

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Liste des symboles	xi
Remerciements	xv
1 Introduction	1
Introduction	1
1.1 Généralités	1
1.2 Problématique générale	2
1.3 Motivations	7
1.4 Objectifs	13
2 Principes et état de l’art	15
2.1 Introduction	15
2.2 Effet Faraday	15
2.3 Définition sur les verres	19
2.4 État de l’art sur les verres et les fibres magnéto-optiques	22
2.5 Revue sur les rotateurs de Faraday	24
3 Méthodologie de fabrication d’un composant tout fibre	29
3.1 Introduction	29
3.2 Choix de la matrice vitreuse	29
3.3 Caractérisations thermique et optique des verres	31
3.4 Propriétés magnéto-optiques	39
3.5 Fabrication de la fibre optique	44
4 Résultats	46
4.1 Introduction	46
4.2 Détermination de la composition vitreuse	46

4.3	Caractérisation des verres	51
4.4	Fabrication des fibres optiques	63
	Conclusion	68
	Bibliographie	70

Liste des tableaux

4.1	Différentes compositions de verres silice-aluminium-bore dopés terbium	49
4.2	Valeurs mesurées de la constante de Verdet des différents échantillons synthé- sés	60

Liste des figures

1.1	Signal d'une impulsion réfléchie avec et sans isolateur [1]	6
1.2	Matrice de diffusion d'un isolateur[2]	7
1.3	Évolution de la capacité de transmission des fibres optiques [3]	8
1.4	Ions paramagnétiques en absence de champ magnétique [4]	11
1.5	Ions paramagnétiques en présence de champ magnétique [4]	11
1.6	Représentation schématique de l'alignement des moments magnétiques dans un matériau antiferromagnétique	12
1.7	Représentation schématique de l'alignement des moments magnétiques dans un matériau ferromagnétique	12
2.1	Rotation de Faraday dans un matériau magnéto-optique	16
2.2	Diagramme de polarisation elliptique[5]	17
2.3	Schéma caractéristique d'un verre extrait de [6]	20
2.4	Rotateur de Faraday à base de Yttrium-iron garnet YIG opérant à 1.153 μm [7]	24
2.5	Isolateur pour des opérations large bande [1]	25
2.6	Structure de fibre monomode à base de FR-5 [8]	26
2.7	Isolateur optique tout fibre à 633 nm [8]	26
2.8	Configuration d'un rotateur Faraday avec une fibre phosphate dopée au terbium [9]	27
2.9	Configuration d'un rotateur Faraday avec une fibre Alumino-boro-Silice dopée à 56 wt% terbium [10]	27
2.10	Configuration d'un rotateur de Faraday avec une fibre d'alumino-boro-silice dopée à 65 wt% en terbium [11]	28
3.1	Schéma d'une cellule DSC	32
3.2	Courbe de DSC du verre 50NaPO_3 , 15TbF_3 , 10CaF_2 , 10BaF_2 , 15AlF_3	33
3.3	Spectre de transmission pour différentes familles de verre : oxydes, fluorures et chalcogénures[12]	35
3.4	Montage de mesure de l'angle de rotation de Faraday	40
3.5	Schéma de calcul du champ magnétique en un point P de l'axe [13]	41
3.6	Configuration d'un aimant tube	42
3.7	Aimant utilisé pour les mesures sur les échantillons vitreux	42
3.8	Densité de flux magnétique B(z) pour un aimant N42	43
3.9	Machine du polissage du verre sous forme de tige	45
4.1	Échantillons de verre de silice - aluminium dopé à différentes concentrations de Tb_2O_3 : TSA5 (x=5) et TSA10 (x=10)	48

4.2	Échantillons de verre de silice -aluminium et bore dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3 : TSAB10, TSAB15, TSAB20, TSAB25 et TSAB30	48
4.3	Échantillons de verre de silice -aluminium et antimoine dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3 : TSAS20(x=20, y=0.5) et TSAS25(x=25, y=1)	49
4.4	Diagramme de phase d'une matrice à base de phosphate de sodium, fluorure du barium et le fluorure de terbium [14]	50
4.5	Échantillons de verre de fluorure de phosphate dopé avec a) 20%, b) 25%, c) 30%, d) 35% et e) 40% de fluorure de terbium	50
4.6	Courbe d'analyse thermique du verre à base de silice et aluminium dopé avec 10 % de terbium : TSA10 (x=10)	51
4.7	Variation de la température de transition vitreuse du verre de composition $SiO_2 + B_2O_3 + Al_2O_3 + Tb_2O_3$ en fonction de la concentration du Tb_2O_3 [tableau 4.1]	52
4.8	Courbe d'analyse thermique du verre à base de silice-antimoine-aluminium dopé avec (x=25%, y=1) molaire d'oxyde de terbium	53
4.9	Variation de la température de transition vitreuse en fonction de la concentration de TbF_3 : x=[20,25,30,35,40]	54
4.10	Courbes de transmission de verres d'aluminium-silice dopé à 5% mol et 10% mol	55
4.11	Courbe de transmission des verres de silice-aluminium et bore dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3	55
4.12	Courbe de transmission des verres de silice-aluminium et antimoine dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3	56
4.13	Courbe de transmission d'un verre de fluoro-phosphate dopé avec 20, 25, 30, 35, 40% de TbF_3	56
4.14	Indice de réfraction des verres de silice-aluminium et bore dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3 en fonction de la longueur d'onde	57
4.15	Indice de réfraction des verres de silice-Aluminium et Antimoine dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3	58
4.16	Indice de réfraction des verres de silice-aluminium et autres alcalins dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3	58
4.17	Indice de réfraction des verres de fluoro-métaphosphate de sodium dopés à différentes concentrations de TbF_3	59
4.18	Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres boro-silicate- aluminium dopés avec différentes concentrations de terbium	61
4.19	Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres antimoine-silice-aluminium dopés avec différentes concentrations de terbium	61
4.20	Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres aluminium-silice dopés avec différentes concentrations de terbium	61
4.21	Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres fluorure-métaphosphate de sodium dopés avec différentes concentrations de terbium	61
4.22	Figure de mérite d'un verre aluminium-borosilicate dopé avec différentes concentrations de Tb_2O_3	63
4.23	Figure de mérite d'un verre fluorure-méta phosphate de sodium dopé avec différentes concentrations de TbF_3	63
4.24	Une tige de verre de silice - aluminium dopé avec 10%mol de Tb_2O_3 : TSA10	64
4.25	Résultat de fibrage d'une tige de verre de silice - aluminium dopé avec 10%mol de Tb_2O_3 : TSA10	64

4.26	Une tige de verre de silice - bore-aluminium dopé avec 30%mol de Tb_2O_3 : TSAB30	65
4.27	Coupe transversale de la fibre avec TSAB30 comme verre du cœur et une gaine de silice	65
4.28	Analyse microscopique par rayon X d'un germe dans le cœur de la fibre	66
4.29	Vue longitudinale d'une fibre à cœur de verre TSAS25 : présence de cristaux . .	66
4.30	Tige d'un verre de 40%mol de TbF_3 après un test d'étirement	67

Liste des symboles

DSC Differential scanning calorimetry

EDFA Erbium doped fiber amplifier

FWM Four-wave mixing

SPM Self phase modulation

T_f Température de fusion

T_g Glass transition

T_p Température de pick de cristallisation

T_x Température de début de cristallisation

TNaB20 Verre à base de phosphate de sodium et fluorure de baryum dopé avec 20%mol de TbF_3

TNaB25 Verre à base de phosphate de sodium et fluorure de baryum dopé avec 25%mol de TbF_3

TNaB30 Verre à base de phosphate de sodium et fluorure de baryum dopé avec 30%mol de TbF_3

TNaB35 Verre à base de phosphate de sodium et fluorure de baryum dopé avec 35%mol de TbF_3

TNaB40 Verre à base de phosphate de sodium et fluorure de baryum dopé avec 40%mol de TbF_3

TSA10 Verre à base de silice, aluminium dopé avec 10% mol de Tb_2O_3

TSA5 Verre à base de silice, aluminium dopé avec 5% mol de Tb_2O_3

TSAB10 Verre à base de silice, bore et aluminium dopé avec 10%mol de Tb_2O_3

TSAB15 Verre à base de silice, bore et aluminium dopé avec 15%mol de Tb_2O_3

TSAB20 Verre à base de silice, bore et aluminium dopé avec 20%mol de Tb_2O_3

TSAB25 Verre à base de silice, bore et aluminium dopé avec 25%mol de Tb_2O_3

TSAB30 Verre à base de silice, bore et aluminium dopé avec 30%mol de Tb_2O_3

TSASb20 Verre à base de silice, antimoine et aluminium dopé avec 20%mol de Tb_2O_3

TSASb25 Verre à base de silice, antimoine et aluminium dopé avec 25%mol de Tb_2O_3

WDM Wave division multiplexing

XPM Cross phase modulation

*A toute personne qui m'a donné
une partie de sa vie : son temps
pour être la personne qui je suis
aujourd'hui Merci !!*

Dès que tu commences à marcher
sur le chemin, le chemin
apparaît...

Rumi

Remerciements

A l'issue de la rédaction de ce mémoire, je suis convaincue que la recherche scientifique est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce projet sans le soutien des personnes avec une grande générosité et une bonne humeur.

Je tiens à remercier en premier temps, mon directeur de recherche, le professeur **Younès Messaddeq** de m'avoir donné cette opportunité de travailler au sein du groupe de la chaire d'excellence en recherche du Canada en photonique, de sa confiance qu'il m'a accordée pour faire ce projet et de ses multiples conseils durant les différentes étapes. Ses qualités humaines d'écoute et de compréhension m'ont vraiment touchée.

Je remercie également le professeur **Bora Ung** pour la codirection et l'idée de ce projet qui m'a permis de valider la connexion entre les différents domaines de la science et que chaque résultat n'est qu'un pas vers un autre plus profond.

Je souhaiterais aussi adresser mes gratitude au professeur **Réal Vallée** pour avoir accepté de participer comme examinateur du mémoire et de l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de mon projet de recherche.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe du Centre Optique Photonique et Laser de l'Université Laval (COPL) : professeurs, professionnels de recherche, techniciens et étudiants pour l'aide et les conseils dans les parties théoriques et expérimentales de ce travail.

Ma reconnaissance va à ceux qui ont plus particulièrement assuré le soutien affectif de ce travail de recherche : ma famille et mes amis.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Généralités

Les technologies de l'information et des communications prennent une grande importance dans notre vie quotidienne. En utilisant différents composants électroniques et optiques dans plusieurs domaines, l'intérêt de l'individu d'utiliser des composants optiques pour transmettre un grand débit d'information ne cesse d'augmenter. L'information est transmise à travers plusieurs types de réseaux de propagation ; interurbains ou internationaux, selon la nature de l'environnement ou la demande des usagers. En effet, le déploiement de la fibre optique est en pleine évolution pour répondre aux besoins des clients puisque ce support de transmission a prouvé sa capacité de transfert (plusieurs téraoctets/seconde) requise pour des applications et des services bien spécifiques.

En comparaison avec d'autres supports de transmission, la fibre optique présente une faible atténuation dans les bandes C ($1.53\mu\text{m}$ – $1.565\mu\text{m}$) et L ($1.565\mu\text{m}$ – $1.625\mu\text{m}$). Par conséquent, la régénération du signal est décalée de quelques kilomètres vers quelques dizaines de kilomètres. En 1978, les systèmes de transmission par fibre optique qui opéraient dans la région de $0.8\mu\text{m}$, ont déclenché la course pour la transmission de données à haut débit. Le développement des lasers à semi-conducteur à $1.3\mu\text{m}$ avec les fibres monomodes a marqué les années 1980 pour des capacités de transmission de l'ordre des Gbits/s et une faible dispersion. Cependant, la portée de ces systèmes étant limitée par les pertes de transmission de la fibre (0.5 db/km), la solution était donc de développer des sources laser à $1.55\mu\text{m}$ où les pertes sont relativement plus faibles. Toutefois, l'effet de la dispersion chromatique est plus important

qu'à $1.33\text{ }\mu\text{m}$. Cela affecte considérablement le débit et la bande passante.

Le développement de l'amplificateur à fibre dans les années 1980 a permis d'augmenter le gain et par la suite maintenir une bonne qualité d'information transmise à une longue distance. Ce composant a rapidement été commercialisé ce qui permet d'annoncer le début d'une nouvelle technologie des composants optiques tout fibre.

Le signal optique dans une chaîne de télécommunications est émis par une source laser, transporté par la fibre optique, amplifié (dans le cas d'une grande atténuation) et finalement détecté par des composants optiques ou opto-électroniques. Afin de minimiser les pertes de conversion électrique-optique, une nouvelle technologie des composants tout fibre a été inventée. Parmi ces composants, on trouve l'amplificateur optique EDFA, les coupleurs et les réseaux de Bragg. L'interaction entre l'onde lumineuse transmise et les matériaux utilisés dans la fabrication de la fibre optique est la base théorique de ces composants.

Dans la partie suivante, on présente quelques phénomènes qui peuvent nuire à la qualité de l'information transmise par le système. Ces défauts de transmission peuvent aussi endommager d'autres composants dans la chaîne. Dans ce contexte, le travail sur les isolateurs optiques prend toute son importance dans les travaux de recherche car ces composants permettent d'optimiser les performances de transmission dans le système optique.

1.2 Problématique générale

1.2.1 Les dommages causés par les lasers à haute puissance

Le développement des lasers à fibre à haute puissance vise à minimiser les pertes dues à l'architecture des fibres optiques. Ils sont pompés par des lasers à semi-conducteur et ils sont capables de fournir une puissance élevée avec un faisceau de bonne qualité. Ce type de laser est choisi pour son faible poids, sa taille qui est relativement petite, sa robustesse, son efficacité élevée et sa dissipation thermique pour être appliqué dans le domaine de la soudure et de la télédétection par laser. Étant donnée que la fibre optique était en pleine évolution pour les télécommunications, les chercheurs se sont surtout intéressés à l'amélioration de ses performances de transmission et de ses capacités à longue distance. Quelques visionnaires ont pensé à utiliser la fibre optique en dehors de son champs d'exploitation initial grâce à ses propriétés comme milieu actif pour les lasers en particulier et à son excellente qualité de

faisceau fournie par la structure du guide d'onde.

Le dopage par des ions terres rares dans la matrice vitreuse de la fibre optique est le principe derrière les nouvelles fonctionnalités de la fibre optique. Pour cela, le dopage avec les ions ytterbium Yb^{3+} est considéré plus efficace pour le développement des lasers à fibre à haute puissance puisque le défaut quantique est plus faible. De plus, il n'y a pas d'effet d'extinction ionique dans les lasers à fibre dopés Yb, cela lui permet d'être le plus utilisé jusqu'à la fin des années 1990 avec l'introduction des amplificateurs à fibre dopées erbium et les systèmes de multiplexage par longueur d'onde (WDM). Toutefois, la haute puissance générée par les lasers peut stimuler des effets néfastes pour la transmission tels que les effets non linéaires, des effets thermiques ou des dommages au niveau de la transmission optique. Cela explique le besoin nécessaire à travailler sur les isolateurs optiques à effet Faraday afin de minimiser les dégâts causés par ces lasers.

Effets non linéaires

L'utilisation des lasers à haute puissance augmente les réflexions indésirables dans la chaîne de transmission optique. Les faisceaux ainsi réfléchis peuvent interagir avec les matériaux constituant la fibre optique et par la suite endommager la source laser via d'autres types de phénomènes.

Effet Kerr Cet effet apparaît lorsque l'intensité du signal devient importante de façon qu'elle peut modifier significativement l'indice de réfraction la fibre [15].

$$n = n_0 + n_2 I \tag{1.1}$$

où n_0 est l'indice de réfraction linéaire de la silice, n_2 l'indice de réfraction non-linéaire et I l'intensité du signal. Cette relation entre l'indice de réfraction et l'intensité du signal peut non seulement être à l'origine d'autres effets non-linéaires intéressants comme l'auto-modulation de phase et la modulation de phase croisée mais aussi modifier les propriétés de transmission dans le cas d'utilisation de ce type de laser.

Auto-modulation de phase L'auto-modulation de phase (SPM pour Self Phase Modulation) décrit la dépendance de la phase à l'intensité du signal dans la propagation de l'onde dans la fibre. Le déphasage non linéaire à une distance z peut s'écrire :

$$\Phi_{NL}(z, T) = \gamma P_0 \frac{1 - \exp(-\alpha z)}{\alpha} \quad (1.2)$$

où α est le coefficient des pertes et γ le coefficient non-linéaire défini par l'équation suivante[15]

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} \quad (1.3)$$

où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide et A_{eff} l'aire effective de la fibre. La phase non linéaire cause un élargissement spectral. Dans le cas d'une haute puissance, la bande passante sera modifiée et la quantité de bruit augmente. Donc l'utilisation d'un isolateur optique est obligatoire afin d'atténuer ce bruit.

La modulation de phase croisée La modulation de phase croisée (XPM pour Cross Phase Modulation) est basée sur le même principe que l'auto-modulation de phase mais en présence de plusieurs ondes qui se propagent dans la fibre. Cela peut se produire à différentes longueurs d'ondes ou à des polarisations différentes. Par conséquent, l'indice de réfraction est modifié par la variation de l'intensité du signal en fonction des différentes ondes en propagation. Dans le cas de deux longueurs d'onde, on a la formule suivante

$$n = n_0 + n_2[I(\lambda_1) + 2I(\lambda_2)] \quad (1.4)$$

Le terme en $I(\lambda_1)$ décrit la SPM, et celui en $I(\lambda_2)$ correspond à la XPM.

Par conséquent, l'utilisation d'un rotateur de Faraday peut diminuer cet effet afin de maintenir une bonne transmission à une longueur d'onde précise.

Le mélange à quatre ondes L'effet du mélange à quatre ondes (ou FWM pour Four-Wave Mixing) peut être décrit par la destruction de deux photons de même fréquence ou non et l'apparition simultanée de deux autres photons à des fréquences différentes. La FWM est à la base du phénomène d'instabilité de modulation en présence de dispersion anormale.

L'effet Brillouin La diffusion Brillouin stimulée (ou SBS pour Stimulated Brillouin Scattering) est générée lorsque la puissance dépasse un seuil appelé P_{sB} . Elle résulte d'un couplage entre une onde optique et une onde acoustique. Ce phénomène se manifeste par la génération d'une onde décalée en fréquence par rapport à celle incidente et qui se propage dans la direction opposée que l'onde incidente. Le décalage de l'onde est calculé par :

$$\Delta\nu_B = \frac{2\pi\nu_A}{\lambda_p} \quad (1.5)$$

Dans le cas des lasers de haute puissance, l'intensité de ce phénomène est plus remarquable. Alors l'ajout d'un isolateur dans une chaîne de transmission devient nécessaire pour diminuer les réflexions et maintenir la bonne qualité du signal.

