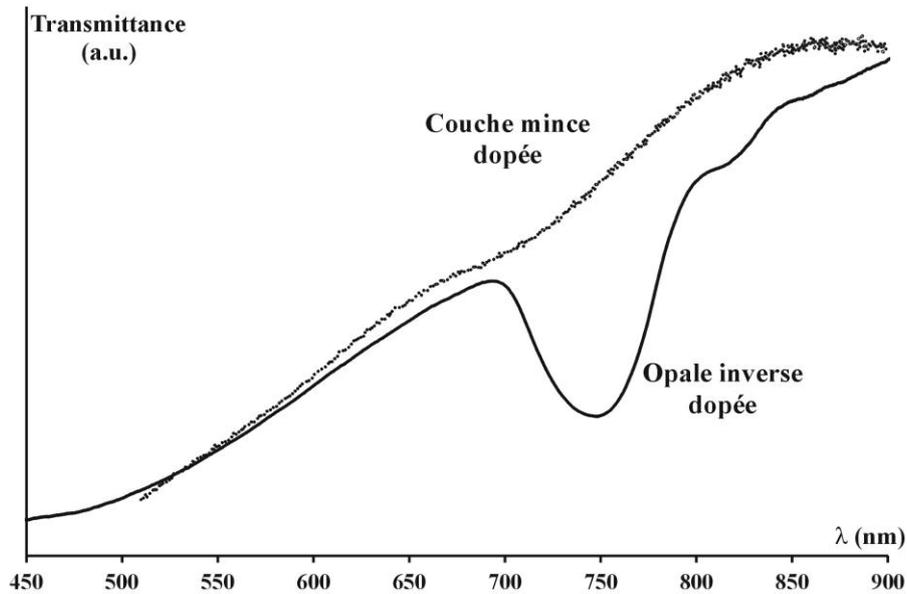


Figure 5.9 : Transmittance normalisée d'une couche mince de silice dopée par des nanoparticules de ferrite de cobalt, et d'une opale inverse de silice dopée avec les mêmes nanoparticules. (Pour l'opale : Billes de PS initiales de diamètre 450 nm).

Concernant les études magnéto-optiques de ces cristaux magnéto-photoniques, les résultats sont présentés sur la Figure 5.10 pour la rotation Faraday et la Figure 5.11 pour l'ellipticité. Avant de commenter ces courbes, il est nécessaire de préciser que la reproductibilité des mesures n'est pas bonne. Il est acquis que lorsqu'un échantillon de qualité est élaboré, des modifications fortes apparaissent sur le spectre de rotation et d'ellipticité Faraday. Cependant, ces modifications ne sont pas toujours les mêmes. J'ai tout de même représenté ici dans les deux figures les évolutions observées le plus régulièrement.

Que ce soit pour la rotation ou l'ellipticité, l'allure spectrale est modifiée dans la zone de la bande interdite photonique. En dehors de cette bande, les allures sont les mêmes entre la couche de référence et l'opale inverse, mais dans la bande apparaît une baisse de l'effet au centre puis deux « bosses » sur les bords. Ces deux bosses, notamment dans le cas de l'ellipticité de la Figure 5.11 peuvent laisser croire à l'existence d'une exaltation. Néanmoins, l'ellipticité est une mesure relative. De plus, ne connaissant pas l'épaisseur de l'opale à l'endroit de la mesure magnéto-optique, nous ne pouvons pas déduire la valeur de la rotation Faraday spécifique pour la comparer à celle de la couche de référence. Ainsi, il est difficile de parler aujourd'hui d'exaltation en bords de bande photonique interdite.

Une dernière série d'études est menée actuellement par E. Abou Diwan pour essayer d'apporter des réponses à cette question, mais pour l'instant, malgré un nombre élevé d'échantillons il n'a pas été possible de trancher clairement sur l'exaltation de l'effet, et par la même du facteur de mérite.

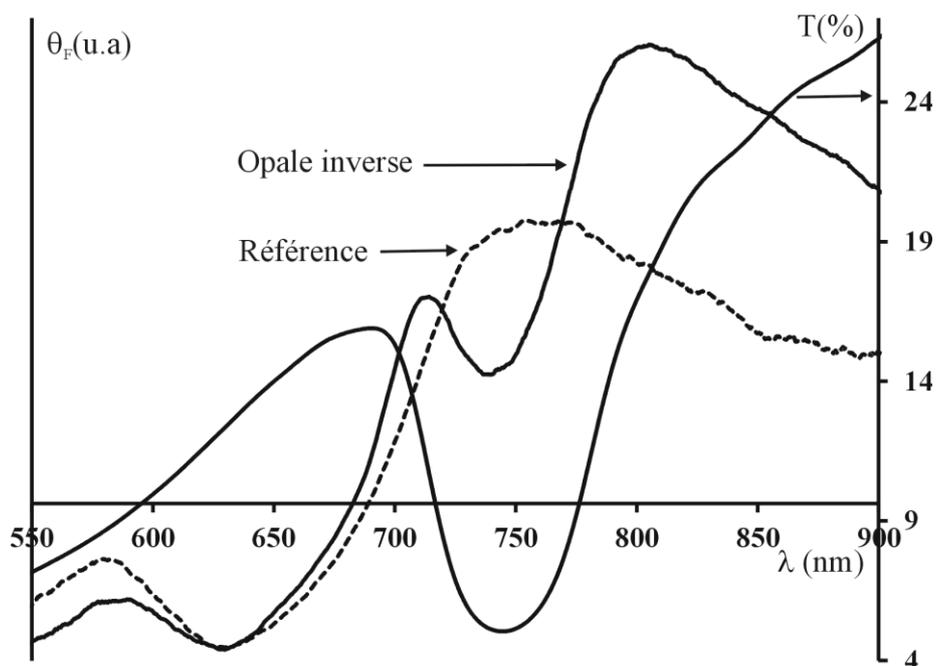


Figure 5.10 : Evolution spectrale de la transmittance et de la rotation Faraday dans une opale inverse dopée. Les billes de polystyrène de départ ont un diamètre de 450 nm. La rotation Faraday d'une couche de référence est également donnée.

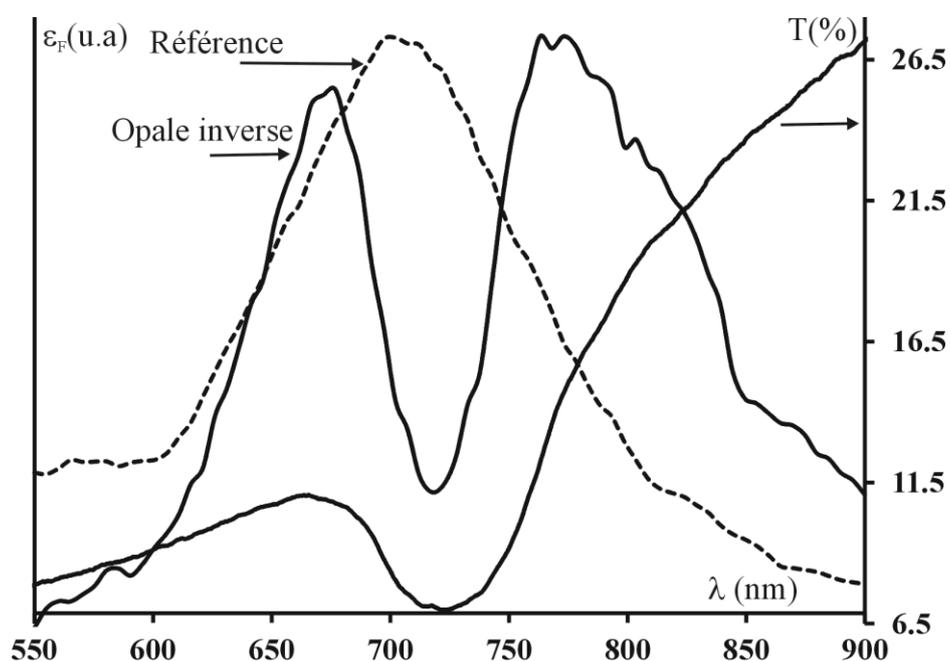


Figure 5.11 : Evolution de la transmittance et de l'ellipticité Faraday dans une opale inverse dopée. Les billes de polystyrène de départ ont un diamètre de 450 nm. L'ellipticité Faraday d'une couche de référence est également donnée.

5.5. Bilan

Dans ce chapitre, les travaux relatifs à l'élaboration et l'étude de cristaux magnéto-photoniques 3D par voie sol-gel ont été présentés. L'intérêt de ces structures réside dans leur capacité potentielle d'exalter les effets magnéto-optiques en bords de bande interdite photonique. En adaptant une méthode basée sur l'imprégnation sol-gel d'une opale de polystyrène, nous avons pu réaliser des organisations périodiques 3D de trous d'air dans notre matériau composite magnéto-optique. Les mesures de transmittances et les images MEB attestent de cette organisation. Les mesures magnéto-optiques mettent en évidence une modification spectrale très forte de l'effet Faraday dans la zone de la bande interdite photonique, ce qui montre l'influence de l'organisation sur l'interaction magnéto-optiques. Par rapport à ce que j'ai pu lire dans la littérature, ces modifications sont les plus fortement marquées pour des cristaux magnéto-photoniques 3D. Malheureusement, il n'a pas été possible de trancher quant à l'existence d'une exaltation éventuelle.

Nous avons également essayer de déposer une opale inverse non dopée sur un guide par échange d'ions sur verre pour mettre en évidence une éventuelle bande interdite photonique. Cependant, les essais n'ont montré que des pertes importantes certainement dues à l'inhomogénéité de l'opale à la surface du guide.

Malgré la mise au point d'une méthode d'élaboration, d'un banc de caractérisation, et d'avancées significatives sur le sujet, il faut se poser la question de la poursuite de cette activité après deux thèses consacrées au sujet.

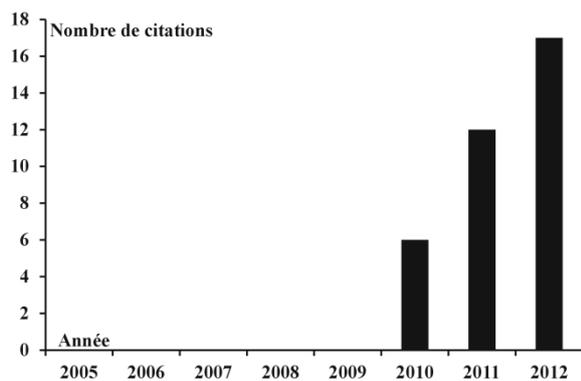
6. PERSPECTIVES DE PROJETS FUTURS

Après avoir présenté de façon relativement exhaustive les travaux réalisés depuis 2004 au sein du laboratoire LT2C, il est temps de définir les orientations scientifiques que je souhaite leur donner à l'avenir. Ces orientations sont définies dans le cadre d'une future intégration pour le prochain quinquennal des activités du LT2C au sein du laboratoire Hubert Curien (LaHC) UMR CNRS 5516 de l'Université Jean Monnet. Pour mener à bien cette intégration, un projet commun inter-laboratoire « magnéto-optique » a été défini entre les équipes pour un démarrage officiel en janvier 2014. Au-delà des aspects scientifiques, ce projet doit servir de point d'ancrage pour construire et réussir cette intégration. Un travail important a donc été réalisé pour définir des sujets de recherche présentant un intérêt pour les deux laboratoires et avec une valeur ajoutée certaine. Ayant initié et animé cette réflexion, je suis aujourd'hui responsable de ce projet inter-laboratoire. Mes perspectives de projets futurs lui sont donc associées.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à une analyse qualitative des travaux réalisés, du positionnement des travaux et de mon environnement de travail. Dans la deuxième partie, je détaillerai l'organisation et la mise en œuvre prévisionnelle du projet commun. Les orientations scientifiques tracées seront alors explicitées dans la troisième partie.

6.1. Analyse

Les chapitres précédents ont montré que depuis 2004, nous avons su faire évoluer notablement les capacités de notre matériau magnéto-optique composite en termes de biréfringence et rotation Faraday intrinsèque. D'un rendement de conversion TE/TM potentiel de l'ordre de 10^{-3} % dans une couche mince, nous sommes passés aujourd'hui à un rendement réel d'au moins 50% sur un dispositif intégré. Ceci signifie que nous pouvons aujourd'hui travailler à la mise en œuvre de convertisseurs non-réciproques en vue de la réalisation d'isolateurs optiques intégrés. De plus cela se fait par une intégration du matériau sur une plate-forme d'optique intégrée sur verre qui ne produit pas de pertes supplémentaires. Cette évolution à un caractère « fondateur » pour la reconnaissance de nos activités. Elle fait que nous avons acquis une certaine légitimité dans le domaine, et surtout elle nous encourage à poursuivre dans cette voie.