L'effet Raman La diffusion Raman stimulée (ou SRS pour Stimulated Raman Scattering) est un phénomène à trois ondes couplées, il se manifeste par le fait que l'onde de pompe génère une onde décalée en fréquence et une onde d'excitation vibrationnelle dans le milieu. Cet effet a lieu lorsque la puissance optique dépasse un seuil appelé P_{sR} . Contrairement à l'effet Brillouin, le SRS est présent dans les deux sens de propagation de la fibre.

Effets thermiques

En plus les effets non linéaires causés par la variation d'indice, la haute puissance des lasers peut endommager le lien optique par des effets de chaleur. Dans ce paragraphe, on cite deux dommages les plus remarquables causés par les lasers à haute puissance :

Fracture thermique Les contraintes thermiques générées par la haute puissance peuvent rendre les surfaces de la fibre plus sensibles aux fissures ou aux rayures.

L'effet lentille C'est un effet induit par gradient de température. Le chauffage par la puissance du laser peut provoquer des changements radiaux ou spatiaux de l'indice de réfraction, des contraintes mécaniques engendrant des modification de la structure du matériau où se propage le faisceaux laser.

1.2.2 Limites des isolateurs optiques

Pour diminuer les dommages causés par les effets néfastes de la haute puissance des lasers à fibre sur un système de communication optique, on utilise l'isolateur optique pour protéger les composants constituant la chaîne de transmission. Un isolateur optique, par définition, est un dispositif qui bloque le signal lumineux dans une seule direction et le laisse passer dans la direction opposée. Cela est important dans le cas où on veut protéger la source laser des réflexions qui peuvent perturber son fonctionnement ou si on veut atténuer les interférences par trajets multiples dans un système de communication optique. En outre, l'utilisation d'un isolateur améliore généralement la conception d'un système car ce composant supprime les interférences parasites, les interactions entre les différents dispositifs et le routage indésirable de la lumière.

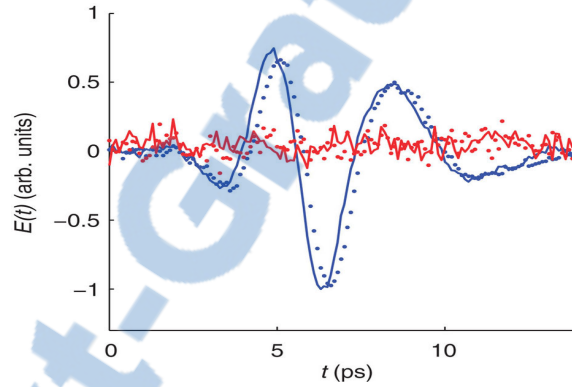


FIGURE 1.1 – Signal d'une impulsion réfléchie avec et sans isolateur [1]

La figure 1.1 ci dessus illustre la réflexion issue d'une impulsion térahertz. La courbe rouge montre l'efficacité des isolateurs de Faraday à corriger ce problème dans la chaîne de transmission.

Pour assurer la fonction d'isolement dans un circuit optique à deux ports, il faut que les éléments de la matrice de diffusion reliant ses ports présentent certaines caractéristiques. En effet, il doit y avoir une paire de modes pour chaque port tels que la transmission du mode μ du port 1 vers le mode ν dans le port 2 est essentiellement non nulle, tandis que la transmission inverse est proche de zéro. Dans ce cas, l'énergie peut être rayonnée, émise à une autre sortie ou dissipée dans le dispositif.

Pour satisfaire les exigences d'isolation d'un isolateur optique à deux ports, sa matrice de diffusion (Figure : 1.2) doit être asymétrique puisque les directions de propagation opposées

ont des transmissions mode à mode.

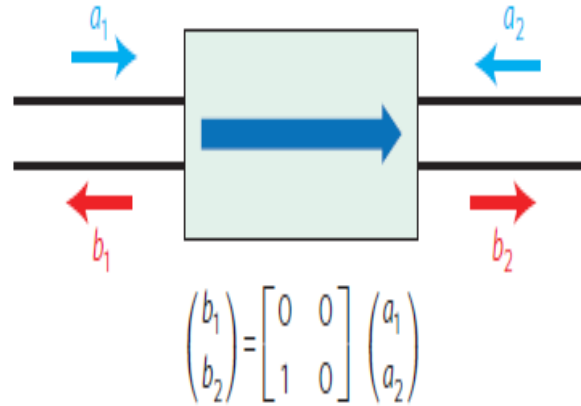


FIGURE 1.2 – Matrice de diffusion d’un isolateur[2]

Un isolateur optique, doit dévier ou bloquer tous les modes qui peuvent être excités pour la transmission arrière. Autrement dit, avoir une mauvaise transmission dans le sens arrière ne suffit pas pour assurer la fonction d’un isolateur puisque dans les systèmes pratiques, un ensemble arbitraire de modes peut être excité par la réflexion parasite. En particulier, une fibre monomode standard peut soutenir deux modes de polarisation orthogonaux guidés. Une réflexion parasite peut exciter une répartition arbitraire du puissance dans les deux polarisations. Par conséquent, un isolateur devrait bloquer ou dévier les deux polarisations quelles que soient leurs amplitudes ou la relation de phase entre elles.

1.3 Motivations

1.3.1 L’évolution des systèmes à fibre optique à deux modes

Les composants optiques tout fibre, exploités dans les systèmes de télécommunications à 1.55 μm sont généralement à base de fibres dont les fréquences normalisées sont supérieures ou égales à 2.405. C’est le cas des rotateurs de Faraday tout fibre cités dans la littérature. De plus en plus les besoins en capacité augmentent, de nouveaux types de fibres optiques sont développés dont le nombre de modes est contrôlé.

Dans le prochain paragraphe, on présente les caractéristiques de la fibre à un nombre réduit de modes, ses avantages et ses limites qui constituent un déficit pour réaliser un rotateur de Faraday avec ce type de fibre.

Les fibres à un nombre réduit de modes

Les fibres à N modes de propagation permettent de multiplier la capacité de transmission par un facteur de N en utilisant N canaux. Cependant, cela peut augmenter beaucoup d'effets indésirables comme la diffusion de Rayleigh et l'interférence entre les modes. Ce type de fibre est de plus en plus étudié dans la recherche puisque il a permis d'exploiter une nouvelle dimension autre que le temps, la longueur d'onde ou la polarisation ou la phase : l'espace. Cela a créé un nouveau concept dans le monde des communications optiques : le multiplexage par division dans l'espace. Cette évolution a permis l'augmentation de la capacité du lien et aussi la rapidité du transfert de l'information.

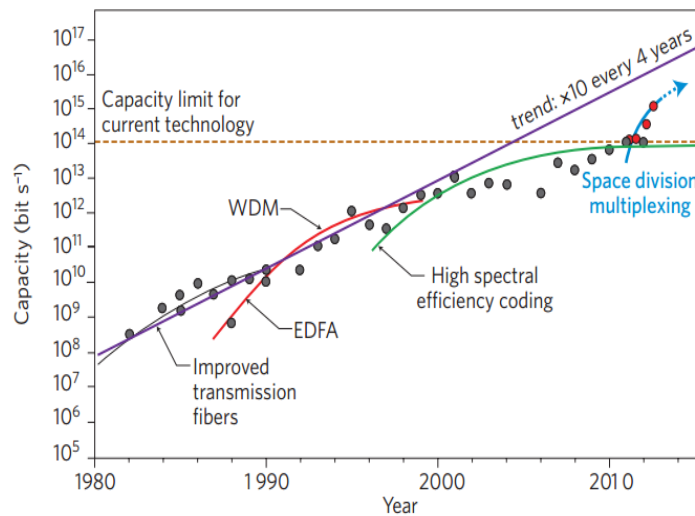


FIGURE 1.3 – Évolution de la capacité de transmission des fibres optiques [3]

Le principe de cette technique est de définir plusieurs chemins spatialement distincts dans la même fibre optique. Cela peut générer une grande difficulté de gestion non seulement des interférences mais aussi dans la gestion des réflexions. La fabrication des fibres few modes est similaire à celle des fibres monomodes. Cela diminue le coût par rapport aux fibres à maintien de polarisation qui ont une structure plus ou moins complexe [16]. De plus, l'utilisation de ces fibres dans les chaînes de transmission nécessite d'autres composants à fibre de même niveau de capacité de transfert afin d'améliorer les performances. Parmi les composants étudiés, on trouve les amplificateurs à fibre few modes dopée erbium [17], les coupleurs à différents types : par couplage sélective de modes [18, 19], couplage inter-modes [20], couplage acousto-optique [21, 22] ou couplage par modulation par effet de Kerr [23, 24], les multiplexeurs et les démultiplexeurs [25] et des capteurs optiques [26]. Le progrès remarquable des composants tout

fibre few modes crée le besoin de développement des isolateurs optiques pour ces systèmes de communication. D'autre part, la non-réciprocité des matériaux magnéto-optiques est le principe derrière la conception des rotateurs de Faraday.

1.3.2 La non-réciprocité des matériaux magnéto-optiques

Définition de la non-réciprocité

Physiquement la propagation dans les systèmes obéit généralement au principe de l'inversion de la symétrie temporelle. Autrement dit si la direction du temps est renversée, la forme mathématique de l'onde est conservée. Cela signifie que l'onde électromagnétique qui se propage dans le sens direct possède les mêmes caractéristiques que celle en sens inverse. Dans une chaîne de transmission optique, l'utilisation des composants non réciproques comme les isolateurs est indispensable pour supprimer les bruits de propagation et stabiliser les sources laser. Le principe derrière le fonctionnement de ces composants est la rupture des inversions symétriques temporelles et spatiales par la dispersion des spins d'électrons affectée [27]. En particulier l'effet Faraday, le principe utilisé dans ce projet, correspond à la division de spin dans les systèmes électroniques avec une inversion de la symétrie temporelle rompue.

Par conséquent, il faut utiliser des matériaux magnétiques capables de briser la symétrie de l'inversion du temps pour créer un rotateur de Faraday.

Matériaux magnéto-optiques

Soumises à un champs magnétique, certaines substances se mettent à créer elles même une induction magnétique. Les matériaux magnétiques sont capables de s'aimanter et de se polariser en présence d'un champs magnétique. On peut classer ces matériaux selon leurs propriétés magnétiques :

Les matériaux diamagnétiques Ce type de matériau est caractérisé par une susceptibilité relative négative et de faible amplitude à cause des mouvements orbitaux des électrons en présence de champs magnétiques. Ce mouvement peut être décrit comme un courant induit dans un solénoïde. Le signe négatif de X_r traduit l'effet d'induction magnétique par la loi de Lenz dont le courant induit s'oppose au champ qui lui a donné naissance. Certains métaux, les gaz rares, un grand nombre de composés organiques et la plupart des métalloïdes sont

diamagnétiques ; leur susceptibilité magnétique est de l'ordre de 10^{-5} et 10^{-6} . La constante de Verdet, caractéristique de l'effet Faraday, dans ce type de matériau peut être exprimée par la variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde [28].

$$V_{dia} = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (1.6)$$

Dans le cas des composants vitreux, la variation de l'indice de réfraction par rapport de la longueur d'onde est négligeable. Par conséquent, les matériaux diamagnétiques ont une faible réponse de Faraday par rapport aux autres classes de matériaux [29]. De plus, dans le diamagnétisme, cette variable dépend légèrement de la température ce qui peut causer un problème dans le cas des capteurs. Cette dépendance est exprimée par l'équation :

$$\frac{1}{(VL)_0} \frac{d(VL)}{dT} = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} + \alpha \quad (1.7)$$

avec α est le coefficient d'expansion thermique, V est la constante de Verdet et L est la longueur du matériaux exposé au champ magnétique et l'indice 0 correspond aux valeurs de V et L à la température 20°C .

Matériaux paramagnétiques En présence du champ magnétique, un matériau paramagnétique est capable de s'aimanter faiblement dans le même sens que le champ magnétique vu que les atomes possèdent des moments magnétiques permanents qui ne sont pas couplés les uns aux autres. Cependant, la polarisation résultante est très faible puisque l'effet d'agitation thermique qui oriente aléatoirement ces moments reste consistant. Le matériau paramagnétique est caractérisé par une susceptibilité relative positive et de faible amplitude entre 10^{-6} et 10^{-3} .

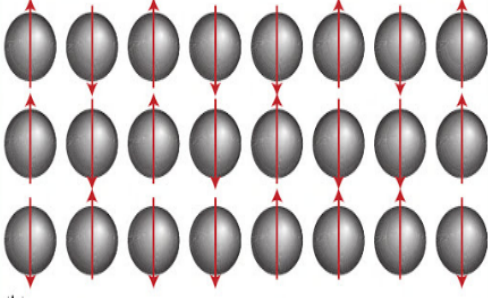


FIGURE 1.4 – Ions paramagnétiques en absence de champ magnétique [4]

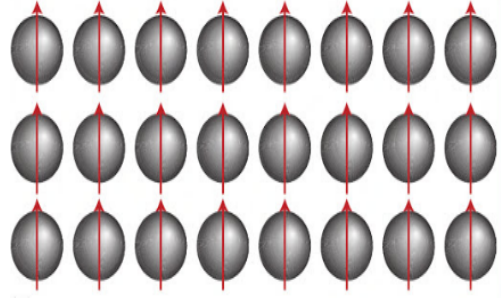


FIGURE 1.5 – Ions paramagnétiques en présence de champ magnétique [4]

La plupart des gaz, certains métaux et quelques sels font partie de la catégorie des matériaux paramagnétiques. La constante de Verdet des matériaux paramagnétiques est généralement calculée par la somme de celle de la composante diamagnétique et l'autre de la composante paramagnétique. V_{dia} est positive par contre V_{para} est négative. Par conséquent, l'effet Faraday dans un matériau paramagnétique peut être exprimé par l'équation [30] :

$$V_{para} = \frac{\nu \chi_{para}}{g} \sum_{a,b} \frac{C_{ab}}{\nu^2 - \nu_{ab}^2} \quad (1.8)$$

avec ν la fréquence de la lumière, χ_{para} la susceptibilité magnétique, C_{ab} la probabilité de transition énergétique et ν_{ab} la fréquence correspondant à la transition. La susceptibilité paramagnétique χ_{para} est calculée par [28]

$$\chi_{para} = \frac{Ng^2[j(j+1)]\mu_B^2}{3kT} \quad (1.9)$$

avec N est le nombre d'ions par unité de volume, g est le facteur de Landé, j est le nombre quantique orbital, k la constante de Boltzman, T la température et μ_B est la susceptibilité magnétique. Cela montre la dépendance de l'effet paramagnétique avec la température.

Les matériaux antiferromagnétiques Dans cette catégorie de matériaux, la variation de susceptibilité en fonction de la température a une allure différente malgré que le comportement

magnétique soit similaire à celui des matériaux paramagnétiques. C'est à dire, les moments magnétiques des atomes sont permanents mais aussi sont dépendants les uns aux autres. Ce couplage antiferromagnétique cause un arrangement antiparallèle des moments comme le montre la figure ci dessous

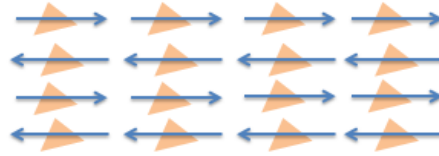


FIGURE 1.6 – Représentation schématique de l'alignement des moments magnétiques dans un matériau antiferromagnétique

Lorsque la température augmente, cet arrangement diminue. La dégradation de l'effet de force d'alignement rend l'action du champ extérieur plus remarquable. À une température de Néel θ_N , le couplage disparaît et le matériau se comporte comme un paramagnétique. Un assez grand nombre d'oxydes, de chlorures et autres composés des métaux de transition sont antiferromagnétiques.

Matériaux ferromagnétiques le ferromagnétisme est caractérisé par une susceptibilité magnétique χ élevée, positive et qui varie avec l'excitation magnétique. Les moments magnétiques dans ces éléments ont une orientation parallèle les uns aux autres par le couplage ferromagnétique. De plus, ils ont une polarisation spontanée.

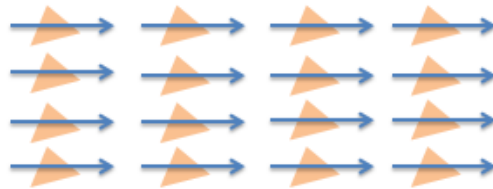


FIGURE 1.7 – Représentation schématique de l'alignement des moments magnétiques dans un matériau ferromagnétique

Au delà de la température de Curie, l'agitation thermique conduit à une susceptibilité similaire à celle d'un paramagnétique suivant la loi de Curie-Weiss. Toutefois, au lieu que la susceptibilité magnétique devienne infinie à 0 K comme un paramagnétique, elle devient infinie

à une température T_C dite température de Curie. Parmi les matériaux ferromagnétiques, on trouve le fer, le cobalt, le nickel et certains de leurs alliages, quelques terres rares et un nombre d'alliages de manganèse avec l'aluminium et le cuivre.

1.4 Objectifs

1.4.1 Objectif général

D'après ce qui précède, l'évolution des technologies de communication et de l'information dans ses différents aspects a créé de nouveaux besoins de débit d'information et de qualité de transmission. Pour répondre à ces besoins, il est nécessaire d'explorer des nouveaux matériaux vitreux afin de produire des composants fibrés utilisés comme isolateurs optiques opérant à $1.55\mu\text{m}$.

En exploitant l'effet Faraday dans les matériaux et les techniques d'assemblage opto-mécaniques, le but est de concevoir un composant optique en utilisant uniquement des fibres few-modes (deux modes) et un aimant générant un champ magnétique pouvant créer une rotation du plan de polarisation d'angle de 45° . Ce dispositif peut être ensuite inséré dans une chaîne de transmission optique utilisant des fibres multimodes en assurant la protection des sources laser et offrant ainsi un débit élevé.

1.4.2 Objectifs spécifiques

Dans ce travail, la fabrication d'un rotateur de Faraday tout fibre passe par plusieurs étapes :

Détermination de la matrice vitreuse

Dans cette partie du projet, une étude des différentes matrices qui peuvent servir à la fabrication du verre magnéto-optique est primordiale. Le choix des formateurs vitreux et des matériaux dopants est une étape primaire pour la synthèse du verre, aussi avoir une idée des proportions de chaque composé est nécessaire pour estimer l'effet magnéto-optique et la possibilité de fibrage d'un tel verre. Le défi est donc de trouver une composition vitreuse dans laquelle on peut incorporer une grande concentration d'un composé à effet Faraday.

Caractérisations des verres fabriqués

Après avoir fabriqué les échantillons de verre, il faut déterminer les propriétés thermiques pour avoir une idée sur la stabilité du verre lors de l'étirement de la préforme, les propriétés optiques par mesure de l'indice de réfraction afin de définir par la suite la composition de la gaine qui permet d'avoir une fibre optique à deux modes de propagation à $1.55\text{ }\mu\text{m}$ et une transparence du verre dans les bandes voulues.

La mesure de la constante de Verdet est par la suite importante pour s'assurer de la bonne réponse magnéto-optique du verre synthétisé. Enfin, une comparaison des figures de mérite des échantillons est nécessaire afin de trouver la bonne composition vitreuse d'une fibre optique opérant à $1.55\text{ }\mu\text{m}$.

Étirement de la fibre optique

Cette étape est le résultat du travail précédent, des tests de fibrage de verres seront réalisés pour avoir une fibre magnéto-optique. Pour cela, des préformes de verre à forte concentration de terbium seront préparées soigneusement afin d'être étirées. Les tiges vitreuses résultats de l'étirement seront analysées pour comprendre l'effet de la concentration du dopage sur la cristallisation du verre.

Dans les prochains chapitres, on présente la théorie derrière l'effet Faraday, le développement des verres, les différents types de matrices et de fibres existant déjà dans la littérature et la méthodologie de conception utilisée dans ce projet et les différents résultats obtenus.

Chapitre 2

Principes et état de l'art

2.1 Introduction

Avant de se lancer dans la synthèse, la caractérisation des verres et la fabrication de fibres optiques, il sera important de mieux comprendre les principes fondamentaux de l'effet Faraday.

Dans ce chapitre, on introduit la théorie de la polarisation et la biréfringence circulaire responsable de l'effet Faraday. On citera ensuite quelques exemples de verres magnéto-optiques exploités dans des rotateurs de Faraday et des fibres à forte réponse magnéto-optique pour des capteurs ou des isolateurs optiques pour des longueurs d'ondes inférieures à $1\text{ }\mu\text{m}$.

2.2 Effet Faraday

2.2.1 Aperçu historique

L'effet Faraday a été découvert en 1845 par Michael Faraday. C'était la première interprétation de l'interaction entre une onde lumineuse et un champ magnétique. Cet effet est présent dans les matériaux diélectriques à transparence optique comme les verres et les cristaux.

Comme le montre la figure 2.1, l'effet Faraday se manifeste par la rotation du plan de polarisation de la lumière en passant dans un milieu magnétique.

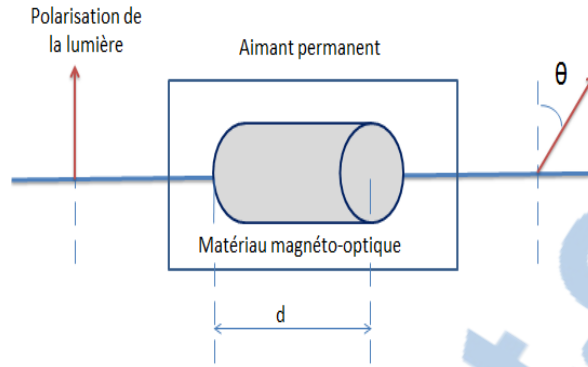


FIGURE 2.1 – Rotation de Faraday dans un matériau magnéto-optique

Afin de comprendre l'origine de ce comportement, on présente les principes théoriques de la polarisation et de la biréfringence circulaire.

2.2.2 L'ellipse de polarisation

Pour définir la polarisation de la lumière, il faut considérer une onde électromagnétique de la forme

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})] \quad (2.1)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 \exp[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})] \quad (2.2)$$

Où $k = \frac{\omega}{c}n$ est le vecteur d'onde qui définit la direction de propagation de l'onde lumineuse, et n est l'indice de réfraction du milieu. Puisque \vec{E} et \vec{B} sont perpendiculaires, on peut utiliser le champ électrique pour caractériser la polarisation. Le plan auquel les vecteurs \vec{E} et \vec{k} appartiennent est appelé plan de polarisation. La polarisation linéaire dont le plan de polarisation de l'onde électromagnétique ne change pas au cours de la propagation peut être réalisée par la lumière naturelle et un polariseur.

La théorie de Fresnel et Arago considère que la composante longitudinale de la lumière n'existe pas. Autrement dit, si on choisit la propagation selon l'axe (oz), le vecteur champ électrique sera formé par ces deux composantes transverses :

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\varphi(z, t) - \delta_x) \quad (2.3)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(\varphi(z, t) - \delta_y) \quad (2.4)$$

E_{0x} et E_{0y} sont les amplitudes de l'onde, $\varphi(z, t) = \vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t = kz - \omega t$. Ces équations représentent la polarisation du champ optique. En effet, la propagation de la lumière décrit une ellipse générée par l'ensemble de ces deux composantes. Le développement du système d'équation précédent donne :

$$\frac{E_x(z, t)}{E_{0x}} = \cos(\varphi(z, t) - \delta_x) \quad (2.5)$$

$$\frac{E_y(z, t)}{E_{0y}} = \sin(\varphi(z, t) - \delta_y) \quad (2.6)$$

L'équation générale de l'ellipse est sous la forme :

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x(z, t)}{E_{0x}} \frac{E_y(z, t)}{E_{0y}} \cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (2.7)$$

avec $\delta = \delta_y - \delta_x$. La présence du terme $2 \frac{E_x(z, t)}{E_{0x}} \frac{E_y(z, t)}{E_{0y}} \cos(\delta)$ montre que l'ellipse de polarisation est inclinée [31] selon un angle θ comme le montre la figure ci-dessous

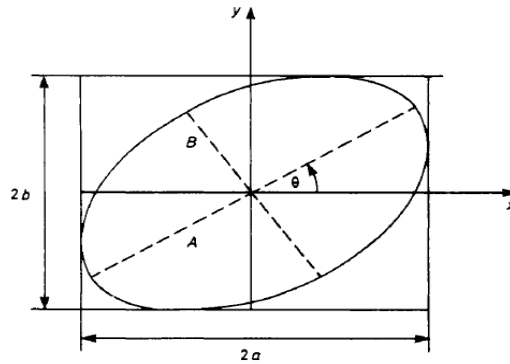


FIGURE 2.2 – Diagramme de polarisation elliptique[5]

Le diagramme de polarisation est décrit par les paramètres indiqués à la figure précédente :

- θ : définit l'orientation du grand axe par rapport à l'axe x, ce paramètre est nommé **angle d'orientation de l'ellipse de polarisation**

- l'angle d'ellipticité ψ est calculé par ce rapport $\tan \psi = \frac{\pm E_{0x}}{E_{0y}}$.
- L'ellipticité e est définie comme le rapport entre les axes de l'ellipse de polarisation ($e = \tan \psi$)

L'angle ψ est mesurée dans la direction où le vecteur E tourne, le signe est négatif pour la polarisation gauche et positive pour la polarisation droite. L'ellipse est également définie par les conditions $-1 \leq e \leq 1$ et $-\pi/4 \leq \psi \leq \pi/4$

Si $\psi = 0$, la polarisation est dite linéaire, si $\psi = \pm\pi/4$, la polarisation est circulaire et par la suite $a = b$.

La direction de polarisation est définie par sens du vecteur \vec{E} . Autrement dit si l'on regarde dans le sens opposé du vecteur \vec{k} , le vecteur \vec{E} peut tracer l'ellipse dans le sens direct ou indirect. Ces deux ondes sont appelées respectivement : onde polarisée droite est onde polarisée gauche. La différence entre ces deux polarisations est importante pour l'effet magnéto-optique, parce qu'elles ne réagissent pas de la même façon dans un milieu magnétique et cela est dû à la différence des vitesses de phase entre elles.

2.2.3 Principe de la rotation de Faraday

Une onde de polarisation linéaire se décompose en deux polarisations ; circulaire droite et circulaire gauche. En présence d'un champ magnétique longitudinal, les indices de réfraction effectifs des modes de polarisation sont différents. Cet effet se traduit par la rotation du plan de polarisation de la lumière polarisée linéairement. Pour définir l'effet Faraday, on considère que l'axe de l'aimantation coïncide avec l'axe de propagation de la lumière, par suite le vecteur champ électrique s'écrit de la forme [5] :

$$\vec{E}_z = \vec{E}_0 \exp[-i\omega(t - \frac{n}{c}z)] \quad (2.8)$$

Après la résolution des équations de Maxwell, $\text{div } \vec{E} = 0$, on obtient les deux modes de propagation avec une polarisation circulaire droite (e_+) et une polarisation circulaire gauche (e_-) respectivement qui ont deux indices de réfractions différents [5]

$$e_+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \exp[-i\omega(t - \frac{n_+}{c}z)] \quad (2.9)$$

$$e_- = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \exp[-i\omega(t - \frac{n_-}{c}z)] \quad (2.10)$$

Dans l'optique de Sommerfeld, l'utilisation de la force de Lorentz a permis de calculer la réponse des oscillateurs aux champs appliqués et d'obtenir par la suite la polarisation du milieu. À partir de la polarisation, on extrait les indices de réfraction associés aux composantes circulaires gauche et droite du champ optique et on trouve que la différence d'indice est donnée approximativement par[31]

$$\Delta n_F = k_F B \quad (2.11)$$

avec k_F est une constante de proportionnalité qui dépend du milieu de propagation. Cette biréfringence se manifeste par une rotation d'un angle θ_F donné par

$$\theta_F = \pi \frac{L_b}{\lambda} \Delta n_F = \frac{\pi k_F}{\lambda} L_b B \quad (2.12)$$

avec λ est la longueur d'onde et L_b est la longueur sur laquelle le champs magnétique est appliqué dans le milieu. On définit ainsi la constante de Verdet exprimée en $rad.T^{-1}.m^{-1}$ par [32] :

$$V = \frac{\pi k_F}{\lambda} \quad (2.13)$$

2.3 Définition sur les verres

2.3.1 Définition de l'état vitreux

Un verre, par définition, est « un solide non-cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse » [33]. Ce solide un matériau qui présente une structure ordonnée à courte distance mais pas d'ordre à longue distance.

2.3.2 Transition vitreuse

Pour bien comprendre comment la transition vitreuse se manifeste, nous allons accompagner l'évolution d'une constante physique : l'enthalpie ou le volume en fonction de la température. Au cours du refroidissement d'un liquide, la viscosité augmente jusqu'à la solidification totale du verre. La figure 2.3 montre les différents états d'un verre de sa fusion à partir des matériaux solides vers un état liquide dont l'énergie interne est élevée. À une température appelée **T_g**, la viscosité atteint une valeur de l'ordre de 10^{12} Pa.s, la pente de la courbe varie pour indiquer cette transformation. Au dessous de T_g, la variation du volume est similaire à celui d'un solide cristallin.

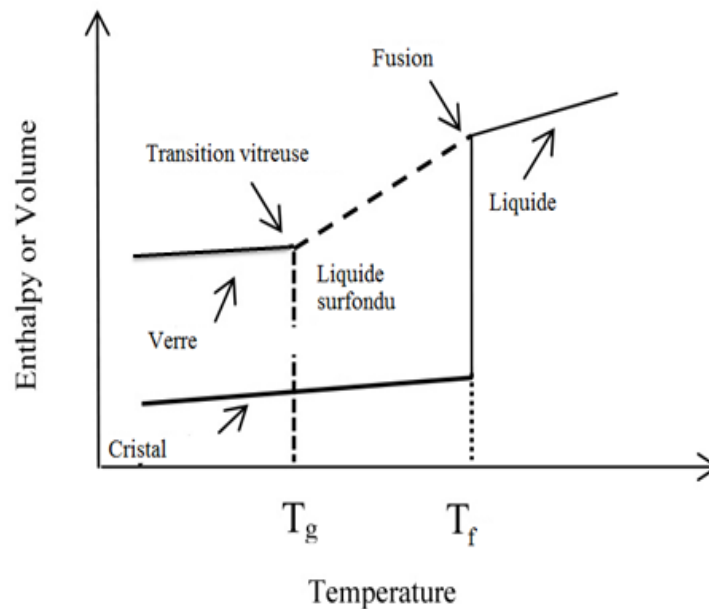


FIGURE 2.3 – Schéma caractéristique d'un verre extrait de [6]

Suite au refroidissement d'un liquide surfondu ou au réchauffement d'un verre solide, la transition vitreuse survient. La T_g varie en fonction de la vitesse du refroidissement du liquide.

2.3.3 Les types de verres

On trouve plusieurs types de verres selon les besoins d'utilisation et le choix des matériaux. Les premiers verres exploités sont à la base d'oxyde de silice (SiO_2). Ces verres sont stables vis-à-vis la cristallisation et aussi une bonne stabilité chimique et d'excellentes propriétés optiques.

Ceci a permis de considérer ces verres comme d'excellents candidats pour la production des fibres optiques. D'autres oxydes comme B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 , As_2O_3 et Sb_2O_3 peuvent aussi former tout seul des verres. Mais on peut aussi faire des combinaisons de ceux-ci pour obtenir des verres avec des propriétés physiques ou chimiques bien particulières.

Les oxydes intermédiaires dans une matrice vitreuse permettent de modifier les propriétés des verres. L'alumine Al_2O_3 permet d'améliorer les propriétés mécaniques et chimiques du verre et l'oxyde de zinc ZnO augmente la dureté chimique du verre [34]. De plus, l'association de plusieurs formateurs et d'autres types d'oxydes (alcalins ou alcalino-terreux) permet d'améliorer les propriétés des verres et d'étendre leurs domaines d'application. Citons par exemple l'effet de l'ajout de Na_2O qui permet de diminuer la viscosité et la résistance chimique et augmenter le coefficient de dilatation, par contre additionner le CaO dans la matrice permet d'améliorer la résistance chimique [34]. Un accès d'atomes d'oxygène à travers d'autres oxydes dans un verre de silice permet d'ouvrir les chaînes moléculaires dans le réseau ce qui permet d'augmenter la possibilité d'intégrer d'autres composés.

Les terres rares et les oxydes de métaux de transition sont ajoutés à la matrice vitreuse pour la formation de verres possédant des propriétés optiques spécifiques. La terre rare la plus connue dans le domaine des fibres optiques est l'erbium sous forme de Er_2O_3 pour des verres ayant une forte émission à la longueur d'onde des télécommunications. Dans le présent travail, on utilise l'oxyde de terbium Tb_2O_3 pour avoir un effet magnéto-optique dans les verres.

Pour étendre la plage de transmission, plusieurs chercheurs ont travaillé sur d'autres types de verres. On trouve les verres fluorés comme une catégorie qui présente une faible énergie de phonon et une transmission optique jusqu'à $5\mu m$. Ces verres sont de plus en plus utilisés dans la conception des systèmes optiques qui opèrent dans l'infrarouge moyen.

Le verre fluoré le plus développé est connu sous le nom de ZBLAN ($ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF$) qui a une faible vitesse critique de refroidissement et une bonne stabilité thermique vis-à-vis la dévitrification. Ce verre est généralement utilisé dans des applications médicales et des lasers à fibre opérants dans les longueurs d'onde entre $3\mu m$ et $5\mu m$ [35].

Une autre catégorie de verres est formée d'éléments du groupe IV (S, Se, Te) mélangé avec un ou plusieurs éléments du groupes III (Ga, In), IV (Ge, Si), V (Sb, As) ou VII (F, Cl, Br ou I) [34]. Parmi les verres développés, on trouve l'ensemble As-S, Ge-S, As-Se, Ge-Se,

Ge-As-Se.... Ces verres, dits verres de chalcogénures, sont particulièrement utilisés pour des applications dans l'infrarouge, moyen et lointain pouvant atteindre jusqu'à 20 μm dépendant de la composition chimique.

2.4 État de l'art sur les verres et les fibres magnéto-optiques

2.4.1 Verres magnéto-optiques

Plusieurs compositions possibles de verres peuvent avoir un effet magnéto-optique important selon les matériaux utilisés. Comme l'effet Faraday est plus fort dans les matériaux paramagnétiques essentiellement présents dans les métaux de transitions, les premières études ont été faites sur des compositions dopées avec différentes terres rares.

En 1965 deux groupes de recherches ont testé des compositions de verres à base d'oxyde de bore [36] et autres verres à base du pentoxyde de phosphore [37] dopés avec différentes terres rares. Les meilleures constantes de Verdet ont été obtenus par des combinaisons d'oxyde de terbium Tb_2O_3 et d'oxyde de praséodyme Pr_2O_3 pour les verres de borate et des compositions dopées avec l'oxyde de terbium ou l'oxyde de dysprosium Dy_2O_3 pour les verres de phosphate P_2O_5 . Les verres à base de silice ont été développés en 1967 par le groupe de Melvin Daybell [38] pour étudier l'effet de la variation de la température sur la réponse magnéto-optique sur des verres dopés avec l'oxyde de terbium au voisinage de la température de Curie. D'autres types de dopage ont été réalisés par l'équipe de Zhukov et al en 1967 [39] afin d'étudier la différence entre l'intensité de l'effet Faraday de chaque terre rare. Les meilleures valeurs de constante de Verdet ont été obtenues avec un verre de silice dopé avec l'oxyde de cérium CeO_2 . Le verre d'alumino-silicate dopé avec l'oxyde de manganèse MnO est synthétisé dans afin d'étudier l'origine de l'effet Faraday des ions Mn^{2+} [40].

En 1989, le travail de Letellier et al [41] sur les verres de fluoro-phosphate dopés avec le terbium et le dysprosium a démontré la possibilité d'atteindre une constante de Verdet de l'ordre de -30 rad/T-m à 633nm pour un verre dopé de plus de 30%*mol* de TbF_3 . D'autres groupes ont travaillé sur différents types de verres en changeant la composition afin d'étudier l'effet Faraday causé par les ions de terbium [42].

Les verres à base d'oxyde de bore-alumine-silice et de germanium ont été explorés par le groupe de A.V. Malakhovskii [43] en 2003 pour montrer la dépendance de l'effet magnéto-optique avec la température pour les ions de praséodyme, de dysprosium et de néodyme.

En 2005, les verres de chalcogènes ont été aussi étudiés [44] dans le but de mesurer la constante de Verdet au delà de $1\text{ }\mu\text{m}$. La meilleure valeur est été obtenue pour un verre de $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ soit $14\text{rad}/T - \text{m}$ à $1.55\text{ }\mu\text{m}$.

Les études faites sur les verres magnéto-optiques ont aidé à l'apparition des rotateurs de Faraday et aussi à l'apparition des nouveaux types de fibres optiques dites magnéto-optiques.

2.4.2 Fibres magnéto-optiques

Les fibres magnéto-optiques sont généralement composées d'un cœur à base de verre magnéto-optique et d'une gaine. Le choix des compositions des verres dépend de la différence d'indice de réfraction entre les verres et la structure de la fibre à concevoir.

La mesure de l'intensité de l'effet Faraday est différente de celle dans le cas des verres. Étant donné qu'une partie du signal se propage dans la gaine, la constante de Verdet effective sera de la forme [9]

$$V_{eff} = V_c \cdot \Gamma + V_g \cdot (1 - \Gamma) \quad (2.14)$$

avec V_c et V_g les constantes de Verdet du verre du cœur et du verre de la gaine respectivement et Γ est le facteur de confinement de mode ; il est calculé par le rapport entre la puissance dans le cœur et la puissance totale : $\Gamma = \frac{P_c}{P_{tot}}$.

La première fibre magnéto-optique a été faite en 1995 [45] basée sur un verre de silice-aluminium avec l'antimoine dopée de l'oxyde de terbium. Cette fibre est fabriquée avec la technique "rod in tube" avec une gaine de silice. La constante de Verdet obtenue était de l'ordre de $-20\text{rad}/T\text{m}$ à $1\text{ }\mu\text{m}$.