A titre d'illustration, est donnée sur la figure ci-contre la représentation du nombre de citations par année de nos travaux sur la période 2005-2012. Il apparaît clairement qu'avant 2010 mes activités n'étaient pas reconnues dans la communauté. Depuis une publication sur les capacités magnéto-optiques de notre composite dans *Applied Physics Letters* en 2009, le nombre de citations

a décollé. De façon plus qualitative, une partie de ces citations vient d'équipes internationalement reconnues dans le domaine magnéto-optique. Ceci signifie que nos travaux ont un sens et justifie, de mon point de vue, l'approche technologique que nous employons.

En termes de positionnement des activités sur le plan national, très peu d'équipes travaillent au développement de matériaux, composants ou applications magnéto-optiques. On compte de façon presque exclusive l'Institut d'Electronique Fondamentale (IEF) à Paris Sud, qui a une forte expérience des composants magnéto-optiques développés en technologie semi-conducteur. Nous avons d'ailleurs eu des échanges avec cette équipe au travers de jurys de thèse, et nous discutons actuellement de projets communs. Le domaine « magnéto-optique » me paraît donc être une niche scientifique intéressante.

Pour développer notre matériau, et l'appliquer aux composants ou cristaux magnéto-photoniques, nous avons développé au cours des années des moyens de caractérisation dédiés de très bonne qualité. Ils nous permettent de mesurer rapidement des effets magnéto-optiques ou d'autres effets de polarisation en configuration d'espace libre et guidée. Ces moyens expérimentaux sont un acquis important et constitue une base solide pour nos prochaines études.

Parmi les travaux présentés dans les chapitres précédents, ceux consacrés aux cristaux magnéto-photoniques me questionnent. Il fut scientifiquement très instructif de se forger une compréhension des cristaux photoniques et d'en comprendre les intérêts pour les applications. Néanmoins, j'ai le sentiment que nous ne progressons pas sur le sujet. Même si nous avons montré des modifications spectrales très marquées de la rotation Faraday dans la zone de la bande interdite photonique, les mesures et les échantillons ne sont pas assez reproductibles. Ainsi, la démonstration de l'exaltation n'est pas claire. J'envisage donc de discuter de ces résultats et problèmes avec des personnes plus compétentes dans le domaine pour décider de la continuation ou non des activités sur ce sujet.

De façon plus générale, l'équipe « magnéto-optique » est constituée de 3 à 4 permanents dans un laboratoire « équipe d'accueil » de l'Université constitué de 15 permanents. Il s'agit de tailles modestes pour travailler et exister dans la configuration

actuelle de la recherche. Il est donc absolument primordial de nouer des collaborations avec des équipes au plan national et international. La collaboration historique avec PECSA nous permet ainsi d'accéder à des nanoparticules magnétiques de qualité indispensable à notre matériau. Dans un autre registre, la collaboration avec l'IMEP-LAHC nous apporte une caution scientifique sur les composants optiques intégrés. Plus personnellement, cette collaboration a élargi mon champ de compétences et de culture scientifique, et me rend plus crédible également pour faire des cours d'optique intégrée à Telecom St Etienne. Sans que cela ne devienne trop imposant, il me paraît nécessaire de continuer à développer de nouvelles collaborations. Les premiers contacts noués avec l'IEF à Paris Sud devront être structurés autour d'un sujet ou un programme commun, et il peut être intéressant de se rapprocher d'une équipe orientée sur l'optique intégrée sur silicium pour y appliquer notre matériau.

Enfin, n'ayant pas fait de Post-Doc dans un autre laboratoire, je souhaiterai connaître une expérience de la recherche dans un autre contexte. Pour cela, j'envisage dans les années à venir de partir travailler plusieurs mois à l'étranger dans un laboratoire anglophone. Les supports de Congés Recherche et Reconversion Thématique de l'UJM ou du CNU peuvent m'aider dans cette démarche.

Dans l'immédiat, une nouvelle configuration de travail se dessine au niveau du laboratoire et de l'Université pour le prochain contrat quinquennal.

6.2. Configuration pour le prochain contrat quinquennal

Dans la lignée des arguments présentés précédemment, le laboratoire LT2C a fait le constat au cours du présent contrat quinquennal qu'il paraissait difficile de rester à l'avenir dans la configuration actuelle d'Equipe d'Accueil. L'heure est au regroupement des forces au sein des Universités, et la question de la pérennité d'une équipe de 15 permanents est posée. Ainsi, même si l'on peut se satisfaire du fonctionnement actuel du laboratoire, une intégration dans une structure plus importante et plus reconnue est devenue indispensable. Convaincu de l'intérêt d'une structuration locale, j'ai pris l'initiative au printemps 2012 de discussions avec le laboratoire Hubert Curien autour de la définition d'interactions scientifiques pouvant conduire à notre intégration.

Le département « Optique et photonique » de ce laboratoire compte de nombreuses activités dans des domaines tels que l'interaction laser/matière, la synthèse et la caractérisation de matériaux, la micro/nano-structuration de surfaces pour des applications diverses allant du capteur au dispositif photochromique en passant par des éléments diffractifs visant au contrôle de polarisation.

Suite à de nombreux échanges, d'études bibliographiques et d'études préliminaires, un projet scientifique a été rédigé autour du thème « magnéto-optique ». Les directions des

laboratoires ont choisi de l'identifier comme un projet commun inter-laboratoire à partir de juillet 2013. Le Tableau 6.1 recense les personnes qui se sont positionnées pour participer à ce projet. Parmi elles, trois maîtres de conférences et un ingénieur de recherche seront impliqués à 100 %, un maître de conférences à 50 %. Pour les autres, les niveaux d'implication ne sont pas encore définis. Ils dépendront certainement des résultats des premiers essais que nous avons lancés et des engagements pris sur d'autres projets. On peut noter cependant la diversité et la complémentarité des compétences des participants qui constituent une base scientifique et technique solide sur laquelle le projet pourra s'appuyer.

Nom	%	Labo	Compétences
E. Gamet (MC)	100 %	LaHC	Réseaux, NP métal., AFM
D. Jamon (IGR)	100 %	LT2C	Mesures MO espace libre et guidé
M.F. Blanc Mignon (MC)	100 %	LT2C	MEB, synthèse sol-gel
J.P. Chatelon (MC)	50 %	LT2C	Profilométrie, synthèse sol-gel
F. Royer (MC)	100 %	LT2C	Interactions MO, NP magnétiques
F. Garrelie (PU)	/	LaHC	PLD, Dépôt Ni
A.S. Loir (MC)	/	LaHC	PLD, Dépôt Ni
E. Marin (MC)	/	LaHC	Fibre microstructurée, Capteurs à fibres
F. Goutaland (MC)	/	LaHC	NP par échange ionique, Spectrophotométrie
N. Ollier (MC)	/	LaHC	NP par échange ionique, Modélisation
F. Vocanson (PU)	/	LaHC	Chimie du sol-gel et des NP
C. Hubert (MC)	/	LaHC	NP métal. par lithographie électronique
N. Destouches (PU)	/	LaHC	NP métal. par insolation, Photochromisme
Y. Jourlin (PU)	/	LaHC	Réseaux, capteurs, Microstructuration

Tableau 6.1 : Recensement des personnes impliquées dans le projet commun « magnéto-optique ». Les laboratoires d'origine, l'implication si possible, et les compétences sont précisées.

Pour démarrer les activités, nous avons avec E. Gamet du LAHC, déposé une demande conjointe de financement auprès de notre Université en répondant à un appel à projet interne en septembre dernier. Notre demande portait sur un soutien en fonctionnement et équipement, et nous avons obtenu, de façon officieuse pour l'instant, la totalité de notre demande d'investissement (22 k€). Cette somme permettra de construire une nouvelle configuration de mesure magnéto-optique en réflexion. L'objectif est de pouvoir mesurer des rotations de polarisation lumineuse lors de la réflexion sur un matériau magnéto-optique. L'intérêt de la mesure en réflexion apparaîtra au paragraphe 6.3.3 de ce chapitre. La représentation schématique de ce banc est donnée sur la Figure 6.1 et le principe de la mesure est le même que celui que nous utilisons en mode transmission, présenté au chapitre précédent. D'ailleurs la source, le monochromateur en entrée, les détecteurs et la détection synchrone en sortie seront partagés avec ce banc.

Au-delà de cet aspect financier, le financement de notre projet montre que l'Université nous soutient dans notre volonté de rapprochement de laboratoires.

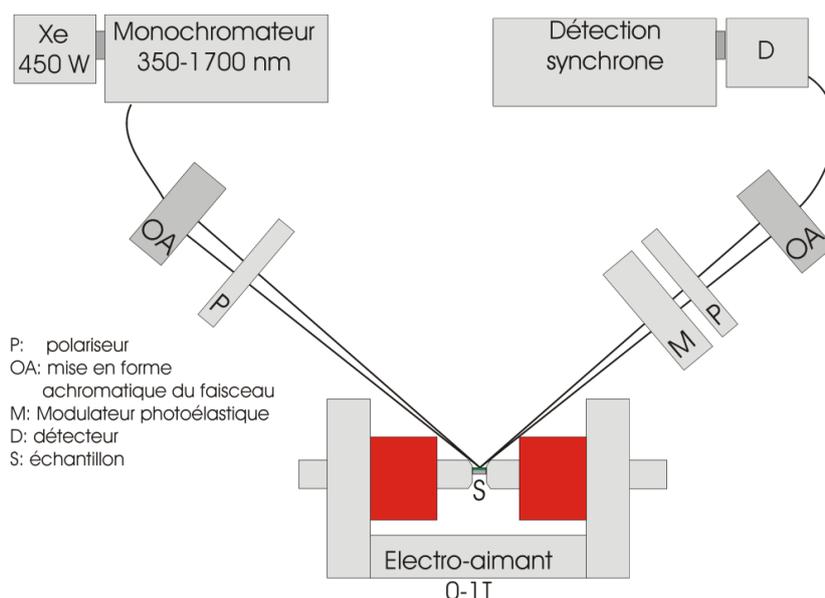


Figure 6.1 : Description du banc de mesure magnéto-optique à développer. L'ensemble source-monochromateur et l'ensemble détecteur-détection synchrone sont déjà disponibles. L'acquisition des autres équipements (modulateur photo-élastique, polariseurs, optiques de mise en forme...) est financée par l'UJM.

Enfin, dans le sillage de cette structuration autour du thème « magnéto-optique », d'autres échanges et discussions scientifiques ont débutés et sont en cours autour du dépôt et de la mise en forme des matériaux magnétiques et des composants radio et hyperfréquences. Ceci devrait raisonnablement conduire à une intégration des activités du laboratoire LT2C au sein de l'UMR CNRS LaHC au prochain contrat quinquennal en janvier 2015. Dans ce cadre, le projet commun inter-laboratoire « magnéto-optique » devrait constituer une équipe-projet du département « Optique, Photonique, Hyperfréquences » du LaHC. Dans la partie suivante, je vais détaillé le contenu scientifique de ce projet.

6.3. Projet scientifique

Ce projet a été construit à la fois dans la continuité de nos activités au LT2C et dans le cadre de l'intégration au LaHC. Il s'est constitué autour des mots clés scientifiques suivants : Matériaux Magnétiques / Effets magnéto-optiques / Composants intégrés / Micro(Nano)Structuration / Nanoparticules / Matériaux métalliques / Effet Plasmonique.

Le projet est décliné en trois axes qui interagissent fortement, et seront certainement appelés à évoluer au cours des premières études. Ils sont détaillés dans les trois parties suivantes.

6.3.1. Composants magnéto-optiques intégrés

Le travail dans cet axe se place dans la continuité des travaux présentés au chapitre 4. Il s'appuie sur les compétences et moyens de caractérisation développés en magnéto-optique d'espace libre et guidée.