Vu la complexité d'avoir une fibre à grande constante de Verdet pour des longueurs d'onde supérieures à $0.6\text{ }\mu\text{m}$, le groupe de L. Sun a travaillé, dans une première étape de sa thèse, sur

des verres de phosphates avec NP Photonics [9] pour des fibres magnéto-optiques ayant -6.2 rad/T-m à $1\text{ }\mu\text{m}$ et sur des verres de silice-aluminium et bore dopé avec des concentrations ne dépassant pas 27% d'oxyde de terbium. Ces fibres ont été développées par AdValue Photonics [11] pour des isolateurs de Faraday opérants à 1064nm avec une constante de Verdet de l'ordre de -32rad/Tm .

Une fibre multimode a été développée en 2016 [46] à base de verre lanthanum boroaluminosilicate pour atteindre une constante de Verdet de -4.64 rad/Tm à 633nm ce qui est plus élevé que pour une fibre standard de silice.

2.5 Revue sur les rotateurs de Faraday

2.5.1 Rotateur de Faraday à base de cristaux

Dans ce type d'isolateur, la partie responsable de la rotation du plan de polarisation de la lumière issue du laser est un cristal. Le cristal le plus utilisé est le *Yttrium – iron – garnet* $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) [7], lequel a permis la conception d'un isolateur optique à $1.153\text{ }\mu\text{m}$ avec une isolation de 30dB dans le sens inverse de propagation. Le principe était de rassembler un cristal entre deux polariseurs à l'intérieur d'un aimant sous forme de tube. La figure suivante montre le rotateur développé.

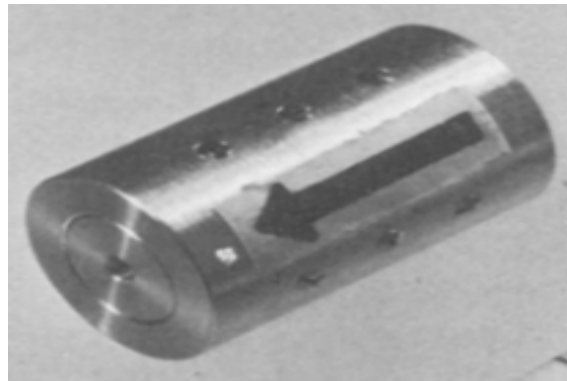


FIGURE 2.4 – Rotateur de Faraday à base de Yttrium-iron garnet YIG opérant à $1.153\text{ }\mu\text{m}$ [7]

Le YIG ne peut pas être utilisé en dessous de $1.1\text{ }\mu\text{m}$ à cause de sa transparence faible. Un autre cristal est donc utilisé pour assurer la fonction d'isolateur dans le visible et le proche infrarouge

en se basant sur le terbium comme matériau magnéto-optique. Le *Terbium – aluminum – garnet*, $Tb_3Al_5O_{12}$ (*TAG*), est caractérisé par une grande constante de Verdet et une bonne transparence optique dans la région visée[47]. Cependant, ce type de cristal est difficile à obtenir à cause de l'impossibilité de faire croître les cristaux dans des conditions de fusion convenables. Pour résoudre ce problème, le *Terbium – Gallium – garnet*, $Tb_3Ga_5O_{12}$ (*TGG*) [48] est industriellement développé ; toutefois, la fusion est faite à 1825°C et la croissance des cristaux demeure difficile à contrôler. Un autre isolateur à base de $Tb_3[Sc_{1.95}Lu_{0.05}](Al_3)O_{12}$ *garnet*, (*TSLAG*) est démontré [49], ce dernier offre une bonne transmission dans le visible et une constante de Verdet plus grande que celle des cristaux cités.

2.5.2 Rotateur Faraday à base de matériaux vitreux

La croissance de la recherche dans les systèmes à large bande a permis le développement des isolateurs de Faraday dans les térahertz. Ce composant n'est pas tout fibre dans lequel un aimant transparent de matériau $SrFe_{12}O_{19}$ [1] est utilisé pour réaliser la rotation de Faraday grâce aux propriétés magnétiques. La figure ci-dessous présente un schéma explicatif de l'isolateur :

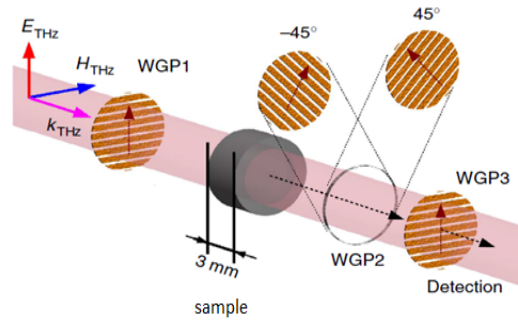


FIGURE 2.5 – Isolateur pour des opérations large bande [1]

2.5.3 Rotateur Faraday à base de fibres

Beaucoup de groupes de recherche ont travaillé sur la conception d'un isolateur optique à base de fibre, cela dans le but de l'intégrer dans une chaîne de transmission optique. Le premier rotateur est fabriqué à base du verre FR-5 avec double gaine en boro-silicate [8] ; ce rotateur est caractérisé par une constante de Verdet ($V = -72.5 \text{ rad/T-m}$) à $\lambda = 0.633\mu\text{m}$. Les figures

ci-dessous [8] montrent la structure de fibre et la conception de l'isolateur optique :

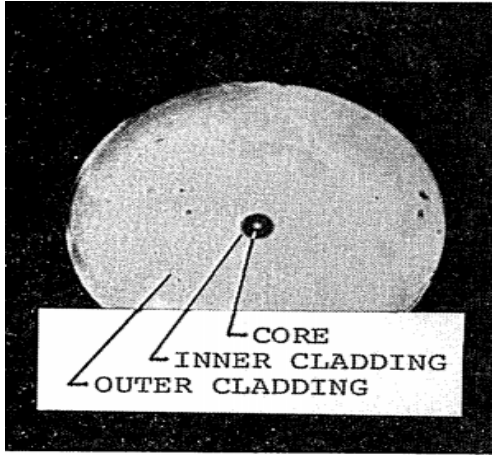


FIGURE 2.6 – Structure de fibre monomode à base de FR-5 [8]

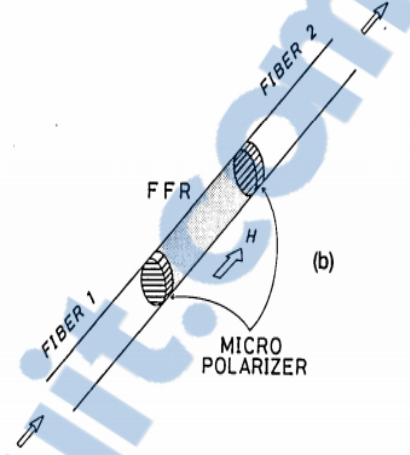


FIGURE 2.7 – Isolateur optique tout fibre à 633 nm [8]

Le travail sur la composition de verre continue pour avoir un effet magnéto-optique plus important, autrement dit une grande constante de Verdet. Un verre fortement dopé en terbium est utilisé pour concevoir une fibre multimodale à base de silice [45], la manipulation de ce type de verre (54 wt%)de Tb_2O_3 était difficile de sorte que la fibre soit fabriquée avec la technique de fusion de poudre dans un tube de silice. Elle est de $2.4\mu m$ de diamètre de cœur et $125\mu m$ de diamètre de gaine avec une ouverture numérique de $ON = 0.35$, ce qui la rend monomode dans les fenêtres de transmission des télécommunications. La constante de Verdet atteinte est égale à -20 rad/T-m à $\lambda = 1.06\mu m$.

Un autre isolateur à fibre est présenté par L. Sun et al [9], une fibre monomode à base de phosphate dopée terbium (25 wt%) est fabriquée chez AdValue Photonics de diamètre de cœur $4.5\mu m$, d'une ouverture numérique $ON = 0.14$ et une constante de Verdet de l'ordre de $V = -6.2 \text{ rad/T-m}$ à $\lambda = 1.053\mu m$. Cette fibre est placée dans un champ magnétique créé par un aimant permanent et fusionnée à une fibre qui maintient la polarisation afin d'être intégrée dans une chaîne de transmission. La figure suivante présente la configuration utilisée pour mesurer la rotation de Faraday.

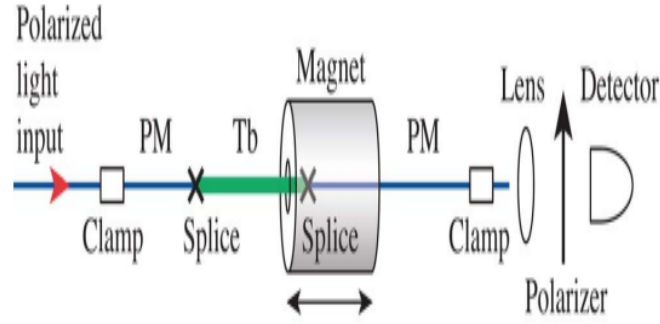


FIGURE 2.8 – Configuration d'un rotateur Faraday avec une fibre phosphate dopée au terbium [9]

Le même groupe de recherche a travaillé pour améliorer le rendement magnéto-optique de la fibre. Pour cela, une nouvelle fibre a été fabriquée à base de alumino-boro silicate dopée avec une forte concentration de terbium (56 wt%)[10]. Le même principe a été utilisé pour mesurer la rotation de polarisation mais avec une fibre polarisante à $1.064 \mu m$ (figure 2.9). Cette fibre est caractérisée par une constante de Verdet égale à -24.5 rad/T-m à $\lambda = 1.053 \mu m$.

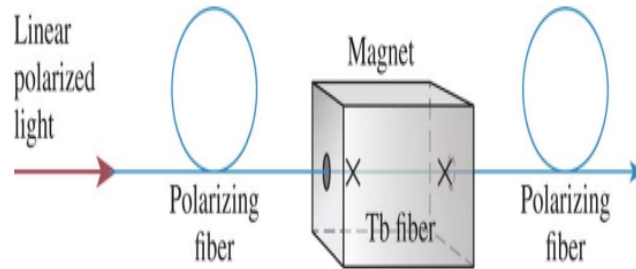


FIGURE 2.9 – Configuration d'un rotateur Faraday avec une fibre Alumino-boro-Silice dopée à 56 wt% terbium [10]

Étant donné que l'augmentation du concentration de l'élément responsable de l'effet magnéto-optique augmente l'effet de Faraday [50], une autre démonstration d'un isolateur tout fibre est faite à base d'une fibre alumino-boro silicate dopée avec un 65 wt% de terbium. En utilisant deux portions de fibres standards fusionnées à la fibre développée, la constante de Verdet de l'ensemble atteint une valeur permettant une rotation de 45° de la polarisation du faisceau lumineux [11].

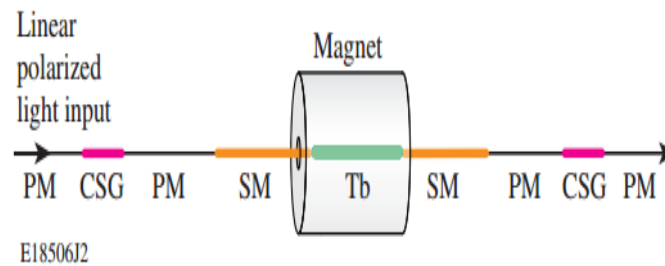


FIGURE 2.10 – Configuration d'un rotateur de Faraday avec une fibre d'alumino-boro-silice dopée à 65 wt% en terbium [11]



Chapitre 3

Méthodologie de fabrication d'un composant tout fibre

3.1 Introduction

La fabrication d'un composant optique tout fibre passe par différentes étapes : Choix de la composition vitreuse, détermination des propriétés thermiques et optiques, choix de la technique de production des préformes et production de la fibre.

3.2 Choix de la matrice vitreuse

Cette étape consiste à choisir la composition de la matrice qui nous permet de fabriquer une fibre magnéto-optique. Pour cela, beaucoup de recherches ont déjà parties sur des études sur des matériaux aussi bien diamagnétiques que paramagnétiques. Citons le travail du groupe de Schmidt [28] qui a présenté une comparaison entre les différents types de verre sur les propriétés magnéto-optiques. Ce groupe a montré que les verres d'oxyde dopés en Terbium (Tb) ont la constante de Verdet la plus grande dans les grandes longueurs d'onde. D'autres études ont démontré le comportement de ces oxydes en utilisant différentes concentrations de dopants [51].

La technique de synthèse des échantillons vitreux utilisée dans ce projet consiste à déterminer la composition vitreuse, choisir les composants de départ sous leur forme solide et ramener à la fusion pour une température bien déterminée. Ensuite, il faut refroidir le liquide à une

température au dessous de la température de transition vitreuse afin d'obtenir un verre. Tous les verres présentés dans ce projet sont formés de cette manière. Les détails de la méthode sera présentés comme suit :

3.2.1 Préparation des produits de départ

Les matières premières utilisés dans les échantillons préparés sont d'une grande pureté. Certains sont préparés au laboratoire pour obtenir le composé d'oxyde voulu. C'est le cas par exemple du Terbium qui est utilisé sous forme de Tb_2O_3 dans les verres d'oxydes de silice et sous forme de TbF_3 pour les verres à base de fluorure de phosphates.

3.2.2 Synthèse de verre

Les poudres sont ensuite bien mélangées et versées dans un creuset en platine pour être ensuite placées dans un four de synthèse à une température assez élevée entre 1100°C et 1520°C. Le liquide obtenu est ensuite soigneusement versé dans un moule bien poli chauffé à une température proche de la température de transition vitreuse pour le recuit du verre. Les échantillons obtenus sont de couleur différente selon la concentration du dopage d'ions Tb^{3+} .

3.2.3 Le recuit du verre

Le recuit est le refroidissement contrôlé des échantillons de verre sous forme liquide. Cette étape est considérée indispensable pour tous les produits vitreux. Il s'agit de mettre le verre dans un four à une température initiale inférieure à la Tg pour assurer son refroidissement progressif afin d'éviter la création de tensions favorisant la fracture de l'échantillon. Il est basé sur la connaissance de la température de l'état vitreux et la viscosité du verre à cette température. Il comporte trois phases :

- La température de verre est bien suffisante pour qu'il ne soit pas déformé mais il conserve sa viscosité. Les contraintes sont par la suite disparues.
- La température est abaissée à une température intermédiaire pour éviter la formation de nouvelles contraintes.
- Le refroidissement progressif jusqu'à la température ambiante.

3.3 Caractérisations thermique et optique des verres

Selon l'application visée, on se base sur les propriétés des matériaux pour choisir le type de verre adéquat pour la fibre magnéto-optique. Pour cela, on liste les différentes caractéristiques d'un verre afin de les exploiter dans notre travail.

Cette partie présente essentiellement la description des techniques adoptées pour caractériser les systèmes vitreux. On commence par la caractérisation thermique *DSC*, ensuite la caractérisation optique : transmission UV-visible et infrarouge et enfin l'indice de réfraction.

3.3.1 Analyse calorimétrique différentielle à balayage DSC

Présentation

L'analyse thermique consiste en une série de techniques pour l'étude des propriétés thermiques des matériaux. Elle a été mise en point en 1887 par Henry Le Chatelier [52] pour l'étude de l'argile. Les études comparatives des effets thermiques ont apporté des informations importantes aussi bien qualitatives que quantitatives.

Cette analyse permet de tracer le comportement du matériau en fonction de la température. Cela permet de déterminer les températures caractéristiques auxquelles le composé change de réaction vis-à-vis la variation de la température. En effet, les transformations chimiques ou physiques du matériau sont généralement accompagnées d'un dégagement ou d'une absorption de chaleur. Il s'agit d'un phénomène exothermique ou endothermique. L'analyse thermique permet donc d'enregistrer ces flux de chaleur de l'échantillon en augmentant la température.

L'analyse calorimétrique différentielle notée souvent : *DSC* nous a permis de tracer la courbe d'échange thermique entre l'échantillon et son environnement en fonction de la température. En conséquence, on détermine la température de transition vitreuse, la température de fusion et la température de cristallisation. En effet, le verre est placé dans un creuset de platine, qui est mis en contact par les thermocouples dans la cellule de l'appareil avec un autre creuset de platine de référence (vide)(Figure :3.1).

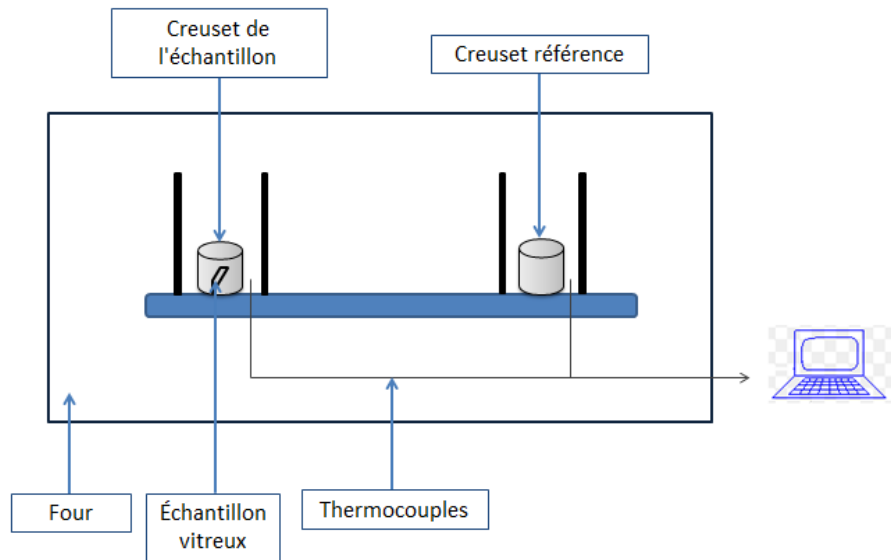


FIGURE 3.1 – Schéma d'une cellule DSC

Les deux creusets sont chauffés suivant un profil identique avec une vitesse de chauffage régulière sous atmosphère contrôlée. Lors d'une transformation, une quantité de chaleur sera échangée entre l'échantillon et le système de compensation afin de maintenir les deux creusets à la même température. Cet écart de chaleur qui correspond à l'enthalpie de la transformation sera calculé et enregistré. La nature du flux thermique définit la transformation soit endothermique ou exothermique.

Principe expérimental de mesure

L'échantillon vitreux est placé dans le creuset avec un autre creuset de référence dans la cellule de *DSC*. Ils sont chauffés avec une vitesse régulière de $10^{\circ}\text{C}/\text{mn}$ jusqu'à une température assez élevée. Le système enregistre les flux de chaleur absorbés ou dégagés par l'échantillon.

Au début de l'analyse, l'appareil montre un flux thermique régulier entre l'échantillon et la référence ; les deux absorbent la chaleur d'une manière continue. Le thermogramme présente la ligne de base. À une température précise T_g , on remarque un changement de comportement d'échange thermique entre l'échantillon et la référence. Ce changement se manifeste par une déviation de la ligne de base : C'est la transition vitreuse qui correspond au passage de la capacité calorifique de l'état solide à celle de l'état liquide. À cette température, la viscosité qui était infinie devient de l'ordre de 10^{13} poise et elle diminue progressivement avec l'augmentation de la température. Lorsque la viscosité devient faible, les atomes ont tendance à

créer un réseau ordonné ; c'est la cristallisation. Elle se manifeste par une transformation exothermique d'où le pic au niveau de la courbe. Dans cet état, l'échantillon perd ses propriétés viscoplastiques et sa transparence. Cette étape est marquée par deux températures T_x pour le début de cristallisation et T_p est le pic de la transformation. Quand la température continue à augmenter, le verre commence à fondre. On marque ainsi le pic endothermique à la température T_f qui correspond à la fusion.

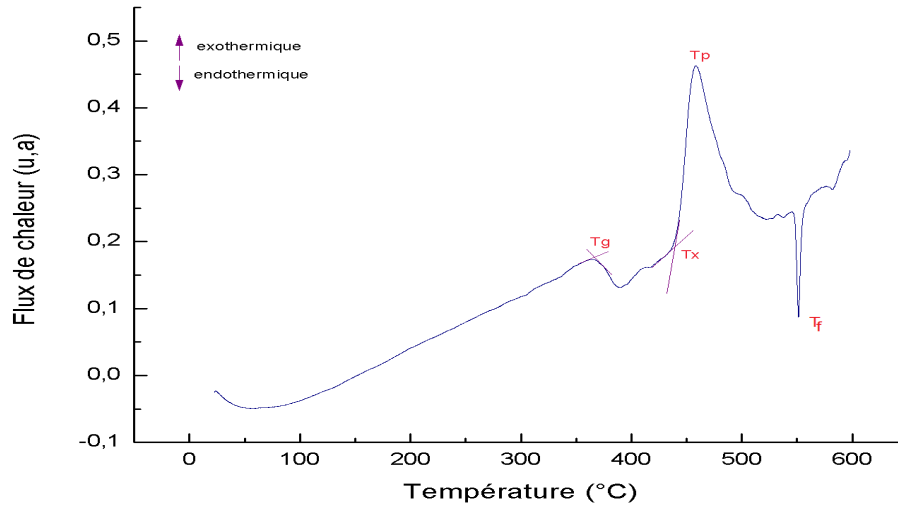


FIGURE 3.2 – Courbe de DSC du verre 50NaPO_3 , 15TbF_3 , 10CaF_2 , 10BaF_2 , 15AlF_3

Les températures caractéristiques T_g , T_x et T_f sont extraites de l'intersection entre la ligne de base et la tangente à la courbe (figure 3.2).

On utilise ces températures afin d'avoir une idée sur la stabilité de verre. Autrement dit, on étudie l'aptitude de verre à être chauffé au dessus de la température de transition vitreuse sans se cristalliser. Pour cela, plusieurs critères empiriques peuvent être déduits de l'analyse thermique :

- Critère de Hurby (H_r) permet de quantifier la stabilité de l'état vitreux par rapport à l'état cristalin de verre. Il est calculé par la formule suivante [53] :

$$H_r = \frac{T_x - T_g}{T_f - T_x} \quad (3.1)$$

Plus H_r est élevé plus le verre est stable. Cependant, la T_g des verres utilisés dans ce projet est assez élevée de sorte qu'on ne peut pas atteindre la température de fusion même parfois celle de cristallisation. On utilise donc d'autres critères.

- Le facteur de stabilité S introduit par Saad et Poulain [54] permet de quantifier la différence de température entre le début de formation de verre jusqu'au pic de cristallisation. Il est calculé par la formule :

$$S = \frac{(T_x - T_g)(T_p - T_x)}{T_g} \quad (3.2)$$

Ce critère peut être simplifié par

$$\Delta T = T_x - T_g \quad (3.3)$$

Un verre qui présente une ΔT supérieure à 100°C peut être considéré stable vis à vis la cristallisation. On peut donc travailler sur ce type de verre afin de concevoir une fibre optique. Alors il faut que cette valeur soit grande pour assurer une stabilité pendant l'étirement.

Les températures caractéristiques du verre peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs :

- ★ L'homogénéisation du liquide
- ★ La vitesse de refroidissement
- ★ La température de synthèse
- ★ La composition de l'échantillon

3.3.2 Transmission optique

La transmission optique ou la transparence est l'une des propriétés de grande importance dans la fabrication des composants optiques. La zone de transparence du verre est délimitée par la frontière de la bande interdite dans les courtes longueurs d'onde et par la frontière multiphononique pour les grandes longueurs d'onde comme le montre la figure 3.3.

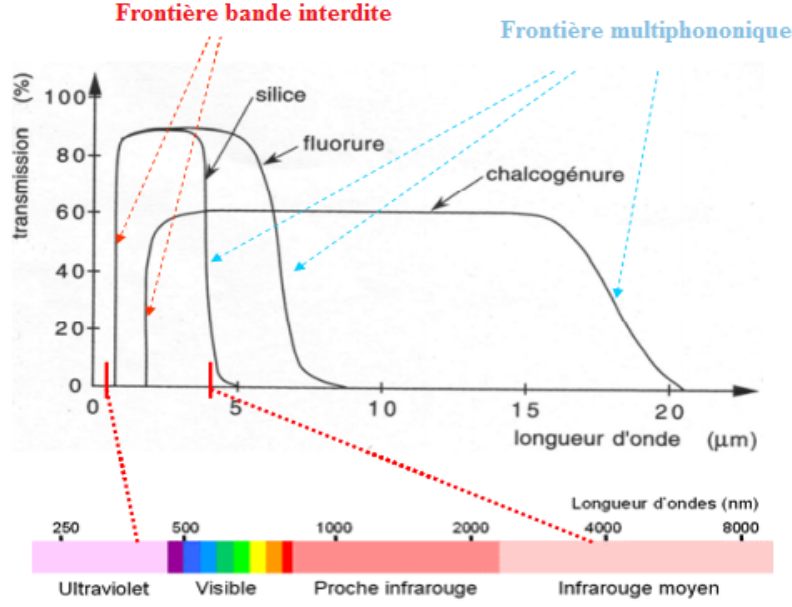


FIGURE 3.3 – Spectre de transmission pour différentes familles de verre : oxydes, fluorures et chalcogénures[12]

La transmission optique est une quantité physique définie par la loi de Beer Lambert :

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (3.4)$$

où I_0 est l'intensité de lumière incidente, α est le coefficient d'absorption du verre et x est l'épaisseur de l'échantillon. α est liée à l'indice d'absorption ou coefficient d'extinction du matériau κ qui est une fonction de la longueur d'onde par la relation

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} \kappa(\lambda) \quad (3.5)$$

On peut déterminer la longueur d'onde de bandgap si le coefficient d'absorption est égal 10cm^{-1} par la formule

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}\right) \quad (3.6)$$

D'après la figure 3.3, même à la zone de transparence des verres, on remarque que la transmission n'atteint pas le 100%. La raison de cette diminution provient des pertes optiques dues aux réflexions sur les faces de l'échantillon. Alors, l'expression de l'intensité lumineuse s'exprime par :

$$I = I_0(1 - 2R) \exp(-\alpha x) \quad (3.7)$$

avec $R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}$, n et κ sont respectivement les parties réelle et imaginaire de l'indice de réfraction.

La deuxième limite du spectre d'absorption correspond à l'absorption multiphononique. Cette coupure est dues aux vibrations des liaisons chimiques ou de leurs harmoniques. La longueur d'onde d'absorption d'une liaison est exprimée par :

$$\lambda = 2\pi c \sqrt{\frac{\mu}{k}} \quad (3.8)$$

avec c est la vitesse de la lumière dans le vide, μ est la masse réduite du système qui peut être calculée dans le cas diatomique (masses m_1 et m_2) par $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ et k est la constante de force de la liaison.

Ainsi, les atomes ayant des masses molaires plus grandes donnent des verres transparents dans l'infrarouge [12]. Entre les deux limites de spectre, on observe parfois des bandes d'absorption plus ou moins étroites dans le domaine de visible du spectre ; cela identifie les verres contenant des terres rares dans leurs compositions, ceux qui les rendent colorés.

L'étude du spectre de transmission des verres nous permet d'avoir une idée sur la plage de transmission de la fibre optique qu'on désire fabriquer à la base des verres synthétisés dans une première partie de ce projet. La coloration des échantillons permet de réduire la fenêtre de transmission, cela est dû aux concentrations des terres rares (exemple : terbium) dans chaque composition.

3.3.3 L'indice de réfraction linéaire

Définition

Lorsque la lumière passe à travers un échantillon vitreux, elle change de direction de propagation. L'indice de réfraction est défini comme la variable qui caractérise la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu précis (le verre). Il est défini par le rapport entre la vitesse de propagation dans le vide et celle dans le milieu étudié.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.9)$$

Étant donné que l'onde lumineuse est une onde électromagnétique, la célérité dans le vide est reliée aux propriétés électromagnétiques du vide ($\epsilon_0\mu_0c^2 = 1$), l'indice est donc lié aux permittivité ϵ_r et perméabilité μ_r du matériau. La vitesse de la lumière dépend de la longueur d'onde dans n'importe quel milieu autre que le vide. Cette dépendance est appelée dispersion. Dans le verre, en présence d'une onde lumineuse, les dipôles créés par les couples noyau/électron et anion/cation se comportent comme des oscillateurs qui créent un champ électrique induit de sens opposé [52]. Chacun de ces dipôles est subit à la fois l'effet du champ électrique macroscopique de l'onde lumineuse et celui du champ créé par les dipôles voisins. La concentration et la polarisabilité de ces dipôles ralentissent la propagation de l'onde lumineuse, dans ce cas, l'indice de réfraction est plus grand.

Comme on a déjà montré dans la partie de transmission optique (eq.(3.7)), la réflexion du verre est une fonction de l'indice de réfraction. Ce paramètre est exprimé par :

$$n^* = n - i\kappa \quad (3.10)$$

avec κ est relié au coefficient d'absorption (eq.(3.5)).

L'équation de dispersion d'un milieu est donnée par la formule de Sellmeier qui marque la dépendance en longueur d'onde de l'indice de réfraction [55].

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (3.11)$$

où $B_{1,2,3}$ et $C_{1,2,3}$ sont les coefficients de Sellmeier calculés expérimentalement et qui sont propres à un matériau donné. L'indice de réfraction diminue avec la longueur d'onde dans le visible et l'infrarouge. Il augmente avec la masse molaire des composés qui constituent le verre. Plus la densité électronique des éléments présents dans le milieu est importante, plus n est grand. L'indice dépend ainsi de l'aptitude du matériau à se polariser. L'indice des verres ordinaires à base de silicium est donc plus faible que celui des verres de silice dopés aux terres rares comme le terbium.

Principe expérimental de mesure

Il existe plusieurs techniques de mesure de l'indice de réfraction du verre à partir d'un échantillon de quelques millimètres d'épaisseur ; on peut déterminer n avec une bonne précision selon la technique :

- Par ellipsométrie VASE (Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry)
- Par la technique de réfractométrie par couplage de prisme
- Spectrométrie à partir du spectre de transmission et de réflexion

À partir de la formule de Fresnel (eq.(3.12)) qui relie les pertes de réflexion et la transmission :

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \frac{1-T_0}{1+T_0} \quad (3.12)$$

avec T_0 est la transmission maximale du verre. On peut déterminer n si on mesure la transmission et la réflexion à une longueur d'onde donnée. Cette méthode reste moins précise vu que les pertes de diffusion ne peuvent pas être négligées [12].

Pour les mesures effectuées dans ce projet, on a utilisé la technique de réflectométrie par couplage de prisme (Metricon) ; elle consiste à coupler la lumière issue d'un laser traversant un prisme d'indice de réfraction supérieur à celui qu'on veut mesurer. Le faisceau incident arrive à la surface du prisme tournant avec un angle incident θ variable et est réfracté à l'intérieur de celui-ci. Le rayon réfracté suit son parcours jusqu'à l'interface prisme/verre où il sera totalement réfléchi et ressort de la face arrière du prisme où il sera collecté par un photo-détecteur jusqu'à que l'angle d'incidence atteigne la valeur de l'angle critique θ_c . Cette valeur peut être déterminée sur la courbe représentant l'intensité lumineuse enregistrée par

le photo-détecteur en fonction de l'angle d'incidence puisque l'intensité du signal chute à la réflexion totale interne. À partir de l'indice de réfraction du prisme n_p , on peut calculer l'indice de réfraction n de l'échantillon à l'aide de la relation suivante :

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n}{n_p}\right) \quad (3.13)$$

L'indice de réfraction du verre est une propriété qui dépend de plusieurs conditions telles que la composition initiale, la température et l'histoire antérieure du verre c'est-à-dire le temps de recuit ou la vitesse de refroidissement.

3.4 Propriétés magnéto-optiques

3.4.1 Principe expérimental de mesure

Comme on a montré dans le deuxième chapitre, le principe de l'effet Faraday est lié à la rotation du plan de polarisation de la lumière en passant par un champ magnétique de même direction que la propagation de l'onde. Cet angle de rotation est une fonction de la constante de Verdet (eq.(3.13)).

Le montage expérimental pour cette mesure est constitué de différents éléments (figure 3.4)

- Trois sources laser aux longueurs d'onde : 633 nm, 980 nm et 1.55 μm . Ces sources sont utilisées pour injecter à la fois dans l'échantillon et ensuite dans la fibre.
- Deux polariseurs : un avant le rotateur de Faraday et un deuxième après le rotateur pour mesurer la différence d'angle des plans de polarisation.
- Un aimant permanent fixé sur un support pour générer un champ magnétique axial et constant pour une longueur de 3 cm. Le choix de l'aimant est fait suivant une étude sur les caractéristiques physiques et magnétiques qui seront présentées au le prochain paragraphe.
- Un photo-détecteur opérant sur la plage de longueur d'onde entre 400 nm et 1.8 μm
- Un puissance-mètre pour identifier la position de l'axe du deuxième polariseur à travers le maximum d'intensité transmise.

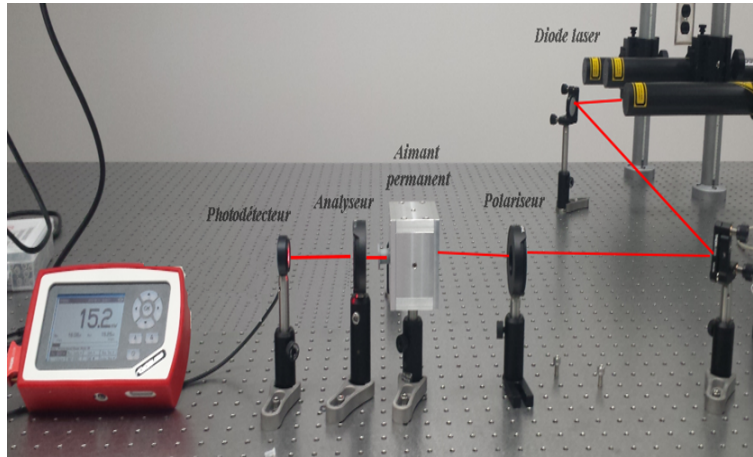


FIGURE 3.4 – Montage de mesure de l'angle de rotation de Faraday

3.4.2 Source du champ magnétique : aimant permanent

Les matériaux composant l'aimant définissent sa puissance et l'effet de la température sur le flux magnétique qu'il peut créer. Il existe quatre classes d'aimants permanents : le ferrite ou céramique, Alnico (aluminium-nickel-cobalt), samarium cobalt (SmCo), néodyme-fer-bore (NdFeB ou NIB). Parmi ces classes, l'aimant néodyme-fer-bore est le plus puissant ; il est fabriqué d'un alliage de néodyme, de fer et de bore pour former $Nd_2Fe_{14}B$ de structure tétragonale [56].

Les aimants NdFeB, sont caractérisés d'un numéro de qualité N : plus le nombre est grand, plus l'aimant est puissant, d'une mesure de densité de flux résiduel magnétique B_r , donné en Tesla, c'est le flux maximum que l'aimant peut produire. B_r mesure l'induction persistante dans un aimant après magnétisation. Un aimant permanent génère un champ magnétique tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de lui.

Il n'existe pas de formule simple pour calculer le champs généré par un aimant quelconque. Toutefois, pour une géométrie dont la répartition de charges est symétrique, on peut trouver des formules simples pour le champ magnétique dans la direction pôle Nord-Sud. Parmi ces géométries, on s'intéresse au cas d'un aimant cylindrique sous forme de tube.

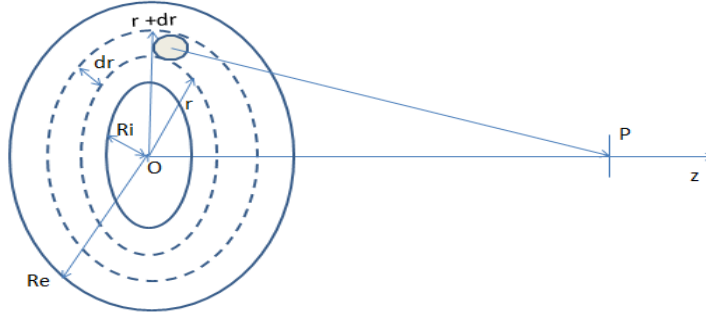


FIGURE 3.5 – Schéma de calcul du champ magnétique en un point P de l'axe [13]

Si on considère la distribution de charge est au niveau de la surface ($z=-d/2$), le potentiel P créé par un élément de surface en tout point de l'axe z (figure 3.5) s'écrit sous la forme :

$$d\psi = \frac{2\pi r B_r dr}{\sqrt{(r^2 + z^2)} 4\pi\mu_0} \quad (3.14)$$

L'intégration de cette quantité sur la surface occupant les charges nous donne l'expression du potentiel créé par la surface totale. Dans le cas d'un cylindre creux, ce potentiel a la forme :

$$\psi(z) = \int_{R_i}^{R_e} d\psi = -\frac{B_r}{2\mu_0} \left(\frac{z}{\sqrt{R_e^2 + z^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_i^2 + z^2}} \right) \quad (3.15)$$

En raison de la symétrie de la distribution de charge, le champs magnétique est contenu dans tout plan contenant z et il ne contient pas de composants perpendiculaires à z. Par conséquence, le champ suit la direction de (oz).

$$H(z) = -\frac{d\psi}{dz} = \frac{B_r}{2\mu_0} (\sqrt{R_e^2 + z^2} - \sqrt{R_i^2 + z^2}) \quad (3.16)$$

La densité de flux magnétique B est calculée par multiplication de H et μ_0

$$B(z) = \mu_0 H(z) = -\frac{B_r}{2} (\sqrt{R_e^2 + z^2} - \sqrt{R_i^2 + z^2}) \quad (3.17)$$

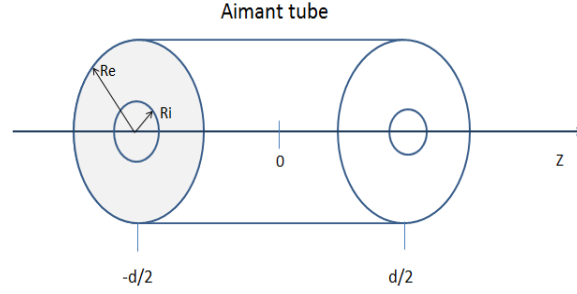


FIGURE 3.6 – Configuration d'un aimant tube

L'expression de B dans ce type d'aimant est donnée par la formule suivante sachant que les deux pôles sont localisés sur les faces $z=-d/2$ et $z= d/2$ ce qui donne un champ magnétique de direction longitudinale :

$$B_z(z) = \frac{B_r}{2} \left(\frac{z + d/2}{\sqrt{R_i^2 + (z + d/2)^2}} - \frac{z + d/2}{\sqrt{R_e^2 + (z + d/2)^2}} - \frac{z - d/2}{\sqrt{R_i^2 + (z - d/2)^2}} + \frac{z - d/2}{\sqrt{R_e^2 + (z - d/2)^2}} \right) \quad (3.18)$$

L'aimant utilisé dans ce projet est de la forme de tube, de type N42 NdFeB formé de 6 aimants de dimension 1" (R_e) x 1/4" (R_i) x 1/4" (d) ce qui nous a donné un aimant de dimensions totales de 1" (R_e) x 1/4" (R_i) x 3/2" (D), avec $B_r = 1.32T$. Cet aimant nous permet de mesurer l'effet magnéto-optique sur la préforme et puis sur la fibre à travers l'angle de rotation de polarisation.