- **Convertisseurs non-réciproques intégrés : vers l'isolateur**

Le chapitre 4 de ce document a montré les résultats très prometteurs obtenus en 4 ans sur les convertisseurs de modes hybrides sur verre. Des avancées régulières ont permis d'atteindre aujourd'hui la réalisation d'un rotateur 45° non réciproque. Du côté de l'IMEP-LAHC, F. Parsy, qui soutient sa thèse en cette fin d'année, a réalisé un séparateur de polarisation sur verre, et posé les bases de la réalisation d'un rotateur réciproque avec la même technologie. Il est donc tout à fait prometteur de s'engager sur la voie de la réalisation d'un démonstrateur d'isolateur intégré. Pour cela, nous avons avec E. Ghibaud, maître de conférences à l'IMEP-LAHC déposé en février dernier une demande de financement à l'ANR P2N. Le classement obtenu, premier sur liste complémentaire, est à la fois décevant et encourageant. Une nouvelle demande a été faite cette automne. Le consortium regroupe PECSA pour l'élaboration des nanoparticules magnétiques, LT2C pour la réalisation du rotateur non réciproque, IMEP-LAHC pour la réalisation des fonctions passives (séparateur et rotateur réciproque), et l'entreprise Teem Photonics basée à Meylan pour la connectique et le packaging du dispositif.

Sans attendre les résultats de cette nouvelle demande de financement à l'ANR, une nouvelle doctorante, E. Jordan, débute un travail à l'IMEP-LAHC sur la réalisation des fonctions passives et la réalisation d'un isolateur intégré sur verre. Cela montre la vitalité de notre collaboration.

De notre côté, les travaux se poursuivent en partie par la présence de J.P. Garayt, chercheur bénévole au laboratoire. Enseignant en classe préparatoire, il souhaite effectuer une thèse de doctorat dans notre équipe. Son travail actuel porte sur l'optimisation du convertisseur non-réciproque. Il s'agit de reprendre une étude plus systématique notamment sur le taux de dopage des couches déposés et la mesure de conversion en fonction de l'orientation de la polarisation d'entrée. Un deuxième point de son travail sera consacré à la réalisation d'un convertisseur de mode autopolarisé. Ce type de composant peut fonctionner sans aimant de polarisation, ce qui enlève une étape technologique difficile d'intégration de ces aimants. Il faudra pour cela utiliser des nanoparticules magnétiques de ferrite de cobalt de plus grande taille, et réaliser une orientation magnétique pendant le dépôt afin de maximiser la rémanence d'effet. L'utilisation de particules de plus grande taille devrait également permettre d'augmenter le facteur de mérite du matériau et donc du composant (voir paragraphe 3.3.1). Ce sera un point à vérifier.

Nous avons jusqu'ici toujours travaillé dans la configuration « Faraday », à savoir la réalisation de conversion de polarisation sous champ magnétique longitudinal. La revue des isolateurs du chapitre 2 a montré l'intérêt de réaliser des structures à constantes de propagation TM non-réciproques en champ transverse. Le banc de mesure en configuration guidée possédant désormais une calibration ellipsométrique, il est possible de mesurer le déphasage total accumulé par le mode TM par rapport au mode TE lors de la propagation dans un guide. Ainsi, J.P. Garayt va également s'attacher à étudier cette modification de déphasage lors de l'application d'un champ magnétique transverse. Des interféromètres de Mach-Zehnder présents sur les plaquettes pourront servir au besoin à cette étude

L'application de notre matériau magnéto-optique composite a été faite sur les guides sur verre à échange d'ions parce que la proximité technologique était évidente. Néanmoins, rien ne s'oppose a priori au dépôt de notre matériau sur d'autres substrats ou plate-formes d'optique intégrée. Un couplage avec des composants en technologie « silicium » est souhaitable vu le développement actuel des puces optiques associées. Un premier essai a été réalisé avec l'équipe de S. Honkanen sur des guides silicium de type slots asymétriques. L'idée était de remplir le slot de notre matériau composite et de mesurer des effets non-réciproques sur un Mach-Zehnder. Le dépôt a été réalisé, de la même façon que pour les opales, mais les mesures réalisées par les partenaires n'ont rien donné. Je crois qu'ils n'avaient pas suffisamment pris en compte les pertes induites par les matériaux magnéto-optiques, et ainsi construit un banc de mesure pas assez sensible. Nous discutons actuellement pour imaginer d'autres essais de dépôts mais, cette fois, pour une mesure sur nos instruments. Cette équipe n'étant pas spécialiste des isolateurs intégrés, il serait peut-être plus pertinent de se rapprocher d'une équipe ayant des compétences dans ce domaine et de proposer un dépôt de notre matériau sur leurs dispositifs.

Enfin, il est souhaitable d'envisager d'autres formes d'applications pour nos matériaux et composants magnéto-optiques. Vu que les pertes sont relativement importantes, il est intéressant de s'orienter du côté des capteurs de courant ou de champ magnétique où les pertes ne sont pas forcément un problème, voire même du côté des modulateurs de lumière. Pour ces derniers, l'approche magnéto-optique est intéressante car elle assure des vitesses de modulation importantes. Ayant peu d'expérience dans ces domaines, je me dois de travailler ce point.

- **Matériau pour l'intégration**

Le développement futur de nos composants intégrés passe, à n'en pas douter, par une amélioration notable du facteur de mérite de notre matériau composite. Nous avons montré sa compatibilité et ses capacités magnéto-optiques, mais il faut désormais faire passer son facteur de mérite de $2^\circ/\text{dB}$ à au moins $45^\circ/\text{dB}$. J'ai expliqué précédemment

que la piste autour de l'utilisation des cristaux magnéto-photoniques à base d'opale 3D me paraît aujourd'hui compliquée et trop incertaine. En revanche, l'étude plus spécifique des nanoparticules magnétiques du chapitre 3 (paragraphe 3.3) a montré que des progrès significatifs peuvent être envisagés sur ce point en améliorant la qualité des nanoparticules de ferrite de Cobalt. Ce travail se poursuit actuellement dans le cadre de la thèse de H.L. Nandiguim afin de quantifier précisément le gain obtenu par l'utilisation de ces nouvelles particules et d'expliquer son origine physique en étudiant de plus près leur constitution. Des études magnétiques complémentaires en fonction de la taille pourront être faites avec nos collègues de l'Académie Slovaque de Kosice, puisque des échanges de chercheurs sont programmés dans leur budget pour 2014.

Dans la même idée, les résultats du chapitre 3 ont montré la possibilité d'utiliser des nanoparticules de YIG pour doper le composite. L'intérêt est aujourd'hui limité par le trop faible facteur de mérite des couches réalisées. Néanmoins, dans la mesure où la compatibilité chimique a été démontrée et que le Ce-YIG constitue le meilleur matériau magnéto-optique à 1550 nm, il est indispensable de poursuivre les travaux sur ce point. Il s'agit ici d'un travail de synthèse chimique qui dépasse totalement mes compétences. Il est donc indispensable de trouver des moyens pour que l'Université de Szeged en Hongrie puisse financer ces activités. Une possibilité existe auprès de l'ambassade de France à Budapest sous la forme de bourse de thèse en échange. Il est nécessaire de tout d'abord publier les travaux réalisés pour démontrer nos activités communes et argumenter la demande.

- **Fibre à rotation magnéto-optique**

Ce dernier point constitue l'une des premières études menées dans le cadre du rapprochement des laboratoires à travers la réalisation de capteurs magnétiques fibrés [CAN10]. Ceux-ci sont obtenus par imprégnation d'une fibre optique microstructurée par une solution sol-gel dopée en nanoparticules magnétiques. Les premières réalisations démontrent des rotations de polarisation importantes sous champ magnétique, et valident la faisabilité des dispositifs. Les courbes reportées sur la Figure 6.2 illustrent l'effet non-réciproque obtenu dans une fibre dopée comparativement à une solution de ferrofluide avec les mêmes nanoparticules.

Le travail consiste désormais à définir précisément les potentialités des dispositifs en optimisant le design puis l'élaboration. Un support de post-doc avait été obtenu sur ce sujet auprès de l'Université pour l'année universitaire 2013/2014. Malheureusement la candidate retenue s'est désistée. D. Jamon et E. Marin du LaHC vont tout de même poursuivre ce travail.

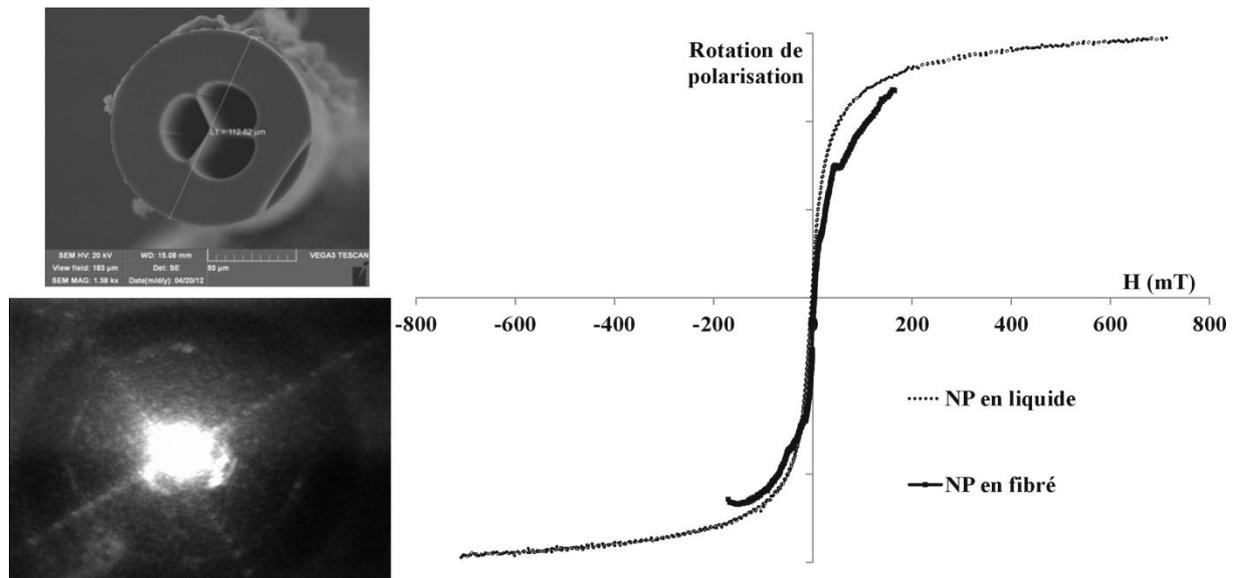


Figure 6.2 : *Gauche* : Image MEB de la fibre microstructurée, et image du spot de sortie de cette fibre dopée par des nanoparticules de ferrite de cobalt. *Droite* : Rotation de polarisation mesurée dans la fibre en fonction du champ magnétique appliqué. Pour comparaison, la rotation mesurée en liquide pour les mêmes particules.

6.3.2. Structurations 1D/2D de matériaux MO

- **Photopolymérisation du composite**

Une étude a été amorcée sur la photopolymérisation des matrices sol-gel de matériau composite magnétique. En effet, les matrices organique-inorganiques nécessitent un traitement UV pour assurer leur finalisation, ce qui les rend photopolymérisables. Les zones non insolées sont éliminées par un lavage à l'éthanol. Les premiers tests ont permis la création de motifs (lignes) larges d'une centaine de micromètres et la mise en évidence de difficultés de développement lorsque les matrices sont fortement dopées. Il est nécessaire de poursuivre ce travail afin de déterminer la dimension critique (CD) et d'optimiser le procédé de développement. Le but est, ici, de pouvoir polymériser localement les couches pour créer des motifs millimétriques à submicrométriques.

Ce travail pourra être mis à profit pour différentes études. Tout d'abord, cela pourra servir à localiser le dépôt magnéto-optique sur un substrat. Dans l'optique de la réalisation d'un isolateur sur verre, plusieurs fonctions doivent être enchaînées sur le même substrat, mais seule la partie relative au convertisseur non-réciproque doit être recouverte de matériau magnéto-optique. Or le dépôt par dip-coating recouvre toute la surface. Par une simple étape d'insolation UV sous masque la matrice composite pourra être localisée uniquement dans la zone du convertisseur non réciproque et enlevée ailleurs.

De plus, le matériau composite est aujourd'hui testé au LT2C pour assurer le cœur magnétique d'une inductance planaire radiofréquence ou d'un résonateur

hyperfréquences. L'adaptabilité du matériau composite en termes de dépôt, et l'emploi de nanoparticules magnétiquement monodomaines présentent un grand intérêt pour ces composants. Dans les deux cas, une photopolymérisation du matériau permettra de localiser le matériau magnéto-optique uniquement là où il est utile et réduire ainsi le niveau de pertes induites actuellement par l'utilisation d'une couche pleine plaque de YIG.