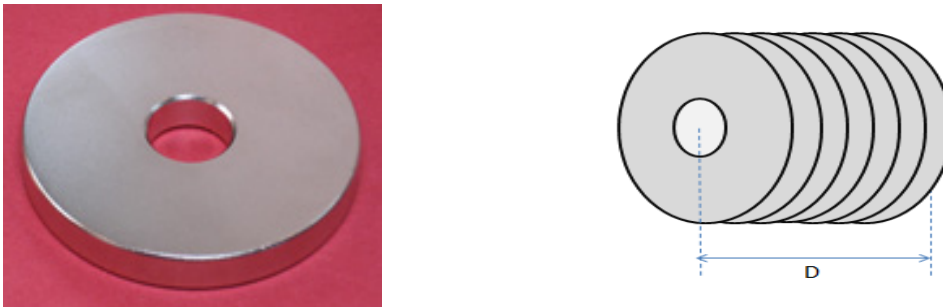


FIGURE 3.7 – Aimant utilisé pour les mesures sur les échantillons vitreux

La variation de la densité du flux magnétique sur une longueur d'aimant $l = 3.75\text{cm}$ est tracée dans la figure 3.8 selon l'équation (3.18).

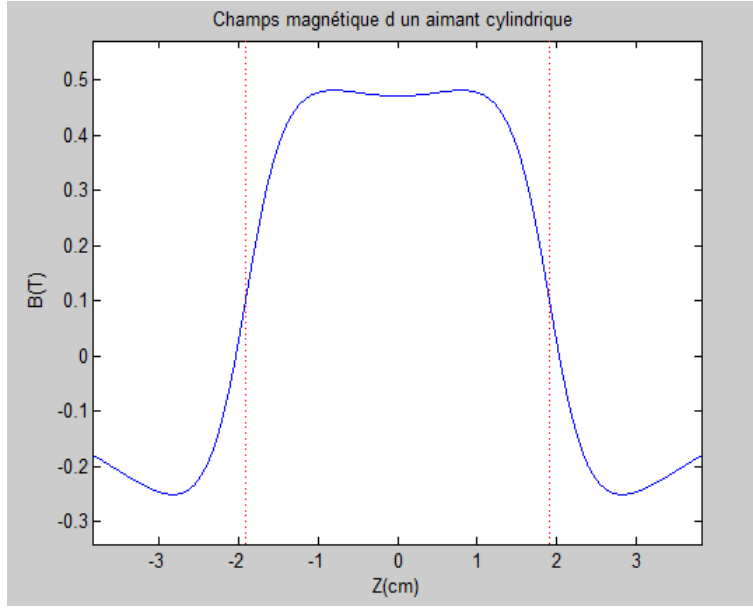


FIGURE 3.8 – Densité de flux magnétique $B(z)$ pour un aimant N42

La rotation de polarisation sous l'effet magnéto-optique est calculée par la formule (eq (3.19)). Cependant, le champ magnétique à l'intérieur d'un aimant permanent n'est pas tout à fait constant, Pour cela, pour le calcul de l'angle, on utilise l'intégrale sur la longueur totale (l) du matériau exposée au champ magnétique :

$$\theta = V \int_{-l/2}^{l/2} B(z) dz \quad (3.19)$$

La plupart des applications Faraday, des composants non réciproques, exigent une rotation de 45° . Le travail donc consiste à changer la longueur de fibre dopée en terres rares exposée au champ magnétique ou bien changer la composition du matériaux formant la fibre optique pour changer la constante de Verdet du verre pour une longueur fixe.

3.5 Fabrication de la fibre optique

3.5.1 Généralités : les techniques de fabrication

La procédure de fabrication d'une fibre contient plusieurs étapes : après avoir déterminé la composition du verre et le caractériser afin de s'assurer la possibilité de fabrication d'une fibre ($T_x - T_g > 100^\circ\text{C}$), on procède à la fabrication de la préforme suivant ces modalités.

- **MCVD (modified chemical vapor deposition, dépôt chimique en phase vapeur modifié)** : cette technique est la plus utilisée pour la fabrication d'une préforme. Elle consiste à utiliser des tubes de silice pure et déposer d'autres produits chimiques afin d'obtenir les caractéristiques voulues de la fibre [57].
- **Rod-in-tube technique** : cette méthode est utilisée dans le cas des fibres dont la composition initiale du verre est différente de la silice ou bien contient une grande concentration de modificateurs de verre.
- **built-in-casting method** : cette technique peut être dérivée de la technique précédente, mais au lieu de fabriquer un seul tube et une tige séparément et le combiner lors de l'étirement, elle consiste à fabriquer le tube puis qui va servir comme moule pour le cœur, on peut répéter d'intégrer l'ensemble dans un autre tube si on veut un grand ratio entre le diamètre du cœur et celui de la gaine [58]
- **Powder-in-tube technique** : cette méthode consiste à faire fondre la poudre mélangée des produits chimiques composant le verre dans un creuset au moment de l'étirement [59]. Elle permet de réduire les problèmes de contamination du creuset. Elle est généralement utilisée avec un capillaire en silice comme gaine [45].

On peut combiner plusieurs techniques pour faire une structure de fibre bien particulière ou à cause des propriétés différents des matériaux utilisés entre le cœur et la gaine. Dans ce travail, on a choisi d'étirer des tiges de verre et ensuite ces tiges sont insérées dans des tubes de SiO_2 pour faire une fibre cœur-gaine à deux modes de propagation par la technique rod-in-tube.

3.5.2 Fabrication de la fibre

Le processus de fabrication d'une fibre optique passe par plusieurs étapes. Étant donné la technique utilisée dans ce projet est celle du *rod-in tube*, il fallait préparer une tige et le tube séparément. La préparation de la tige qui est composée du verre du cœur consiste à synthétiser

le verre dans un creuset de platine à une température choisie selon le type de la matrice : à 1520 °C pour une matrice à base de silice et à 1100 °C pour une matrice à base de fluorure. Après la fusion des matériaux, le verre liquide est versé dans un moule cylindrique de 1 cm de diamètre.

Après le recuit du verre à une température inférieure à la T_g correspondante, la préforme est polie à l'aide d'une machine à polissage conçue spécialement pour les tiges et développée au sein de notre groupe de recherche au COPL (figure 3.9).

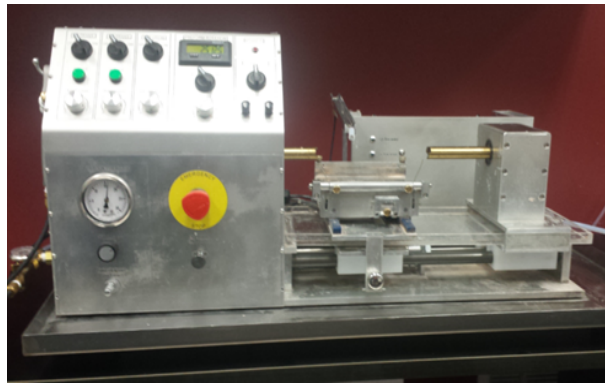


FIGURE 3.9 – Machine du polissage du verre sous forme de tige

Les tests de fibrage sur les verres de silice dopés avec l'oxyde de terbium ont été faits avec une gaine de silice à plusieurs étapes. Des calculs ont été réalisés afin de déterminer le diamètre du cœur du tube de la gaine pour une fibre à seulement deux modes de propagation.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats issus des travaux de recherche sur le développement d'une fibre optique à forte concentration en terbium et à deux modes de propagation pour un rotateur de Faraday à 1.55 μm .

La première partie décrit la détermination de la composition vitreuse. Ensuite une étude est réalisée sur l'influence de dopage sur les propriétés thermiques, optiques et l'effet magnéto-optique sur différentes matrices vitreuses. Enfin, après avoir vérifié la possibilité de fibrage, on montre les résultats de l'étirement de différents types de fibre.

4.2 Détermination de la composition vitreuse

4.2.1 Stratégie du choix de la composition

La réponse magnéto-optique des verres est étudiée dans plusieurs travaux antérieurs afin de comprendre l'effet des différents composants dans la matrice vitreuse sur la rotation de polarisation [42].

Il est clair que le terbium *Tb* est le matériau le plus utilisé dans ces verres. Par ses propriétés paramagnétiques, l'ion terbium est sensible au champs magnétique. Cela est supporté par le fait que le cristal *Terbium Gallium Garnet* TGG présente la meilleure constante de Verdet dans le visible jusqu'à présent [48]. Par conséquence, trouver un verre à forte constante de Verdet,

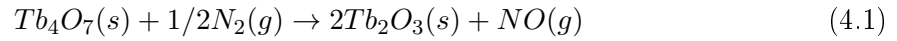
qui peut être fibré pour transmettre la lumière dans l'infrarouge et agir comme rotateur de Faraday était le principal objectif des chercheurs.

Étant donné que la concentration du terbium augmente l'effet magnéto-optique, la stratégie de développement d'un verre était de choisir la bonne matrice qui nous permet de solubiliser une grande quantité d'ions de terbium Tb^{3+} .

4.2.2 Préparation du produit de départ

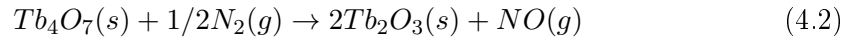
Beaucoup de travaux de recherche ont montré une meilleure figure de mérite du Tb dopé dans un verre d'alumino-silice ou des verres de fluoro-phosphate.

Pour ce faire, le terbium au laboratoire est sous forme de Tb_4O_7 , et par une simple réaction de réduction sous azote pendant 8h à 900°C, on prépare le Tb_2O_3 suivant le schéma réactionnel :

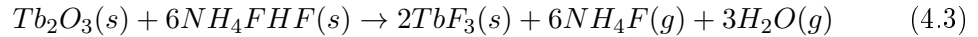


Nous avons aussi procédé à la préparation de TbF_3 des verres magnéto-optiques à base de fluoro-phosphate. Pour ce faire, le Tb_4O_7 additionné avec le NH_4FHF , sous azote à une température de 300 °C pendant une heure puis la température est élevée à 500 °C pendant 15mn. Le composé résultant est le fluorure de terbium TbF_3 qui se produit en deux étapes.

— Décomposition



— Fluoration



4.2.3 Verres à base de silice et aluminium

La composition de base utilisée en premier lieu est celle de $(50 - x)SiO_2 + (35 - x)Al_2O_3 + xTb_2O_3 + 5Li_2O + 5Na_2O + (x + 5)CaF_2$. Comme il est mentionné dans la première partie, l'ajout des alcalins permet de diminuer le risque de cristallisation et diminuer la viscosité. La synthèse de ce verre est faite dans un creuset platine-or à 1520°C par fusion pendant 2 heures.

Le dopage maximal effectué dans cette matrice est de 10% molaire ; cela est dû au fait que la structure cristalline de la molécule de silice est tellement forte qu'on ne peut pas intégrer

assez de cations à l'intérieur des tétraèdres. La Figure 4.1 montre les deux verres synthétisés : le premier avec 5% molaire de Tb_2O_3 , le deuxième est avec 10% de Tb_2O_3 .

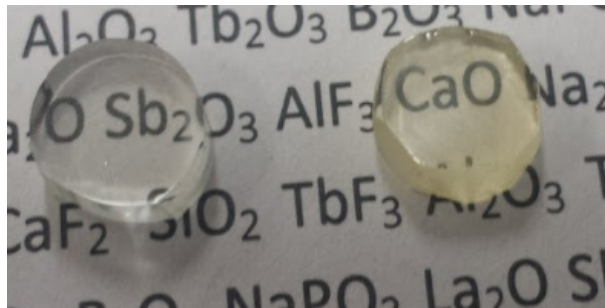


FIGURE 4.1 – Échantillons de verre de silice - aluminium dopé à différentes concentrations de Tb_2O_3 : TSA5 ($x=5$) et TSA10 ($x=10$)

4.2.4 Verres à base de silice - bore - aluminium

Une autre matrice vitreuse a été explorée afin d'assurer un dopage important en ions Tb^{3+} . Comme elle était la base de la fibre magnéto-optique utilisée dans [10] et [11], cette matrice $SiO_2 + Al_2O_3 + B_2O_3 + Tb_2O_3$ était plus prometteuse pour atteindre une concentration molaire de 30% de Tb_2O_3 dans un verre d'oxyde. L'incorporation des cations de Tb dans la matrice est effectuée à l'aide des ions de bore permettant une grande solubilité d'ions Tb.

Afin d'étudier l'effet de la concentration sur la constante de Verdet, une série de verres de différentes concentrations de Tb_2O_3 est synthétisée dans le cadre de ce projet. Six échantillons de différentes compositions de 5, 10, 15, 20, 25 et 30% molaire sont présentés respectivement à la figure 4.2.

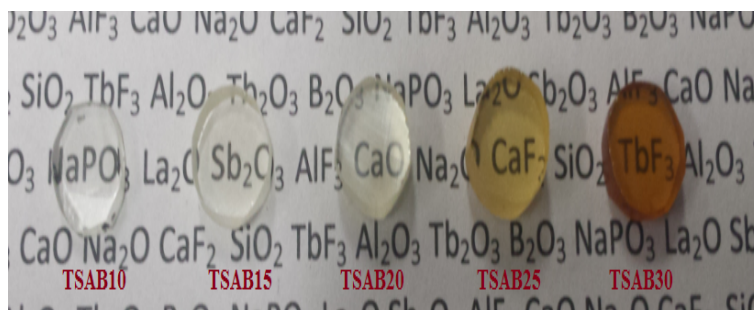


FIGURE 4.2 – Échantillons de verre de silice -aluminium et bore dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3 : TSAB10, TSAB15, TSAB20, TSAB25 et TSAB30



TABLE 4.1 – Différentes compositions de verres silice-aluminium-bore dopés terbium

	Tb_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3
TSAB10	10	38	24	28
TSAB15	15	36	23	26
TSAB20	20	34	22	24
TSAB25	25	32	21	22
TSAB30	30	30	20	20

4.2.5 Verres à base de silice - aluminium -antimoine

La quatrième matrice étudiée en terme d'effet magnéto-optique est à base de $(79-x-2y)SiO_2 + (21+y)Al_2O_3 + ySb_2O_3 + xTb_2O_3$. A partir de cette composition, une fibre est développée [45] pour un isolateur à 1064 nm. La constante de Verdet du verre en question (54 wt.% de Tb_2O_3) est de l'ordre de 20 rad/T.m. Il n'existe pas un diagramme d'état de cette matrice dans la littérature, la composition exacte de l'état vitreux étant difficile à déterminer dans ce cas. Cependant nous avons pu synthétiser un verre avec une concentration de (62 wt.% de Tb_2O_3 environ) ; avec cette composition, on a pu augmenter l'effet magnéto-optique afin de réaliser un isolateur à 1.55 μm .

La synthèse du verre est faite à 1520 °C, l'utilisation de l'antimoine sert à diminuer la viscosité. Les caractéristiques thermiques et optiques seront présentées à la prochaine section.

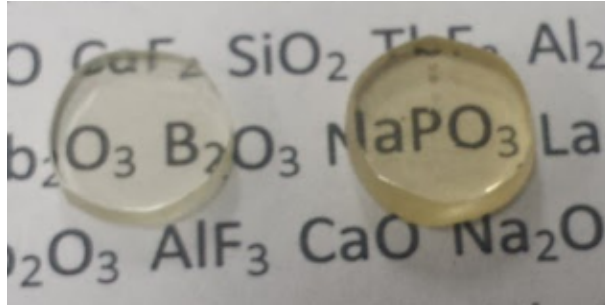


FIGURE 4.3 – Échantillons de verre de silice -aluminium et antimoine dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3 : TSAS20(x=20, y=0.5) et TSAS25(x=25, y=1)

4.2.6 Verres à base de fluoro-phosphate dopé terbium

Afin d'augmenter la concentration de dopage, on a essayé un autre type de matrice : $(80 - x)NaPO_3 + 20BaF_2 + xTbF_3$. Cela nous a permis d'atteindre une concentration de 40% molaire de TbF_3 . Pour déterminer la meilleure composition du verre, on doit examiner le diagramme de phase d'un verre à base de phosphate et fluorure de barium dopé avec le fluorure de terbium exploré par M. Matecki et al en 1995 [14]. La figure 4.4 représente le diagramme de phase d'une telle matrice :

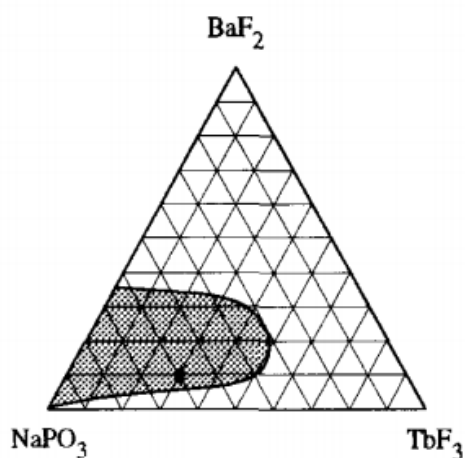


FIGURE 4.4 – Diagramme de phase d’une matrice à base de phosphate de sodium, fluorure du barium et le fluorure de terbium [14]

Il est clair que le domaine vitreux ne permet pas un dopage supérieur à 50%*mol* de fluorure de terbium. Cinq compositions ont été réalisées lors de ce projet avec différentes concentrations de TbF_3 .

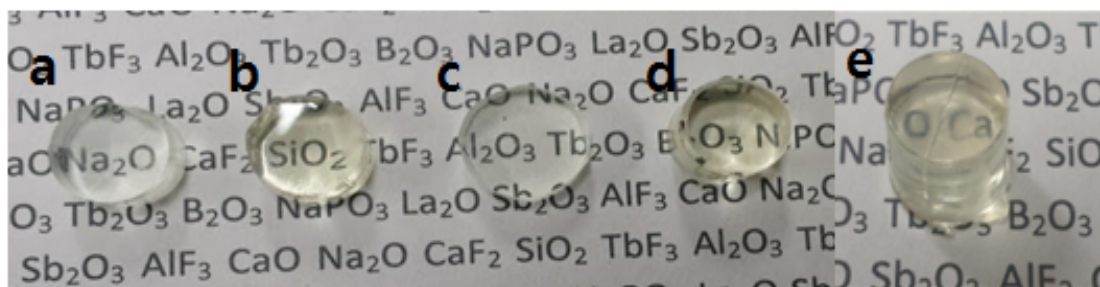


FIGURE 4.5 – Échantillons de verre de fluorure de phosphate dopé avec a) 20%, b) 25%, c) 30%, d) 35% et e) 40% de fluorure de terbium

4.3 Caractérisation des verres

4.3.1 Propriétés thermiques

L'analyse thermique est faite sur les échantillons préparés afin de déterminer les températures caractéristiques de ces verres : température de transition vitreuse (**T_g**), température de cristallisation (**T_x**) et la température de fusion (**T_f**). Cela est indispensable pour planifier une fabrication d'une fibre à partir de ces verres.

— A) **Matrice** : $40SiO_2 + 25Al_2O_3 + 10Tb_2O_3 + 15CaF_2 + 5Na_2O + 5Li_2O$

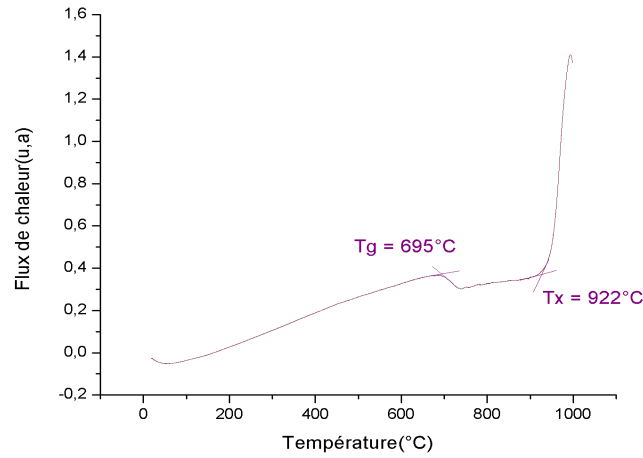


FIGURE 4.6 – Courbe d'analyse thermique du verre à base de silice et aluminium dopé avec 10 % de terbium : TSA10 (x=10)

la différence entre la température de transition vitreuse et celle de cristallisation : $\Delta T = 227^\circ C$. Cela permet de tester l'étirement d'une préforme formée de cette composition.

— B) **Matrice** : $SiO_2 + B_2O_3 + Al_2O_3 + Tb_2O_3$ [tableau4.1]

Cette matrice a déjà été utilisée dans le travail de L. Sun et al [10], et a permis de fabriquer un rotateur de Faraday à $1.064\mu m$ avec un dopage de 56% w.t de dioxyde de terbium. Celui ci permet d'avoir un verre avec une constante de Verdet de l'ordre de -24.5 rad/Tm . L'avantage de cette matrice est la possibilité d'incorporer plus d'ions de terbium dans la matrice de base ; cela est fut réalisé par le même groupe de recherche [11] afin d'augmenter la constante de Verdet à -32 rad/Tm à $1.064\mu m$. La variation de la température de transition vitreuse en fonction de la concentration de l'oxyde du terbium est présentée à la figure suivante.

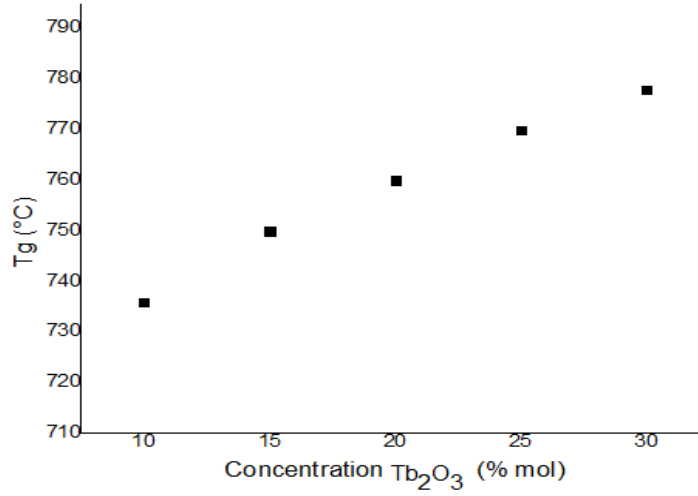


FIGURE 4.7 – Variation de la température de transition vitreuse du verre de composition $SiO_2 + B_2O_3 + Al_2O_3 + Tb_2O_3$ en fonction de la concentration du Tb_2O_3 [tableau 4.1]

Il est clair que l'ajout de la terre rare augmente la température de transition vitreuse. Ces verres ont une température de fusion assez élevée (≥ 1400 °C). Pour s'assurer de la stabilité thermique du verre vis-à-vis de la cristallisation, il est nécessaire de mesurer ΔT qui est de l'ordre de ≈ 112 °C.

— C) **Matrice** : $(79 - x - 2y)SiO_2 + ySb_2O_3 + (21 + y)Al_2O_3 + xTb_2O_3$

L'idée d'essayer cette matrice découle du fait que l'on peut faire plusieurs types de fibres afin de comparer le comportement de ces verres au cours de l'étirement et aussi l'effet magnéto-optique entre le dioxyde de bore et l'oxyde d'antimoine. Elle est déjà utilisée dans un travail avec une concentration massique de 54 % de Tb_2O_3 [45] ; on a réussi à doper la matrice de base avec 25% molaire (62 wt.%) de dioxyde de terbium. La courbes d'analyse thermique est montrée dans la figure suivante.

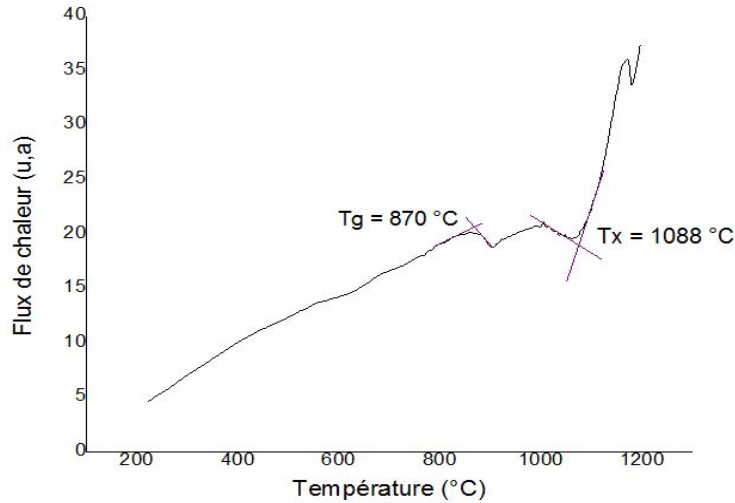


FIGURE 4.8 – Courbe d’analyse thermique du verre à base de silice-antimoine-aluminium dopé avec (x=25%, y=1) molaire d’oxyde de terbium

La température de fusion de ce verre est élevée ($\geq 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$) ; pour cela le pic de cristallisation et la température de fusion n’apparaissent pas sur la courbe. Comme la valeur de $\Delta T \geq 200^{\circ}\text{C}$, on peut donc envisager la fabrication d’une fibre avec une composition dopée de 25% de Tb_2O_3 .

— D) **Matrice** : $(80 - x)NaPO_3 + 20BaF_2 + xTbF_3$

Afin d’augmenter la concentration de dopant, la composition à base de silice exige une température de synthèse élevée. Un autre type de matrice est exploré à base de fluorophosphate. On a réussi à incorporer jusqu’à 40 % de TbF_3 . La synthèse de ce verre est faite à une température faible comparativement à celle de silice (1100 °C) .

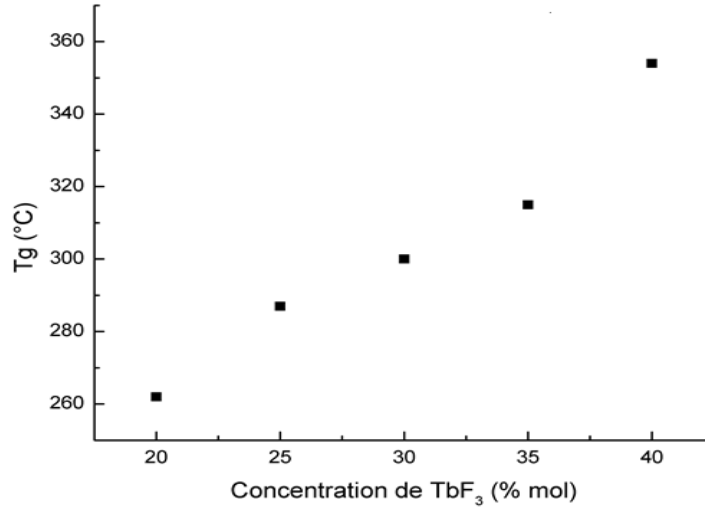


FIGURE 4.9 – Variation de la température de transition vitreuse en fonction de la concentration de TbF_3 : $x=[20,25,30,35,40]$

Ces verres montrent un ΔT relativement faible à 100 °C ; cette instabilité peut causer la cristallisation au cours de l'étirement. Par conséquent, certaines de ces compositions peuvent ne pas mener à la fabrication d'une fibre.

4.3.2 Propriétés optiques

La transmission optique est la propriété mesurée pour s'assurer de la fenêtre de transparence de la matrice vitreuse. Les courbes sont faites sur tous les échantillons synthétisés au cours de ce projet avec un spectrophotomètre Carry 5000. Les échantillons ont une épaisseur de 3mm environ et changent de couleur dépendamment de la concentration de terbium.

— A) **Matrice** : $(50 - x)SiO_2 + (35 - x)Al_2O_3 + xTb_2O_3 + 5Li_2O + 5Na_2O + (x + 5)CaF_2$

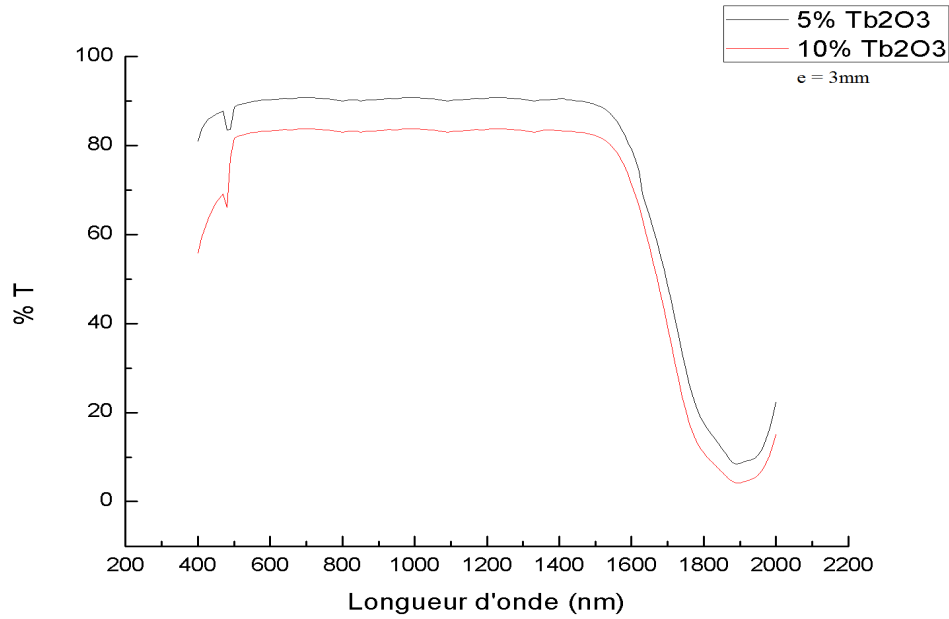


FIGURE 4.10 – Courbes de transmission de verres d'aluminium-silice dopé à 5% mol et 10% mol

Les deux échantillons montrent une couleur transparente. Cela est dû à la nature des verres à base de silice et aluminium et aussi à la faible concentration de terbium dans la matrice de base (5% mol et 10% mol). Au niveau de 480nm [60], on remarque une absorption qui est due à la présence des ions de Tb^{3+} .

— B) **Matrice** : $SiO_2 + B_2O_3 + Al_2O_3 + Tb_2O_3$ (tableau 4.1)

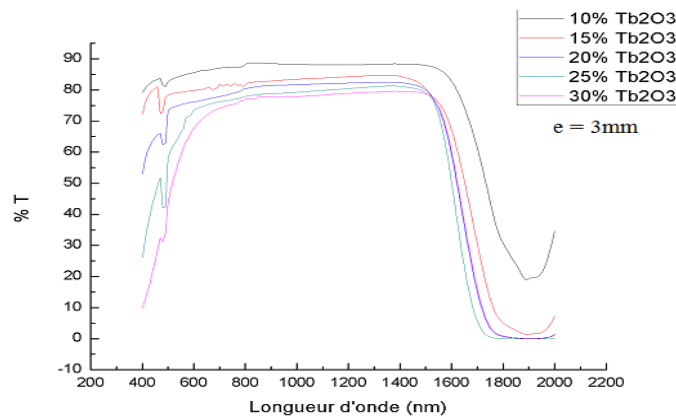


FIGURE 4.11 – Courbe de transmission des verres de silice-aluminium et bore dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3

Les mesures ont été effectuées sur des échantillons ayant 3mm d'épaisseur. Il est clair que l'augmentation de la concentration de terbium dans la matrice diminue la transmission du verre dans le visible et augmente l'absorption à 480 nm. Tous les échantillons présentent une frontière multiphonon vers 1580nm environ ; cela est inférieur à celle d'un verre de silice à cause de la diffusion causée par les ions de terbium.

— C) **Matrice** : $(79 - x - 2y)SiO_2 + (21 + y)Al_2O_3 + ySb_2O_3 + xTb_2O_3$

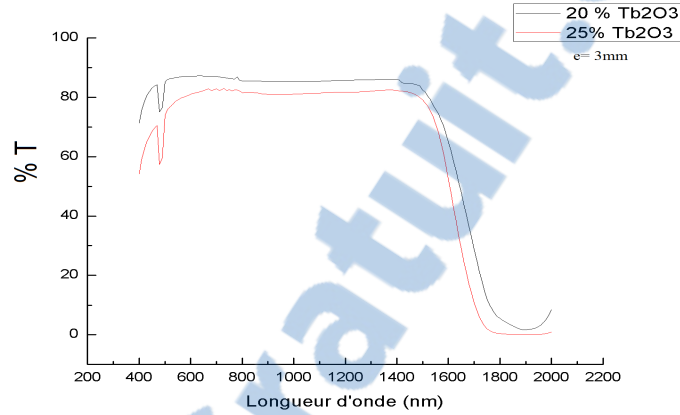


FIGURE 4.12 – Courbe de transmission des verres de silice-aluminium et antimoine dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3

La transmission n'est pas beaucoup changée quand on a remplacé l'oxyde de bore avec celui de l'antimoine pour les deux concentrations (20 et 25 % mol). La forte présence du terbium est bien distinguée par la bande d'absorption dans le visible.

— D) **Matrice** : $(80 - x)NaPO_3 + 20BaF_2 + xTbF_3$

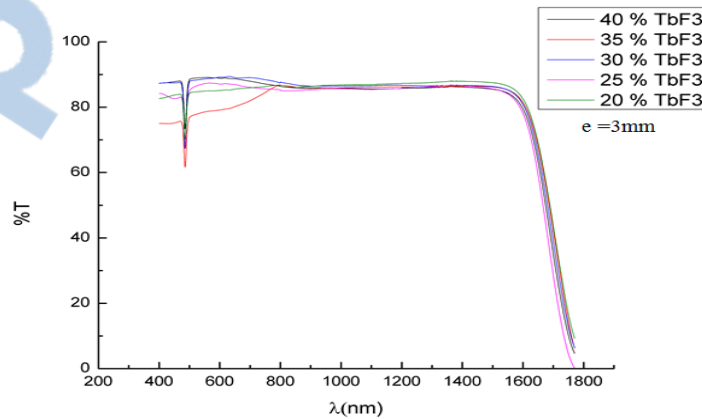


FIGURE 4.13 – Courbe de transmission d'un verre de fluoro-phosphate dopé avec 20, 25, 30, 35, 40% de TbF_3

On a la même allure de courbe que celle à base de silice et aluminium avec une transmission jusqu'à 1600nm. L'ajout des ions Tb^{3+} dans la matrice cause une diminution de la transparence.

Toutes les courbes de transmission montrent une transparence du verre jusqu'à 1.6 μm , avec environ 75% du signal transmis à 1.55 μm . Alors on peut essayer d'avoir une fibre optique à cette longueur d'onde. La différence entre les niveaux de transmission dans la même matrice est un résultat de plusieurs facteurs tels que l'épaisseur de l'échantillon, la façon de préparer les matériaux, l'histoire thermique du verre et aussi la viscosité.

4.3.3 Indice de réfraction

Les courbes d'indice de réfraction pour les échantillons synthétisés au cours de ce projet sont montrées dans la figure 4.14

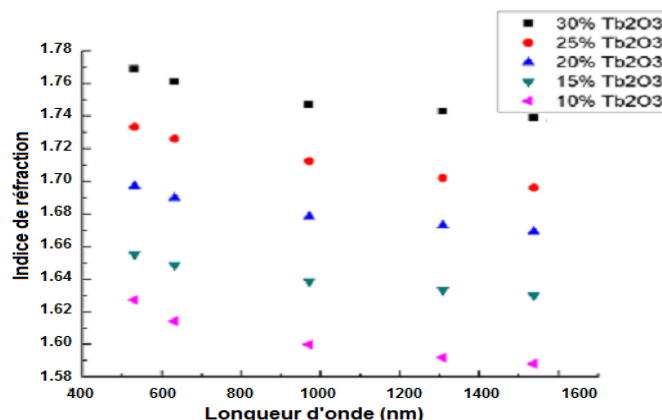


FIGURE 4.14 – Indice de réfraction des verres de silice-aluminium et bore dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3 en fonction de la longueur d'onde

Ces courbes montrent l'effet de l'augmentation de concentration du dopage sur l'indice des verres, cela est attendu puisque le verre change de couleur et de densité [61]. Ce type de matrice possède une variation d'indice entre 0.03 et 0.04 pour chaque longueur d'onde si la concentration de Tb_2O_3 augmente de 5%*molaire*.