Enfin, il pourra permettre d'envisager la réalisation de structures diffractantes magnéto-actives. A partir des composants développés au LaHC, notamment ceux basés sur des propriétés de polarisation [TON12], le caractère magnéto-optique doit apporter une agilité en produisant des rotations de polarisation qui, dans une structure résonnante induiront des modifications fortes de polarisation.

- **Composants à structuration périodique**

L'étude des cristaux magnéto-photoniques 3D a montré ses limites en termes d'exaltation des effets car l'homogénéité et la reproductibilité des échantillons n'est pas satisfaisante. Néanmoins il a été démontré de façon très claire dans la littérature que l'utilisation d'un cristal photonique 1D permet d'exalter les effets de conversion de mode [LEV06] et d'augmenter le facteur de mérite magnéto-optique [KAH04]. L'exaltation conduit également à une réduction importante de la taille des dispositifs ce qui est intéressant pour une application intégrée. Ainsi une structuration du matériau magnéto-optique composite permettra de réaliser des cristaux magnéto-photoniques 1D qui pourront remplacer la simple couche mince magnétique dans les structures hybrides à conversion de modes (voir Figure 6.3 en haut à gauche). Ce qui sera perdu en bande passante par l'effet résonnant devrait être compensé par une augmentation du facteur de mérite et une réduction de la taille du convertisseur intégré.

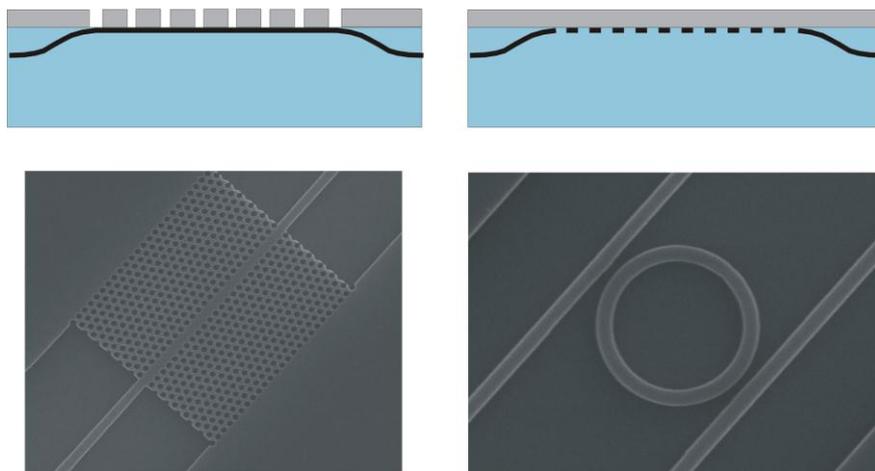


Figure 6.3 : *Haut* : Structures hybrides magnéto-optiques comportant une organisation 1D soit de la couche magnéto-optique, soit du guide support. *Bas* : exemple de dispositifs résonnants en technologie silicium pouvant se prêter à un dépôt de composite magnéto-optique.

En poussant plus loin l'idée de structuration, il est peut-être plus pertinent d'utiliser un guide support possédant une organisation périodique et de faire un dépôt classique dessus. Cela peut se faire en technologie d'échange d'ions sur verre comme illustré en haut à droite de la Figure 6.3. De même, l'utilisation de structures résonnantes en silicium comme représentées sur le bas de la Figure 6.3 permet d'avoir une excellente organisation tout en garantissant un contraste d'indice important entre le silicium et le matériau magnéto-optique qui peut remplir les trous d'air ou être déposé en surface. Une discussion sera engagée sur ce sujet avec l'équipe de l'Institut de Nanotechnologies de Lyon qui fabrique de tels dispositifs.

6.3.3. Magnétoplasmonique

Les sujets développés dans cet axe constituent une orientation à plus long terme des activités, mais constituent peut-être la plus forte valeur ajoutée du rapprochement entre laboratoires.

Les dispositifs à effet plasmonique font actuellement l'objet de nombreux travaux dans la communauté scientifique. Au-delà de l'effet de mode certain autour de ce thème, il paraît justifié de s'intéresser aux interactions magnéto-plasmoniques puisqu'elles permettent, par exemple, d'améliorer la sensibilité des capteurs plasmoniques [ARM13]. Dans ce type de structure, le principe est d'utiliser un plasmon localisé à proximité d'un milieu magnétique pour exalter les effets de rotations de polarisation magnéto-optiques. Cela peut être réalisé avec un plasmon localisé dans une nanoparticule à cœur magnétique et coquille métallique [WAN11], ou avec un plasmon délocalisé à l'interface planaire entre un matériau magnétique et métallique. La Figure 6.4 donne deux exemples de réalisation dans ce deuxième cas. Le dépôt d'un réseau d'or sur une couche de BIG provoque une exaltation de l'effet Faraday en espace libre de la structure pour la longueur d'onde qui donne un bon accord de phase entre le mode TE et le mode plasmonique TM. Au-delà, de cette exaltation de l'effet Faraday, le second exemple de la Figure 6.4 montre qu'il est également possible d'augmenter fortement le facteur de mérite magnéto-optique, en travaillant avec des épaisseurs faibles de matériau. Faire pénétrer notre matériau composite dans les plots d'air d'une couche métallique paraît tout à fait réalisable.

L'objectif est ici de mettre en œuvre des interactions magnéto-plasmoniques dans des matériaux composites à base de nanoparticules magnétiques et/ou métalliques. Dans ce cadre, de nouvelles méthodes d'élaboration maîtrisées au LaHC seront employées pour la synthèse de matériaux magnétiques composites : nanoparticules de Ni dans une matrice de DLC par PLD [PAU12], ou nanoparticules d'Ag, Au et Co dans des matrices vitreuses par échange ionique. Cela permettra d'étudier les interactions en fonction du caractère plus ou moins magnétique, métallique ou ferromagnétique des nanoparticules.

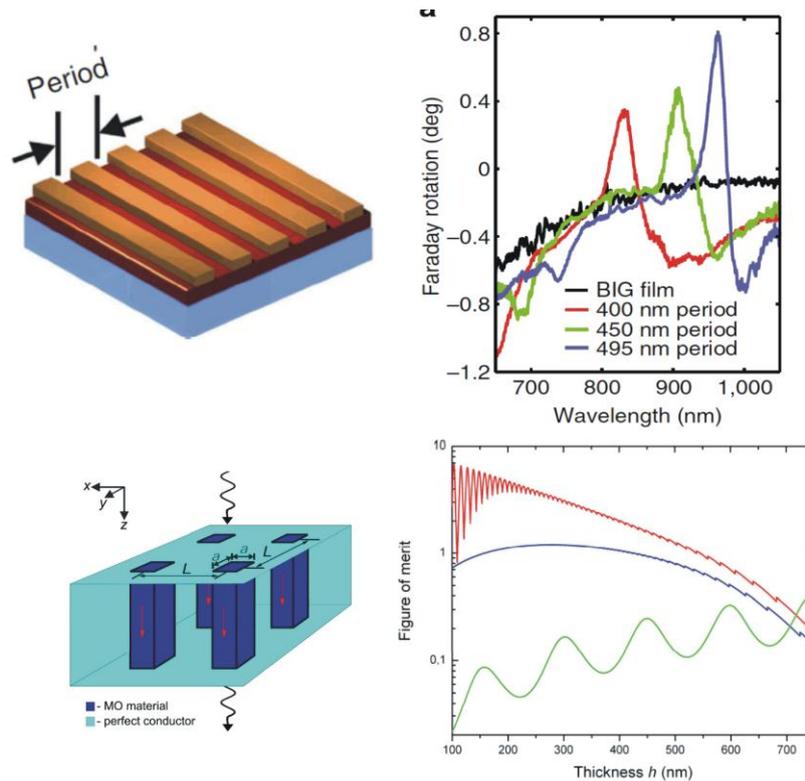


Figure 6.4 : *Haut* : Représentation schématique d'un réseau d'or sur une couche de BIG et évolution spectrale de la rotation Faraday associée [CHI13]. *Bas* : Représentation schématique de plots de conducteur dans un matériau magnéto-optique et facteur de mérite magnéto-optique associé (En rouge et bleu la structure d'étude et en noir une monocouche de référence)[KHA07].

D'autre part, les dispositifs magnéto-plasmoniques core-shell (cœur magnétique et coquille métallique) ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques, les applications visant en majorité le domaine du biomédical. On peut citer les travaux conduits par Wang *et al.* visant plus particulièrement à contrôler les effets d'exaltation magnéto-plasmonique en fonction de l'épaisseur de la coquille [WAN11]. Dans ce cadre, une voie innovante à explorer serait l'insertion de particules métalliques dans des matrices sol-gel magnétiques mésoporeuses afin de quantifier l'effet magnéto-plasmonique dans ce type de structure. La porosité ainsi que le dopage magnétique devront être contrôlés afin d'avoir une interaction maximale entre les particules métalliques et magnétiques.

Enfin, des réseaux de nanoparticules métalliques peuvent être générés au LaHC par auto-organisation sous illumination laser dans des couches mésoporeuses [DES13]. L'étude magnéto-optique de ces dispositifs et/ou l'utilisation du co-dopage cité précédemment semble prometteuse pour l'étude des effets magnéto-plasmoniques en réflexion ou transmission.

La Figure 6.5 montre deux résultats de mesures de spectre de rotation Faraday réalisées sur des échantillons à base de nanoparticules d'Argent. Dans le premier cas, il s'agit d'un verre dopé par de telles nanoparticules par échange ionique. La concentration est suffisamment forte pour que nous puissions observer l'amplification de la rotation

Faraday à l'endroit de la résonance plasmon de l'argent autour de 400 nm. Dans le second cas, il s'agit de nanoparticules d'argent auto-organisées par insolation laser dans une matrice de TiO_2 [DES13]. Les résultats montrent que l'allure spectrale de la rotation Faraday est modifiée par l'organisation en réseau 1D de ces particules.

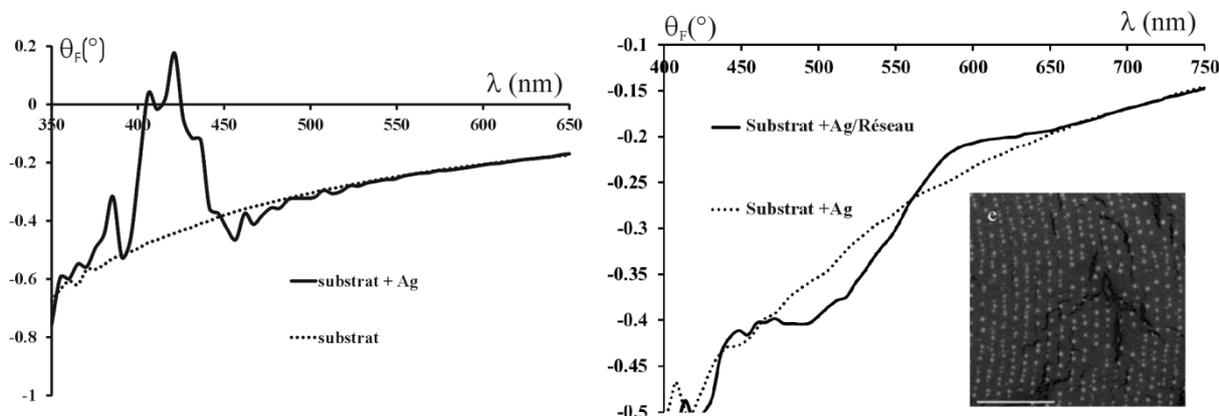


Figure 6.5 : Résultats de mesures de rotation Faraday réalisées sur des structures plasmoniques. *Gauche* : Nanoparticules d'argent dans du verre par échange ionique. *Droite* : Nanoparticules d'argent dans un matrice de TiO_2 auto-organisées ou non en réseau 1D.

6.4. Bilan

Dans ce chapitre, j'ai détaillé les orientations scientifiques que je souhaite développer à l'avenir, dans le cadre notamment d'une intégration du LT2C au sein du laboratoire Hubert Curien de l'Université Jean Monnet. Certains travaux se placent dans la continuité des actions antérieures. C'est le cas des convertisseurs de mode non réciproques sur verre dont l'avenir me semble très prometteur avec la réalisation d'un démonstrateur d'isolateur. D'autres, plus exploratoires, s'orientent sur des domaines nouveaux avec des guides à cristal photonique ou des structures plasmoniques. Il me paraît, de toute façon, très important de toujours mener de front le développement de matériaux magnéto-optiques et l'application de ces matériaux sur des composants ou applications.

Par ailleurs, j'ai conscience d'avoir dressé des pistes de perspectives assez nombreuses, mais l'ensemble du travail se concrétisera dans le cadre d'une équipe-projet et avec le soutien de fortes collaborations. Dans la continuité de ce que je connais depuis le début de mes activités, il sera évidemment nécessaire de trouver les moyens de financement nécessaires à la mise en œuvre de ces travaux.

CONCLUSION

Ce rapport d'habilitation fait état des activités de recherches que je mène depuis la fin de ma thèse en 2004, et dresse les perspectives de travail pour les années à venir. L'ensemble de ces travaux se place dans le contexte du développement d'un matériau magnéto-optique composite à base de nanoparticules magnétiques, et son application au sein de composants optiques intégrés. Il s'agit d'une approche originale, non retrouvée ailleurs qui participe, je crois, à notre identification dans la communauté. Les résultats principaux obtenus au cours des années sont la réalisation de convertisseurs non réciproques intégrés sur verre et la mise au point de cristaux magnéto-photoniques.

Les perspectives se placent quant à elles dans le cadre de l'intégration des activités du LT2C au sein du laboratoire Hubert Curien de la même Université. Un projet commun identifié sur le thème « magnéto-optique » a été élaboré et constitue un premier point d'ancrage pour construire cette intégration. Dans la lignée de mes activités précédentes, mais avec une nouvelle ouverture sur la structuration planaire et la magnétoplasmonique, il doit constituer une équipe-projet que j'aurai la chance d'animer.

Au-delà de ces aspects scientifiques et de structuration de la recherche, j'ai la chance de travailler dans un domaine qui me plaît, et dans un environnement humain très agréable. Que ce soit au sein des laboratoires LT2C/LaHC, ou dans les collaborations avec l'IMEP-LAHC, PECSA, Kosice, Szeged le climat de travail est très agréable et les échanges forts instructifs. C'est à la fois une réelle satisfaction et une véritable source de motivation pour l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

- [AMA10] H. Amata, F. Royer, F. Choueikani, D. Jamon, J.E. Broquin, J.C. Plenet, J. J. Rousseau, “Magnetic nanoparticles doped silica layer reported on ion-exchanged glass waveguide: towards integrated magneto-optical devices”, *Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits, Bruxelles, 12-16 Avril 2010. Proceedings of SPIE, vol 7719,77191G, 2010.*
- [AMA11] H. Amata, F. Royer, F. Choueikani, D. Jamon, F. Parsy, J.E. Broquin, S. Neveu, J.J. Rousseau, “Hybrid magneto-optical mode converter made with a magnetic nanoparticles-doped SiO₂/ZrO₂ layer coated on an ion-exchanged glass waveguide”, *Applied Physics Letters, 99, 251108, 2011.*
- [ARM13] G. Armelles, A. Cebollada, A. García-Martín, M. U. González, “Magnetoplasmonics: Combining Magnetic and Plasmonic Functionalities”, *Advanced Optical Materials, vol 1(1), 10-35, 2013.*
- [AUR75] F Auracher and HH Witte. “A new design for an integrated optical isolator. *Optics Communications, vol 13(4), 435–438, 1975.*
- [BAR04] A.V. Baryshev, T. Kodama, K. Nishimura, H. Uchida and M. Inoue, “Magneto-optical properties of three-dimensional magnetophotonic crystals”, *IEEE Trans. Magn. 40(4), 2829-2831, 2004.*
- [BEL05] V. I. Belotelov and A. K. Zvezdin, “Magneto-optical properties of photonic crystals”, *Optical Society of America 22(1), 286-292, 2005.*
- [BI11] L. Bi, J. Hu, P. Jiang, D.H. Kim, G.F. Dionne, L.C. Kimmerling, C.A. Ross, “On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators”, *Nature Photonics, vol 5, 758-762, 2011.*
- [BOU04] T. Boudiar, B. Payet-Gervy, M.F. Blanc-Mignon, J.J. Rousseau, M. Le Berre, H. Joisten, “Magneto-optical properties of yttrium iron garnet (YIG) thin films elaborated by radio frequency sputtering”, *Journal of Magnetism an Magnetic Material, vol 284, 77-85,2004.*
- [BRI92] C.J. Brinker, A.J. Hurd, P.R. Schunk, G.C. Frye, C.S. Ashley, “Review of sol-gel thin film formation”, *Journal of Non-crystalline Solids”, vol 147, 424-436, 1992.*
- [CAB11] V. Cabuil, V. Dupuis, D. Talbot, S. Neveu, “Ionic magnetic fluid based on cobalt ferrite nanoparticles: Influence of hydrothermal treatment on the nanoparticle size”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol 323 (10), 1238-1241, 2011.*

- [CAI11] J. M. Caicedo, O. Pasco, M. Lopez-Garcia, V. Canalejas, A. Blanco, C. Lopez, J. Fontcuberta, A. Roig and G. Herranz, « *Magnetophotonic response of three-dimensional opals* », *ACS Nano* 5(4), 2957-2963, 2011.
- [CAN10] A. Candiani, M. Konstantaki, W. Margulis, and S. Pissadakis, “A spectrally tunable microstructured optical fibre Bragg grating utilizing an infiltrated ferrofluid”, *Optics Express*, vol 18 (24), pp. 24654-24660, 2010.
- [CAS77] J. Castera, G. Hepner, “Isolator in integrated optics using the Faraday and Cotton-mouton effects” *IEEE Trans. Magn.* Vol 13(5), 1583-1585, (1977).
- [CHI13] J. Y. Chin, T. Steinle, T. Wehls, D. Dregely, T. Weiss, V. I. Belotelov, B. Stritzker, H. Giessen, “Nonreciprocal plasmonics enables giant enhancement of thin-film Faraday rotation”, *Nature communications*, 4:1599, 2013.
- [CHO08] F. Choueikani, “Étude des potentialités de couches minces sol-gel dopées par des nanoparticules magnétiques pour la réalisation de composants magnéto-optiques intégrés », *Thèse de doctorat. Université Jean Monnet, Saint Etienne*, 2008.
- [CHO09] F. Choueikani, F. Royer, D. Jamon, A. Siblini, J.J. Rousseau, S. Neveu, J. Charara, “Magneto-optical waveguides made of cobalt ferrite nanoparticles embedded in silica/zirconia organic-inorganic matrix”, *Applied Physics Letters*, vol 94 (5), 051113, (10.1063/1.3079094), 2009.
- [DAM86] H. Dammann, E. Pross, G. Rabe, W. Tolksdorf, et M. Zinke, “Phase matching in symmetrical single-mode magneto-optic waveguides by application of stress”, *Applied Physics Letters*, 49(26), 1755-1757, 1986.
- [DAV96] P. Daveze and J. Monin, « Propriétés magnéto-optiques transversales des liquides magnétiques : Application à la réalisation de lames de phase dans les domaines spectraux visible et proche infrarouge », *International Conference on Ferrites (ICF7) 1996, Journal de Physique IV*, vol 7, 559-560, 1997.
- [DES13] N. Destouches, N. Crespo-Monteiro, T. Epicier, Y. Lefkir, F. Vocanson, S. Reynaud, R. Charrière, M. Hebert, “Permanent dichroic coloring surfaces by laser-induced formation of chain-like self-organized silver nanoparticles within crystalline titania films”, *SPIE Proceeding 8609-4*, 2013.
- [DZA11] A. Dzarova, F. Royer, M. Timko, D. Jamon, P. Kopcansky, J. Kovac, F. Choueikani, H. Gojzewski, J.J. Rousseau, “Magneto-optical study of magnetite nanoparticles prepared by chemical and biomineralization process”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol 323(11), 1453-1459, 2011.
- [DZAR11] A. Dzarova, F. Royer, M. Timko, D. Jamon, P. Kopcansky, J. Kovac, F. Choueikani, H. Gojzewski, J.J. Rousseau, “Optical anisotropy of magnetosome-doped

polymer films”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol 323(10), 1364-1367, 2011.

[DON99] F. Donatini, D. Jamon, J. Monin, S. Neveu, “Experimental investigation of longitudinal magneto-optic effects in four ferrite ferrofluids in visible-near infrared spectrum”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5), 4311-4317, 1999.

[FU08] H. P. Fu, R. Y. Hong, Y. J. Wu, G. Q. Di, B. Xu, Y. Zheng, et D. G. Wei, “Preparation and Faraday rotation of Bi-YIG/PMMA nanocomposite”, *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, vol. 320 (21), 2584-2590, 2008.

[FUJ00] J. Fujita, M. Levy, R.M. Osgood, L. Wilkens, H. Dotsch, “Polarization-independent waveguide optical isolator based on nonreciprocal phase shift”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol 12(11), p1510-1512, 2000.

[FUJ99] J. Fujita, M. Levy, R. U. Ahmad, R.M. Osgood, M. Randles, C. Gutierrez, et R. Villareal, “Observation of optical isolation based on nonreciprocal phase shift in a Mach-Zehnder interferometer”, *Applied Physics Letters*, vol 75(7), 998-1000, 1999.

[GAN13] R. El-Ganainy, P. Kumar, M. Levy, “On-chip optical isolation based on nonreciprocal resonant delocalization effects”, *Optics Letters*, vol 38 (1), 61-63, 2013.

[GAL11] J. F. Galisteo-López , M. Ibisate, R. Sapienza, L. S. Froufe-Pérez, A. Blanco and C. López, « Self-Assembled Photonic Structures », *Advanced Materials*, vol 23, 30–69, 2011.

[GAR04] F. Gardillou, L. Bastard, J. E. Broquin, “4.25 dB gain in a hybrid silicate/phosphate glasses optical amplifier made by wafer bonding and ion-exchange techniques”, *Applied Physics Letters*, 85 (22), 5176-5178, 2004.

[GAR06] F. Gardillou, L. Bastard, J. E. Broquin, “Integrated optics Bragg filters made by ion exchange and wafer bonding”, *Applied Physics Letters*, 89(10), 101123, 2006.

[GHO12] S. Ghosh, S. Keyvavinia, W. Van Roy, T. Mizumoto, G. Roelkens, R. Baets, “Ce:YIG/Silicon-on-Insulator waveguide optical isolator realized by adhesive bonding”, *Optics Express*, vol 20 (2), 1839-1848, 2012.

[HAM97] J.H. Hammer, J.H. Abeles, D.J. Channin, “Polycrystalline-Metal-Ferromagnetic Optical Waveguide Isolator (POWI) for Monolithic-Integration with Diode-Laser Devices”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol9(5), 631-633, 1997.

[HUA05] Huang M. and Xu Z. C, “Wavelength and temperature characteristics of BiYbIG film/YIG crystal composite structure for magneto-optical applications”, *Applied Physics A* 81, 193-196, 2005.

- [INO02] M. Inoue “Magneto-optical materials for photonics and recording-Magnetophotonic Crystals”. *Boston, Massachusetts; 2004.*
- [INO99] M. Inoue, K. Arai, T. Fujii, M. Abe, « One-Dimensional Magnetophotonic Crystals », *Journal of Applied Physics* 85, 5768-5770, 1999.
- [JAL13] D. Jalas, A. Petrov, M. Eich, W. Freude, S. Fan, Z. Yu, R. Baets, M. Popovic, A. Melloni, J.D. Joannopoulos, M. Wanwollegem, C. R. Doerr, H. Renner, “What is-and what is not- an optical isolator”, *Nature Photonics*, vol 7, 579-582, 2013.
- [JAM01] D. Jamon, S. Robert, F. Donatini, J. J. Rousseau, C. Bovier, H. Roux, J. Serrughetti, V. Cabuil, D. Zins, “Optical investigation of γ -Fe₂O₃ nanoparticle-doped silica gel matrix for birefringent components”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(5), 3803-3806, 2001.
- [JAM13] D. Jamon, F. Royer, F. Parsy, E. Ghibaudo, J. E Broquin, “Birefringence measurements in optical waveguides”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol 31 (19), p 3151-3157, 2013.
- [JOA08] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade, “Photonic crystals, Molding the flow of light”, *Princeton University Press, Second Edition 2008.*
- [JOU08] A. Joudrier, M. Couchaud, H. Moriceau, J.E. Broquin, B. Ferrand, and J.L. Deschanvres, “Direct bonding conditions of ferrite garnet layer on ion-exchanged glass waveguides” *Physica Status Solidi (a)* vol 205 (10), 2313-2316, 2008.
- [KAH04] S. Kahl, A.M. Grishin, “Enhanced Faraday rotation in all-garnet magneto-optical photonic crystal”, *Applied Physics Letters*, 84(9),1438 2004.
- [KHA07] A. B. Khanikaev¹, A. V. Baryshev, A. A. Fedyanin, A. B. Granovsky, M. Inoue, “Anomalous Faraday Effect of a system with extraordinary optical transmittance”, *Optics Express*, vol 15(11), 6612,6622, 2007.
- [KHA10] A. Khanna, A. Säynätjoki, A. Tervonen, R. A. Norwood, and S. Honkanen, “Polarization properties of two-dimensional slot waveguides” *Applied Optics*, Vol. 49, Issue 28, 5321-5332, 2010.
- [KIM08] H.S. Kim, L. Bi, G.F. Dionne, C.A. Ross, “Magnetic and magneto-optical properties of Fe-doped SrTiO₃ films, *Applied Physics Letters*, 93, 092506, 2008.
- [KUM12] P. Kumar and M. Levy, “On-chip optical isolation via unidirectional Bloch oscillations in a waveguide array”, *Optics Letters*, vol. 37 (18), 3762-3764, 2012.
- [KRpat12] H. Kroemer, J.E. Bowers, MC. Tien, “Ring resonator based optical isolator and circulator” *Patent US2012/0002914 A1*, 2012.

- [LAF08] La FIEN en croisade pour reconquérir la jeunesse, *Les cahiers de l'Industrie Electronique et Numérique*, juin 2008.
- [LEF98] S. Lefebure, E. Dubois, V. Cabuil, S. Neveu and R. Massart, "Monodisperse magnetic nanoparticles : preparation and dispersion in water and oils", *Material Research*, vol 13(10), 2975-2981, 1998.
- [LAN05] M. Langlet "Low temperature processing of sol-gel thin films in the SiO₂-TiO₂ binary system", Handbook of sol-gel science and technology, éditeur S. Sakka , vol 1, Chapitre 15, Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [LES06] A. Lesufleur, M. Vanwolleghem, P. Gogol, B. Bartenlian, P. Beauvillian, J. Harmle, L. Lagae, J. Pistora, S. Visnovsky, and R. Wirix-Speetjens, "Magneto-optical parameters of Co₉₀Fe₁₀ and Co₅₀Fe₅₀ ferromagnetic thin films for 1.3 μm integrated isolator", *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, vol 305, 284-290, 2006.
- [LEV06] M. Levy, R. Li, "Polarization rotation enhancement and scattering mechanisms in waveguide magnetophotonic crystals", *Applied Physics Letters*, 89, 121113, 2006.
- [LI95] C.Y. Li, J. Chishman, M.P. Andrews, S.I. Najafi, J.D. Mackenzie, N. Peyghambarian, "Sol-gel integrated optical coupler by ultraviolet light imprinting", *Electronics Letters*, vol 31(4), 271, 1995.
- [LOH98] M. Lohmeyer, M. Shamonin, N. Bahlmann, P. Hertel, H. Dötsch, "Radiatively coupled waveguide concept for an integrated magneto-optic circulator", *MRS Symposium*, vol 517, 513-519, 1998.
- [LOHM98] M. Lohmeyer, N. Bahlmann, O. Zhuromsky, H. Dötsch, et P. Hertel., "Phase-matched rectangular magneto-optic waveguides for applications in integrated optics isolators: numerical assessment", *Optics Communications*, 158, 189-200, 1998.
- [LOH99] M. Lohmeyer, "Guided waves in rectangular integrated magneto optic devices", Thèse de doctorat, Université de Osnabrück, 1999.
- [LON08] J.M. Long, L.L. De Vries, R.M. Hall, and A.Z. Kouzani, "A New H.E.L.P. Kit for Teaching Practical AC Electronics to Undergraduate Distance Students" *Proceedings of the 2008 AaeE Conference, Yeppoon, 2008*.
- [LOP09] A. Lopez-Santiago, P. Gangopadhyay, J. Thomas, R. A. Norwood, A. Persoons, and N. Peyghambarian, "Faraday rotation in magnetite-polymethylmethacrylate core-shell nanocomposites with high optical quality", *Applied Physics Letters* 95, 143302, 2009.
- [LOP12] A. Lopez-Santiago, H.R. Grant, P. Gangopadhyay, R. Voorakaranam, R. A. Norwood, N. Peyghambarian, "Cobalt ferrite nanoparticles polymer composites based all-optical magnetometer", *Optical Material Express*, vol 2(7), 978-986, 2012.

- [MAG10] L. Magdenko, E. Popova, M. Vanwolleghe, C. Pang, F. Fortuna, T. Maroutian, P. Beauvillain, N. Keller, B. Dagens, “Wafer-scale fabrication of magneto-photonic structures in Bismuth Iron Garnet thin film”, *Microelectronic Engineering*, vol 87(11), 2437-2442, (2010).
- [MIZ12] T. Mizumoto, R. Takei, Y. Shoji, “Waveguide Optical Isolators for Integrated Optics”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol 48(2), 252-260, 2012.
- [MOR02] P. Moroz, S.K. Jones, B.N. Gray, “Magnetically mediated hyperthermia, current status and future directions”, *International Journal of Hyperthermia*, 18(4), 267-284, 2002.
- [NIS07] Y. Nishijima, K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, H. Misawa, T. Tanimura, K. Maeda, “Inverse silica opal photonic crystals for optical sensing applications”, *Optics Express* 15(20), 12979-12988, 2007.
- [ONE11] L. Onestas, D. Bucci, E. Ghibaudo, J.-E. Broquin, “Vertically Integrated Broadband Duplexer for Erbium-Doped Waveguide Amplifiers Made by Ion Exchange on Glass”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol 23 (10), 648-650, 2011.
- [PAU12] R. Paul, M.K. Sharmab, R. Chatterjeeb, S. Hussainc, R. Bhara, A.K. Pala, “Ferromagnetism in nanocrystalline nickel incorporated diamond-like carbon thin films”, *Applied Surface Science* 258 (2012) 5850– 5857.
- [POP98] A.F. Popkov, M. Fehndrich, M. Lohmeyer, et H. Dötsch, “Nonreciprocal TE-mode phase shift by domain walls in magneto-optic rib waveguides” *Applied Physics Letters*, vol 72(20), 2508-2510, 1998.
- [ROY04] F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, D. Zins, V. Cabuil, S. Neveu, H. Roux, “Magneto-optical properties of CoFe_2O_4 ferrofluids. Influence of the nanoparticle size distribution”, *Progress In Colloid and Polymer Science*, vol 126, 155-158, 2004.
- [ROY05] F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, H. Roux, D. Zins, V. Cabuil, “Magneto-optical nanoparticle-doped silica-titania planar waveguides”, *Applied Physics Letters*, vol 86 (1), 011107, 2005.
- [ROY11] F. Royer, D. Jamon, J.E. Broquin, H. Amata, R. Kekesi, S. Neveu, M.F Blanc-Mignon, E. Ghibaudo, “Fully compatible magneto-optical sol-gel material with glass waveguides technologies : application to mode converters”, *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XV, part of Photonics West San Francisco, 24-26 janvier 2011, Proceedings of SPIE*, vol 7941, 794106, 2011.
- [SAR98] K. Saravanamuttu, X.M. Du, S.I. Najafi, M.P. Andrews, “Photoinduced structural relaxation and densification in sol-gel-derived nanocomposite thin films: implications for integrated optics device fabrication”, *Revue Canadienne de chimie*, vol 76(11), 1717-1729, 1998.

- [SHI02] H. Shimizu, M. Tanaka, “ Design of semiconductor-waveguide-type optical isolators using the nonreciprocal loss/gain in the magneto-optical waveguide having MnAs nanoclusters”, *Applied Physics Letters*, vol 81(27), 5246 -5248 (2002).
- [SHI02b] H. Shimizu and M. Tanaka, “Magneto-optical properties of Si-doped GaAs:MnAs-based magneto-phonic crystal operating at 1.55 μm ”, *Physica E*, 13, 597-601, 2002.
- [SHI06] H. Shimizu, Y. Nakano, “Fabrication and Characterization of an InGaAsP/InP active Waveguide Optical Isolator With 14.7 dB/mm TE Mode Nonreciprocal Attenuation”, *Journal of Lightwave Technology*, vol 24(1), 38-43, 2006.
- [SHI97] T. Shintaku, A. Tate, and S. Mino, “Ce-substituted yttrium iron garnet films prepared on $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ garnet substrates by sputter epitaxy”, *Applied Physics Letters*, vol 71 (12), 1640-1642, 1997.
- [SHO08] Shoji Y, Mizumoto T, Yokoi H, Hsieh IW, Osgood RM., “Magneto-optical isolator with silicon waveguides fabricated by direct bonding” *Applied Physics Letters*, 92(7), 071117, (2008).
- [SMI12] W. Smigaj, L. Magdenko, J. Romero-Vivas, S. Guenneau , B. Dagens, B. Gralak, M. Vanwolleghem, “Compact optical circulator based on a uniformly magnetized ring cavity”, *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, vol 10(1), 83-101, 2012.
- [SOB13] Y. Sobu, Y. Shoji, K. Sakurai, T. Mizumoto, “GaInAsP/InP MZI waveguide optical isolator integrated with spot size converter”, *Optics Express*, vol 21 (13), 15373-15381, 2013.
- [SUG96] N. Sugimoto, H. Terui, A. Tate, Y. Katoh, Y. Yamada, A. Sugita , A. Shibukawa, Y. Inoue, “A Hybrid Integrated Waveguide Isolator on a Silica-Based Planar Lightwave Circuit”, *IEEE Journal of Lightwave Technology Vol 14 (11)*, 2537-2546, 1996.
- [TER11] A. Tervonen, B. R. West, S. Honkanen, “Ion-exchanged glass waveguide technology: a review”, *Optical Engineering* 50(7), 071107, 2011.
- [TOU90] F.Tourinho, R. Franck and R. Massart, “Aqueous ferrofluids based on manganese and cobalt ferrites”, *Journal of Materials Science*, vol 25, 3249-3254, 1990.
- [TIE11] M.C. Tien, T. Mizumoto, P. Pintus, H. Kromer, and J.E. Bowers, “Silicon ring isolators with bonded nonreciprocal magneto-optic garnets”, *Optics express*, vol 19 (12), 11740-11745, 2011.
- [TON12] S. Tonchev, Y. Jourlin, C. Veillas, S. Reynaud, N. Lyndin, O. Parriaux, J. Laukkanen, M. Kuittinen, “Subwavelength cylindrical grating by holistic phase-mask coordinate transform”, *Optics Express*, vol 20 (7), 7946-7953, 2012.

- [TRE99] E. Trémolet de Lacheisserie, Magnétisme - Fondements. *Presses universitaires de Grenoble, Grenoble, 1999.*
- [VAJ07] S. Hosseini Vajargah, H.R. Madaah Hosseini, Z.A. Nemati, "Preparation and characterization of yttrium iron garnet (YIG) nanocrystalline powders by auto-combustion of nitrate-citrate gel", *Journal of Alloys and Compounds* 430, 339–343, 2007.
- [VAN07] W. Van Parys, D. Van Thourhout, R. Baets, B. Dagens, J. Decobert, O. Le Gouezigou, L. Lagae, "Study of a Magneto-optic Contact for an Amplifying Waveguide Optical Isolator" *IEEE Photonics Technology Letters*, vol 19 (24), 659-661 (2007).
- [WAN09] Z. Wang, Y. Chong, J. D. Joannopoulos, M. Soljac, "Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states", *Nature* 461, 772-775, 2009.
- [WAN11] L. Wang, C. Clavero, Z. Huba, K. J. Carroll, E. E. Carpenter, D. Gu, R. A. Lukaszew, "Plasmonics and Enhanced Magneto-Optics in Core-Shell Co-Ag Nanoparticles", *Nano Letters*, vol 11, 1237–1240, 2011.
- [WAN72] S. Wang, M. Shah, J.D. Crow, "Studies of the Use of Gyrotropic and Anisotropic Materials for Mode Conversion in Thin-Film Optical-Waveguide Applications", *Journal of Applied Physics*, vol 43(4), 1861–1875, 1972.
- [YOK04] H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin, and T. Mizumoto, "Interferometric optical isolator employing a nonreciprocal phase shift operated in a unidirectional magnetic field", *Applied Optics*, vol. 43 (24), 4745-4752, 2004.
- [YU09] Z. Yu and S. Fan, "Optical isolation based on nonreciprocal phase shift induced by interband photonic transitions", *Applied Physics Letters*, 94, 171116, 2009.
- [ZAE99] W. Zaets, K. Ando, "Optical Waveguide Isolator Based on Nonreciprocal Loss/Gain of Amplifier Covered by Ferromagnetic Layer", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol 11(8), 1012-1014, 1999.
- [ZAM08] T.R. Zamman, X. Guo and R.J. Ram, "Semiconductors waveguide isolators," *Journal of Lightwave Technology*, 26 (2) 291-301, (2008).
- [ZAY04] V. Zayets, M.C. Debnath and K. Ando, "Complete magneto-optical mode conversion in $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ waveguide on GaAs substrate", *Applied Physics Letters*, vol 84(4), 565-567, 2004.
- [ZAY12] V. Zayets, H. Saito, K. Ando, S. Yuasa, "Optical isolator utilizing surface plasmons", *Materials*, vol(5), 857-871, 2012.

[ZHU99] O. Zhuromskyy, M. Lohmeyer, N. Bahlmann, H. Dotsch, P. Hertel, and A. F. Popkov, “Analysis of Polarization Independent Mach-Zehnder-Type Integrated Optical Isolator”, *Journal of Lightwave Technology*, vol 17 (7), 1200, 1999.

[ZVE97] A.K. Zvezdin, V.A. Kotov, “Modern magneto-optics and magneto-optical materials”, *Institute of Physics Publishing, Londres 1997*.

7. DOSSIER ADMINISTRATIF

7.1. CURRICULUM VITAE

Depuis 2006 : Maître de Conférences, 63^{ème} section du CNU, Université Jean Monnet.
Laboratoire Telecom Claude Chappe (LT2C, ex DIOM), EA 3523 // Telecom St Etienne.

2005 - 2006 : PRAG (384H) IUT de St Etienne, Département Mesures Physiques.

2004 - 2005 : ATER (192H) IUT de St Etienne, Département Mesures Physiques.

2001 - 2004 : Thèse de doctorat de l'INP Grenoble soutenue le 12 juillet 2004, sous la direction de Jean Jacques Rousseau. Dispositifs et Instrumentation en Optoélectronique et Micro-Ondes (EA 3523) Université Jean Monnet. *Etude et applications des effets magnéto-optiques dans des couches minces sol-gel dopées à l'aide de nanoparticules magnétiques* ». Moniteur (64H/an), IUT St Etienne.

2000 - 2001 : DEA de l'INP Grenoble Optique-Optoélectronique-Micro-Ondes, mention TB.

1999 - 2000 : Agrégation de Sciences Physiques option Physique et Electricité Appliquées (10^{ème}).

1997 - 2001 : Ecole Normale Supérieure de Cachan

7.2. ENSEIGNEMENT : FAITS MARQUANTS ET RESPONSABILITES

2010: Mise en place d'un module d'électronique basé sur l'utilisation d'un kit pédagogique (carte TSE+oscilloscope USB) fourni à chaque binôme d'étudiant. Participation au développement de la carte TSE et mise au point de séances pédagogiques. Soutien de l'Université Jean Monnet au travers d'un Programme Blanc Formation 2010 pour l'acquisition du matériel (24 k€).

2010 : Responsable pédagogique du semestre 4 de Telecom Saint Etienne.

2010-2013 : Cours en Master I et II : IUST Abéché au Tchad : Master en partenariat avec l'INSA de Lyon et EXON. 2 modules de cours / TP de 25 H (Electronique analogique sur carte programmable).

2007-2009 : Participation à la mise au point des emplois du temps de Telecom Saint Etienne (1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année) : Décharge de 24 H/an.

Novembre 2007 : Mission d'enseignement à l'Institut Universitaire des Sciences et Technique d'Abéché au Tchad, financée par les accords inter-universitaires entre l'Université Jean Monnet et l'IUSTA, et encadrée par Coopération Française au Tchad. Mise en place de séances de travaux pratiques de Physique avec le matériel présent sur place : Mise au point des manipulations / Rédactions des sujets et corrigés. Formation d'enseignants locaux sur les séances.

Mai 2007 : Co-correcteur de l'épreuve « Modélisation » du concours commun Ecole Polytechnique-ENS Cachan. (Rédacteur du sujet : Douady Julien, MCF UJF Grenoble)

7.3. ENCADREMENTS

Depuis 10/2011 : Co-encadrement (80%) de la thèse de Hubert Lamaï Nandiguim : « Etude des propriétés physiques de guides d'ondes d'oxyde métallique dopés en nanoparticules magnétiques : applications à l'étude des effets magnéto-optiques ». Bourse AUF. Directeur : J.P. Chatelon

Depuis 10/2010 : Co-encadrement (50%) de la thèse de Elie Abou Diwan : « Micro-structuration planaire de films d'oxydes métalliques dopés par des nanoparticules magnétiques ». Bourse ministérielle. Directeur : J.J. Rousseau.

2008-2012 : Co-encadrement (80%) de la thèse de Hadi Amata : « Faisabilité d'un isolateur optique intégré sur verre ». Le 1^{er} octobre 2012 (Jury : *B. DAGENS, J.L. DESCHANVRES, E. GHIBAUDO, D. JAMON, J.J. ROUSSEAU, F. ROYER*) Allocation de recherche de la Région Rhône Alpes. Qualification en 63^{ème} section. Directeur : J.J. Rousseau.

2008-2011 : Co-encadrement (50%) de la thèse de Renata Kekesi : « Etude expérimentale de cristaux magnéto-photoniques 3D réalisés sous forme d'opales inversés par une matrice de silice dopée en nanoparticules magnétiques ». Le 19 octobre 2011. (Jury : *B. DAGENS, J. BELLESSA, T. BENYATTOU, E. TOMBACZ, J.P. CHATELON, D. JAMON, F. ROYER*). Bourse ministérielle. Directeur : J.P. Chatelon.

2004-2008 : Co-encadrement (50%) de la thèse de Fadi Choueikani : « Etude des potentialités de couches minces sol-gel dopées par des nanoparticules magnétiques pour la réalisation de composants magnéto-optiques intégrés ». Le 28 mai 2008 (Jury : *C. AMRA, J.E. BROQUIN, J. C. PLENET, S. NEVEU, A. SIBLINI, J. CHARARA, F. ROYER, D. JAMON*). Qualification en 28-30-63. Directeur : A. Siblini.

- 2008** : Encadrement du stage de Master II de Nadine Abboud : « Etude des propriétés physiques des couches minces d'oxydes métalliques dopées par des nanoparticules magnétiques»..
- 2008** : Co-Encadrement (50%) du stage de Master I de Sophiane Baikeche « Caractérisation optique de couches minces magnéto-optiques».
- 2007** : Co-Encadrement (50%) du stage de L3 de Fabien Vialla « Etude en température de la Rotation Faraday de film d'oxyde métalliques dopés par des nanoparticules magnétiques».
- 2005** : Co-encadrement (50%) du stage de Master I de Alain Skora « Elaboration et caractérisation de couches minces sol-gel ».
- 2005** : Co-encadrement (50%) du stage de Master II de Radouan Lamrhari : « Etude d'une structure résonnante magnéto-optique».

7.4. PROJETS, RESPONSABILITES ET ANIMATION SCIENTIFIQUE

- Depuis 07/13** : Responsables du projet commun « Magnéto-optique » aux laboratoires Hubert Curien et Telecom Claude Chappe de l'Université Jean Monnet.
- 2013** : Chercheur invité à l'Académie Slovaque des Sciences, Kosice. Programme NANOKOP financé par l'Union Européenne. (1 Mois)
- Depuis 2013** : Membre du Programm Committee de « Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies, part of Photonics West » organisée chaque année par SPIE.
- 2012-2013** : Responsable (partie française) du Programme Hubert Curien Stefanik « Propriétés magnéto-optiques de couches minces de polymères dopées : l'apport des magnétosomes » Echange et collaboration avec l'Institut de Physique expérimentale de l'Académie Slovaque des Sciences à Kosice en Slovaquie.
- 2011-2012** : Responsable scientifique de l'axe « Composants passifs » du laboratoire LT2C : 9 permanents (3 PR, 5 MC, 1 IGR), 1 ATER, 1 post-doc, 7 doctorants.
- 2010-2012** : Projet « Intégration d'isolateurs optiques sur substrat de verre pour LIDAR embarqué ». (Porteur : Prof. J.E. Broquin) Programme Cluster financé par la région Rhône Alpes en partenariat avec le LPMCN -- UMR CNRS 5586, de l'Université Claude Bernard à Villeurbanne, et l'IMEP-Minatec -- UMR CNRS 5130 de l'INPG à Grenoble. (Soutien de 60 k€ dont 26k€ pour LT2C)
- 2010-2011** : Responsable (partie française) du Programme Hubert Curien Balaton « Nanoparticules magnétiques et couches minces magnéto-optiques ». Echange et collaboration avec le Département de chimie colloïdale de l'Université de Szeged en Hongrie.
- 2009** : Responsable du séjour doctoral de Anezka Dzarova. « Etude magnéto-optique de magnétosomes en phase liquide et polymère. Doctorante à l'Institut de Physique

expérimentale de l'Académie Slovaque des Sciences à Kosice. Septembre-Décembre 2009.

2008-2009 : Responsable du programme « Valorisation de couches minces magnéto-optiques : vers la réalisation de composants intégrés » Programme Cible financé par la région Rhône Alpes en partenariat avec le LPMCN -- UMR CNRS 5586, de l'Université Claude Bernard à Villeurbanne, et l'IMEP-Minatec -- UMR CNRS 5130 de l'INPG à Grenoble. (Soutien de 30 k€ dont 15k€ pour DIOM + une Allocation de recherche).

2008-2009 : Responsable (partie française) du Programme Hubert Curien Stefanik « Magnetic nanoparticles for magneto-optical thin film (MaNaMag) ». Echange et collaboration avec l'Institut de Physique expérimentale de l'Académie Slovaque des Sciences à Kosice en Slovaquie.

Septembre 2007 : Responsable scientifique de l'Université Européenne d'été « Magnetic nanoparticles, composite materials and optical applications » Université d'été organisée par le laboratoire DIOM du 3 au 8 septembre 2007 et soutenue par le Ministère de l'Education Nationale de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche au travers d'un Programme PIM « Incitation à la Mobilité internationale ». (Soutien de 18 k€)

Depuis 2009 : Référé pour différents journaux : Sensors and actuators B / Journal of Magnetism and Magnetic Materials / Journal of Physical Chemistry / Photonics and Nanostructures : Fundamentals and Applications / Journal of Applied Physics / Sensors et Actuators : A. Physical / Applied Optics

7.5. PRODUCTION SCIENTIFIQUE

7.5.1. Articles de revues à comité de lecture

[ACL 20] “Integrated Broadband Polarization Splitter made by Ion-Exchange on Glass”, F. Parsy, E. Ghibaudo, D. Jamon, F. Royer, J. E Broquin, **IEEE Photonic Technology Letters**, acceptée, octobre 2013.

[ACL 19] “Birefringence measurements in optical waveguides”, D. Jamon, F. Royer, F. Parsy, E. Ghibaudo, J. E Broquin, **IEEE Journal of Lightwave Technology**, vol 31 (19), p3151, (DOI 10.1109/JLT.2013.2280034), 2013.

[ACL 18] 3D magneto-photonic crystal made with cobalt ferrite nanoparticles silica composite structured as inverse opal, R. Kekesi, F. Royer, D. Jamon, M. F. Blanc Mignon, E. Abou-Diwan, J. P. Chatelon, S. Neveu, and E. Tombacz, **Optical Materials Express**, Vol. 3, Issue 7, pp. 935-947 (DOI:10.1364/OME.3.000935), 2013.

[ACL 17] “Hybrid magneto-optical mode converter made with a magnetic nanoparticles-doped SiO₂/ZrO₂ layer coated on an ion-exchanged glass waveguide”, H. Amata, F. Royer, F. Choueikani, D. Jamon, F. Parsy, J.E. Broquin, S. Neveu, J.J. Rousseau, **Applied Physics Letters**, 99, 251108, (DOI:10.1063/1.3671180), 2011.

[ACL 16] “Magneto-optical study of magnetite nanoparticles prepared by chemical and biomineralization process”, A. Dzarova, F. Royer, M. Timko, D. Jamon, P. Kopcansky, J. Kovac, F. Choueikani, H. Gojzewski, J.J. Rousseau, **J. Magn. Magn. Mater.**, 323(11), 1453-1454, (DOI : 10.1016/j.jmmm.2010.12.041), 2011.

[ACL 15] “Optical anisotropy of magnetosome-doped polymer films”, A. Dzarova, F. Royer, D. Jamon, P. Kopcansky, F. Choueikani, H. Gojzewski, J. J. Rousseau, M. Timko, **J. Magn. Magn. Mater.**, 323(10), 1364-1367 (DOI : 10.1016/j.jmmm.2010.11.047), 2011.

[ACL 14] “Modeling and analysis of birefringence in magneto-optical thin film made by SiO₂/ZrO₂ doped with ferrite of cobalt”, Hocini, T. Boumaza, M. Bouchemat, F. Choueikani, F. Royer, J.J. Rousseau, **Applied Physics B : Lasers and Optics**, 99, no. 3, 553-558 (DOI10.1007/s00340-010-3930-0), 2010.

[ACL 13] “Phase matched magneto-optical single mode rib waveguides based on geometrical adjustments”, A.Hocini, T.Boumaza, M.Bouchemat, F.Royer, J.J.Rousseau, **International Journal of Electronics Communications**, (doi:10.1016/j.aeue.2009.10.006), 2009.

[ACL 12] “Low birefringent magneto-optical waveguides fabricated via organic-inorganic sol-gel process”, F. Choueikani, F. Royer, S. Douadi, A. Skora, D. Jamon, D. Blanc, A.

Siblini, **European Physical Journal - Applied Physics** , 47, 30401 (10.1051/epjap/2009096), 2009.

[ACL 11] “Magneto-optical waveguides made of cobalt ferrite nanoparticles embedded in silica/zirconia organic-inorganic matrix”, F. Choueikani, F. Royer, D. Jamon, A. Siblini, J.J. Rousseau, S. Neveu, J. Charara, **Applied Physics Letters**, 94(5), 051113, (DOI: 10.1063/1.3079094,) 2009.

[ACL 10] “Experimental investigation on the magneto-optic effects of ferrofluids via dynamic measurements”, D. Jamon, F. Donatini, A. Siblini, F. Royer, R. Perzynski, V. Cabuil, S. Neveu, **J. Magn. Magn. Mater**, 321, p1148-1154 (DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.10.038), 2009.

[ACL 9] “Phase matching between two modes TE and TM in a thin layer of rectangular waveguides with optimized dimensions and containment”, M.R. Lebbal, T. Boumaza, M. Bouchemat, A. Hocini, J.J. Rousseau, F. Royer, **Physical and Chemical News**, 40, p 17-22, 2008.

[ACL 8] “Anisotropy adjustment and thickness of thin layer doped by nanoparticles magnetic for the realization of phase matching between fundamental modes in monomode waveguides”, M.R. Lebbal, T. Boumaza, M. Bouchemat, A. Hocini, F. Hobar, A. Benghalia, J.J. Rousseau, F. Royer, **European Physical Journal–Applied Physics**, 42 2 75-80 (DOI: 10.1051/epjap:2008033), 2008.

[ACL 7] “Birefringence in magneto-optical rib waveguides made by SiO₂/TiO₂ doped with γ -Fe₂O₃”, A. Hocini, T. Boumaza, M. Bouchemat, F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau **Microelectronics Journal**, Vol 39 (1), pp 99-102, 2008.

[ACL 6] “Accurate and rapid optical characterization of an anisotropic guided structure based on a neural method”, S.Robert, Y.Battie, D.Jamon, and F.Royer, **Applied Optics** , vol. 46, N° 11, pp. 2036-2040,(DOI :10.1364/AO.46.002036) 2007.

[ACL 5] “Magneto-optical nanoparticle-doped silica-titania planar waveguides F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, H. Roux, D. Zins, V. Cabuil », **Applied Physics Letters**, vol 86(1), 011107, (DOI: 10.1063/1.1844038), 2005.

[ACL 4] “Magneto-optical properties of CoFe₂O₄ ferrofluids: Influence of the nanoparticles size distribution”, F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, D. Zins, V. Cabuil, S. Neveu and H. Roux, **Progress In Colloid and Polymer Science**, vol 126, 155-158, 2004.

[ACL 3] “Ferrofluids, sol-gel method and materials for optical applications”, D. Jamon, D. Zins, H. Roux, F. Royer, V. Cabuil, C. Bovier and J.J. Rousseau, **Indian Journal of Engineering and Materials Science**, vol 11, p 237-240, 2004.

[ACL 2] “Experimental investigation on γ -Fe₂O₃ nanoparticles Faraday Rotation: particles size dependence” F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, V. Cabuil, D. Zins, H. Roux and C. Bovier, **European Physical Journal–Applied Physics**, vol 22 (2), p83-87, 2003.

[ACL 1] “Particles size dependence of Faraday rotation in maghemite ferrofluid”, F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, V. Cabuil, D. Zins and H. Roux, **Trans. Magn. Soc. Jpn.**, Vol 2, n°4, p 155, 2002.

7.5.2. Communications Internationales

[ACTI16] “Efficient magneto-optical mode converter on glass”, J. P. Garayt, F. Parsy, D. Jamon, S. Neveu, F. Royer, E. Ghibaudo, J.E. Broquin, «**Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XVIII**, part of **Photonics West**, San Francisco, 1-6 février 2014, accepté.

[ACTI 15] “Experimental studies of cobalt ferrite nanoparticles doped silica matrix 3D magneto-photonic crystals”, E. Abou-Diwan, F. Royer, R. Kekesi, D. Jamon, M.F. Blanc-Mignon, S. Neveu, J.J. Rousseau, **Integrated Photonics: Materials, Devices, and Applications II**, part of **Microtechnologies**, Grenoble, 24-26 février 2013, **Proceedings of SPIE**, 876732.

[ACTI 14] “Magneto-optical mode conversion in a hybrid glass waveguide made by sol-gel and ion-exchange techniques”, F. Royer, H. Amata, F. Parsy, D. Jamon, E. Ghibaudo, J.E. Broquin, S. Neveu, **Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XV**, part of **Photonics West**, San Francisco, 21-26 janvier 2012, **Proceedings of SPIE**, vol 8264, 826403 (doi: 10.1117/12.910696).

[ACTI 13] “Fully compatible magneto-optical sol-gel material with glass waveguides technologies : application to mode converters”, F. Royer, D. Jamon, J.E. Broquin, H. Amata, R. Kekesi, S. Neveu, M.F Blanc-Mignon, E. Ghibaudo, **Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XV**, part of **Photonics West**, San Francisco, 22-27 janvier 2011, **Proceedings of SPIE**, vol 7941, 794106. (doi:10.1117/12.874927).

[ACTI 12] “Optical anisotropy of magnetosome-doped polymer films”, A. Dzarova, F. Royer, D. Jamon, P. Kopcansky, F. Choueikani, H. Gojzewski, J. J. Rousseau, M. Timko, **ICMF 12, International Conference on Magnetic Fluids**, Sendai, Japon, 1-5 Aout 2010.

[ACTI 11] “Magnetic nanoparticles doped silica layer reported on-ion-exchanged glass waveguide: towards integrated magneto-optical devices”, H. Amata, F. Royer, F. Choueikani, D. Jamon, J.E. Broquin, J.C. Plenet, J. J. Rousseau, **Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits**, Bruxelles. 12-16 Avril 2010, **Proceedings of SPIE**, vol 7719, 77191G (doi:10.1117/12.853693).

[ACTI 10] “Preliminary studies of 3D Magnetophotonic Crystals designed from a template stuffed by sol-gel process”, R. Kekesi, F. Royer, M.F. Blanc Mignon, F. Goutaland, J.P. Chatelon, E. Tombacz, D. Jamon, **Photonic Crystals Materials and Devices**. 12-16 Avril 2010, **Bruxelles, Proceedings of SPIE**, vol 7713, 77130N (doi: 10.1117/12.853828).

[ACTI 9] “Phase matched magneto-optic planar waveguide elaborated by magnetic nanoparticles embedded in an organic-inorganic sol-gel matrix”, F. Choueikani, F. Royer, D. Jamon, S. Neveu, **Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits, Strasbourg. 7-10 Avril 2008, Proceedings of SPIE, vol 6996, 69961L, (DOI: 10.1117/12.781238).**

[ACTI 8] “Magneto-optical waveguides made of magnetic nano-particles embedded in organic-inorganic sol-gel”, F. Choueikani, F. Royer, D. Jamon, A. Sibli, D. Zins, **Actes de la conférence : JEMS06 , San Sebastian , Espagne , 26-30 Juin, 2006**

[ACTI 7] “A way to reduce the modal birefringence of low index magneto-optical waveguides”, F. Choueikani, F. Royer, D. Jamon, C. Nader, A. Sibli, J. Charara, **Actes de la conférence : CSM5 , Beyrouth , Liban , 17-19 May, 2006.**

[ACTI 6] “Study and characterization of low index magneto-optical waveguides, F. Choueikani, F. Royer , D. Jamon , S. Robert, A. Sibli”, **European Conference on Integrated Optics (ECIO’05), Grenoble, 6-8 avril 2005.**

[ACTI 5] « Accord de phase et conversion de puissance entre deux modes TE-TM dans une couche mince SiO₂/TiO₂ dopée par γ -Fe₂O₃ », R. Lebbal, T. Boumaza, M. Bouchemat, A. Hocini, F. Hobar, A. Benghalia, F. Royer, J. J. Rousseau, **Actes de la conférence : OHD2005, Hammamet, Tunisie, September 6-8, 2005**

[ACTI 4] “A new technological approach in phase matched magneto-optic planar waveguide realization”, F. Royer , H. Roux, D. Jamon , J. J. Rousseau , D. Zins, V. Cabuil and C. Bovier, **Advances in Optical Thin Films, Saint Etienne. 30 sept - 3 oct 2003, SPIE Proceedings Series, vol. 5250, p72-80, 2004.**

[ACTI 3] “Ferrofluids, sol-gel method and materials for optical applications”, D. Jamon, D. Zins, H. Roux, F. Royer, V. Cabuil, C. Bovier and J.J. Rousseau, **International Workshop on recent advances in nanotechnology of magnetic fluids, New Delhi , 22-24 janvier 2003.**

[ACTI 2] “Magneto-optical properties of CoFe₂O₄ ferrofluids: Influence of the nanoparticles size distribution”, F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, V. Cabuil, D. Zins and H. Roux, **ECIS 2002, Paris, 22-27 septembre 2002.**

[ACTI 1] “Particles size dependence of Faraday rotation in maghemite ferrofluid”, F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, V. Cabuil, D. Zins and H. Roux, **MORIS 2002, Benodet, 5-8 Mai 2002.**

7.5.3. Communications Nationales

[ACTN6] « Mesure de la biréfringence de guides optiques non homogènes », J.P. Garayt, D. Jamon, F. Parsy, F. Royer, E. Ghibaudo et J.-E. Broquin, **Journées Nationales d’Optique Guidée 2013, 8 au 11 juillet 2013, Paris.**

[ACTN5] “Magnetic nanoparticles prepared by biomineralization process- preparation, characterization and utilization”, A. Hashim, N. Tomašovičová, M. Molčan, P. Kopčanský, Z. Tomori, F. Royer, D. Jamon, H. Gojzewski, M. Makowski, M. Timko, **12th Slovak Conference Physics of Material, Kosice, 17-19 octobre 2012.**

[ACTN 4] “Magneto-optical properties of magnetite nanoparticles prepared by various processes”, Dzarova, D. Jamon, M. Timko, F. Royer, P. Kopcansky, F. Choueikani, J.J. Rousseau, H. Gojzewski, **17th Conference of Slovak Physicists, Bratislava, 16-19 September 2009.**

[ACTN3]« Couches minces d'oxydes métalliques dopées en nanoparticules magnétiques Effets magnéto-optiques et applications aux composants », F. Choueikani, D. Jamon, F. Royer, J.J. Rousseau, **Conférence invitée : Workshop « Nanoparticules pour la Photonique », Cluster de recherche Micro Nano de la région Rhône Alpes, Villeurbanne, 9 avril 2009.**

[ACTN 2] « Le potentiel des matériaux sol-gel hybrides pour la fabrication à bas coût de composants pour la micro-optique et l'optique intégrée », C. Massard, F. Royer, D. Jamon et D. Blanc, **CMOI 2004, St Etienne, 16-19 novembre 2004.**

[ACTN 1] « Influence de la taille des particules magnétiques sur les propriétés optiques de ferrofluides à base de Maghémite », F. Royer, D. Jamon, J.J. Rousseau, V. Cabuil, D. Zins, H. Roux, **OPTIX 2001, Marseille, 26-28 novembre 2001.**