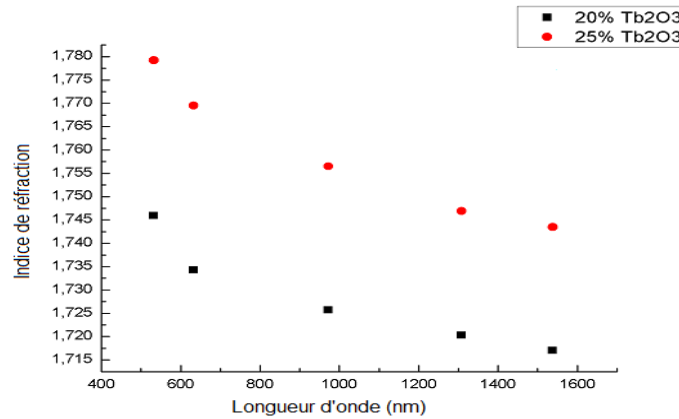


FIGURE 4.15 – Indice de réfraction des verres de silice-Aluminium et Antimoine dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3

La substitution de l'oxyde de bore par l'oxyde de l'antimoine augmente l'indice de réfraction du verre.

Les deux matrices précédentes montrent des indices assez élevés par rapport au verre de silice. Une fibre développée avec un cœur dopé terbium et une gaine de verre de silice sera fortement multi-mode pour les fenêtre de transmissions de télécommunications.

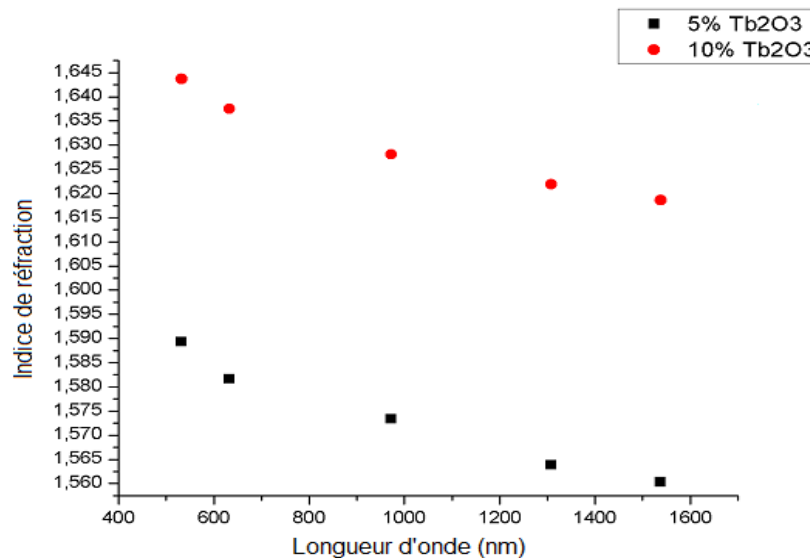


FIGURE 4.16 – Indice de réfraction des verres de silice-aluminium et autres alcalins dopés à différentes concentrations de Tb_2O_3



Dans des verres de fluorophosphate, on observe que l'indice de réfraction de ces verres augmente avec l'augmentation de concentration de dopage. De plus, on peut utiliser ces compositions pour le cœur d'une fibre avec une gaine de silice pure, cela présente moins de difficultés vue la compatibilité chimique et thermique entre les deux matrices (de cœur et de la gaine).

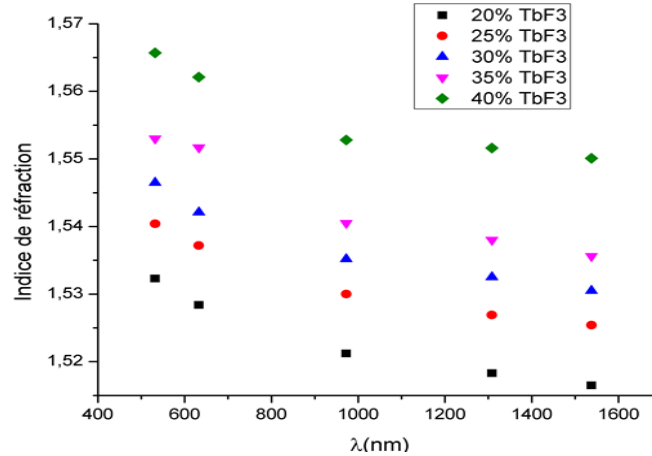


FIGURE 4.17 – Indice de réfraction des verres de fluoro-métaphosphate de sodium dopés à différentes concentrations de TbF_3

Les verres de fluorophosphate dopés avec le terbium fluoré montrent un indice de réfraction faible par rapport à celui des verres de silice dopés d'ions de Tb avec les mêmes proportions : de l'ordre de 1.5 à 1.55 μm .

4.3.4 Propriétés magnéto-optiques des verres étudiés

Constante de Verdet

L'effet Faraday mesuré sur les échantillons fabriqués est démontré par la mesure de la constante de Verdet, autrement dit l'angle de rotation que fait la polarisation du faisceau lumineux en passant à travers un champs magnétique (généré par un aimant) comparativement au cas sans aimant à proximité. Les sources laser utilisées sont les plus puissantes disponibles au laboratoire.

Le principe de mesure de la constante de Verdet est de trouver l'angle de rotation et ensuite, en connaissant l'intensité du champ magnétique exercé sur l'échantillon, on peut trouver la valeur recherchée à partir des équations (2.11) et (2.12). Le tableau 4.2 montre les résultats de mesures sur les différents échantillons de verres.

TABLE 4.2 – Valeurs mesurées de la constante de Verdet des différents échantillons synthétisés

Longueur d'onde Échantillon	V(rad/T-m)		
	633nm	980nm	1542nm
Verres à base de silice et aluminium)			
TSA5	30	13	5.5
TSA10	39	16.5	7
Verres à base de Silice - Bore - Aluminium			
TSAB10	38	16	6.5
TSAB15	45.4	18	8
TSAB20	73.5	21	9
TSAB25	100	29.4	11
TSAB30	108	38	12
Verres à base de Silice - Antimoine - Aluminium			
TSASb20	75	22	9.5
TSASb25	98	28	11
Verres à base fluoro-phosphate dopé terbium			
TNaB20	29	11.3	4.7
TNaB25	32.5	12.9	5.1
TNaB30	42.15	16.8	6.5
TNaB35	47.4	18.43	7.27
TNaB40	60.7	23	9.3

A partir de ces résultats, on vérifie que l'effet magnéto-optique dans les verres augmente avec la concentration de l'oxyde de terbium dans la matrice [50]. Cette augmentation est due à la présence de plus en plus forte des ions de terbium Tb^{3+} paramagnétique.

La constante de Verdet d'un verre d'oxyde ou de fluoro-phosphate dopé avec une terre rare peut être présentée comme suit [30].

$$\frac{1}{V} = \frac{\lambda^2 - \lambda_0^2}{C} \quad (4.4)$$

Autrement dit, la courbe de variation de l'inverse de V est une fonction linéaire du carré de la longueur d'onde. Cette courbe permet d'identifier la valeur de la longueur d'onde caractéristique de l'effet magnéto-optique dans un verre quelconque.

Les différentes courbes des échantillons sont présentées dans les figures qui suivent avec une estimation de la valeur de la longueur d'onde λ_0 .

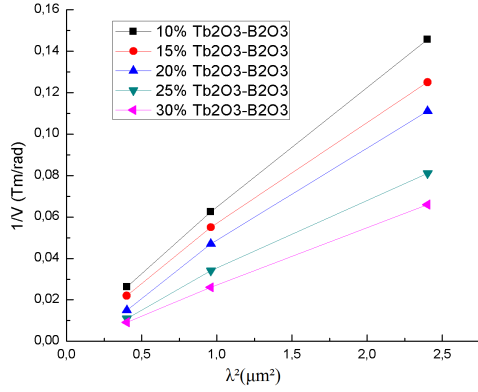


FIGURE 4.18 – Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres borosilicate-aluminium dopés avec différentes concentrations de terbium

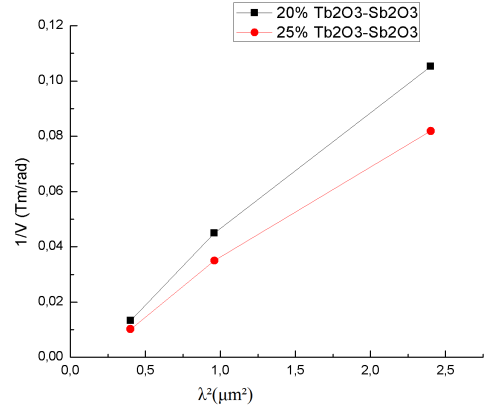


FIGURE 4.19 – Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres antimoine-silice-aluminium dopés avec différentes concentrations de terbium

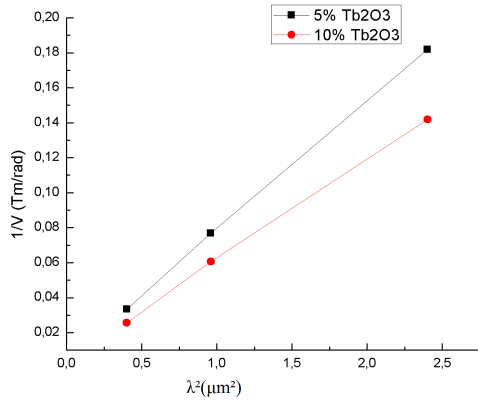


FIGURE 4.20 – Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres aluminium-silice dopés avec différentes concentrations de terbium

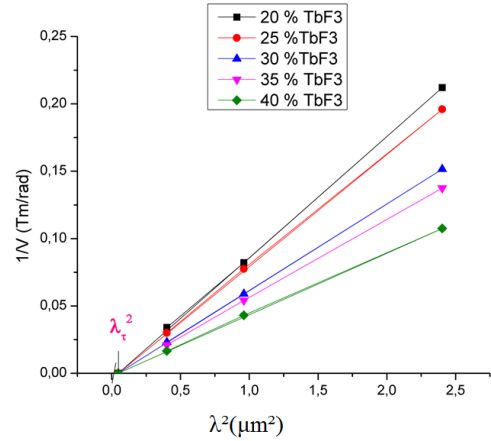


FIGURE 4.21 – Variation de l'inverse de la constante de Verdet des verres fluorure-métaphosphate de sodium dopés avec différentes concentrations de terbium

La longueur d'onde caractéristique de l'effet magnéto-optique est celle qui correspond à la

transition électronique des photons entre les niveaux d'énergies 4f-5d. Le fait d'incorporer plus d'ions de terbium permet la séparation de ces niveaux d'énergies dans Tb^{3+} et par suite augmenter le moment magnétique dans le verre qui donne une grande constante de Verdet. L'interpolation des courbes rapportées ci-dessus permet de calculer cette valeur qui se rapproche des valeurs rapportées dans la littérature : 245 nm – 250nm pour les verres silice-aluminium-bore [36], 240nm – 248nm pour les verres silice-aluminium-antimoine [45] et 215 – 220 pour les verres de fluoro-phosphate[37].

Figure de mérite

La figure de mérite est par définition une grandeur pour caractériser la performance d'un dispositif ou d'un système. Dans le cas d'un verre magnéto-optique, la figure de mérite est donnée par le rapport entre la constante de Verdet et l'absorption à une longueur d'onde précise(éq (4.5)) [28].

$$FoM = \frac{V}{\alpha} \quad (4.5)$$

D'après les résultats précédents, les mesures de la constante de Verdet et les propriétés optiques des verres synthétisés, on peut comparer la performance magnéto-optique entre les verres d'oxydes et des verres à base de fluoro-phosphate fortement dopés en ions de terbium. Les figures ci-dessous montrent l'ordre de grandeur de la FoM pour les verres TSAB et TNaB.

Étant donné la force des liaisons dans un verre d'oxyde, le dopage avec des ions de terre rare peut créer des contraintes dans le verre, ce qui cause la perte du signal optique dans le proche infrarouge. D'après les courbes, les verres de fluorures offrent de meilleures possibilités pour transmettre un signal à des longueurs d'onde supérieures à 1 μ m. Cependant, ces verres ont des propriétés mécaniques faibles en comparaison avec les verres de silice. Dans la prochaine section, on présente les résultats de fibrage faits sur quelques compositions afin de tester la possibilité d'avoir une fibre magnéto-optique.

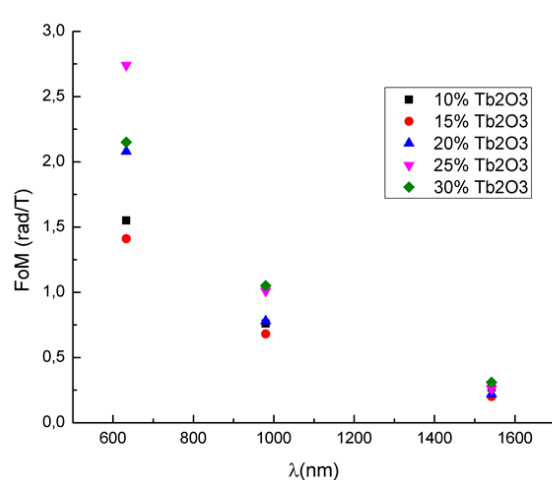


FIGURE 4.22 – Figure de mérite d'un verre aluminium-borosilicate dopé avec différentes concentrations de Tb_2O_3

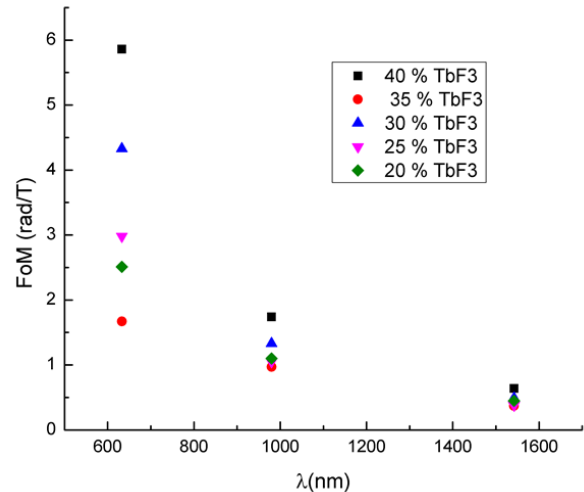


FIGURE 4.23 – Figure de mérite d'un verre fluorure-méta phosphate de sodium dopé avec différentes concentrations de TbF_3

4.4 Fabrication des fibres optiques

La fabrication d'une fibre optique commence par le choix des matériaux du cœur et de la gaine, la fabrication d'une tige pour le cœur et d'un tube pour la gaine et ensuite la procédure d'étiement. Ce dernier nécessite un contrôle élevé de la température et des paramètres de fibrage. Dans cette section, on montre les différents essais de fibres magnéto-optique développées au cours de ce projet.

4.4.1 Fibre mono-indice à base de silice

La fabrication d'une tige consiste à synthétiser le verre dans un creuset de platine à 1520°C et puis on verse le liquide dans un moule cylindrique de 1mm de diamètre et de 10cm de longueur préchauffé à 550°C. La figure suivante présente la tige fabriquée avec le verre TSA10.

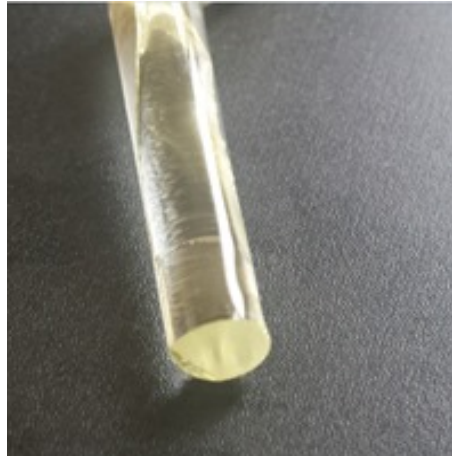


FIGURE 4.24 – Une tige de verre de silice - aluminium dopé avec 10%*mol* de Tb_2O_3 : TSA10

Étant donné que la matrice est à base de silice, le verre est mécaniquement rigide et de viscosité élevée. Donc, la mise en forme d'un barreau ainsi que le polissage sont difficiles. Malgré sa stabilité chimique et thermique, durant le tirage on notera la formation des cristaux (figure 4.25). On peut dire que la solubilité des ions Tb^{3+} est très difficile dans les verres de silice, ceci introduit la nucléation et la cristallisation.



FIGURE 4.25 – Résultat de fibrage d'une tige de verre de silice - aluminium dopé avec 10%*mol* de Tb_2O_3 : TSA10

4.4.2 Fibre optique à base de silice-aluminium et bore

Le test pour cette matrice est fait sur la composition avec un dopage de 30%*mol* de Tb_2O_3 . Le choix de la gaine est un tube de silice standard afin de réaliser une fibre optique à deux

modes de propagation à 1550nm. Étant donné que les indices de réfraction de ces deux types de verres sont mesurés et la fréquence normalisée, qui dépend du diamètre du cœur, doit être comprise entre 2.405 et 3.832 pour guider deux modes, le diamètre du cœur de la fibre doit être de l'ordre de $2\mu\text{m}$.

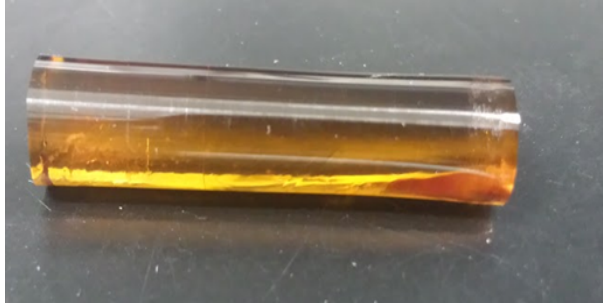


FIGURE 4.26 – Une tige de verre de silice - bore-aluminium dopé avec 30%mol de Tb_2O_3 : TSAB30

Les conditions de l'étirement en une fibre sont difficiles à déterminer pour ce verre à cause de la viscosité élevée et la haute température de la transition vitreuse. Pour réussir à avoir un cœur assez faible, le rapport entre la tige du cœur et le tube de gaine est en relation avec la vitesse de l'étirement. Le résultat du fibrage a donné une fibre avec un cœur de $3\mu\text{m}$ environ.

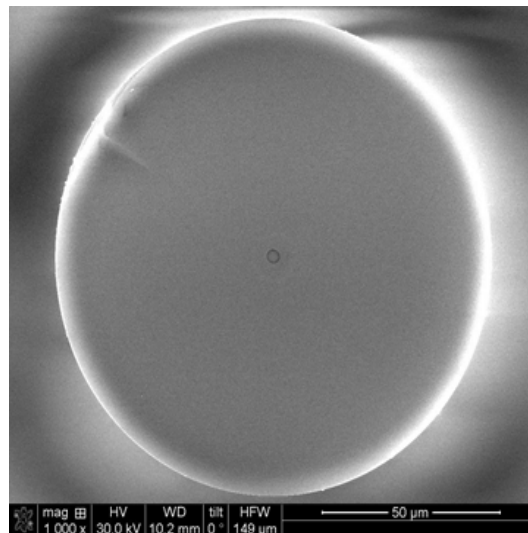


FIGURE 4.27 – Coupe transversale de la fibre avec TSAB30 comme verre du cœur et une gaine de silice

Le microscope électronique à balayage a permis de diagnostiquer l'état de la fibre. Le cœur

semble opaque par la présence des cristaux. Une analyse du centre de la fibre a montré la présence des formes cristallines plus ou moins grandes. Une étude approfondie sera nécessaire pour identifier la nature de la phase cristalline.

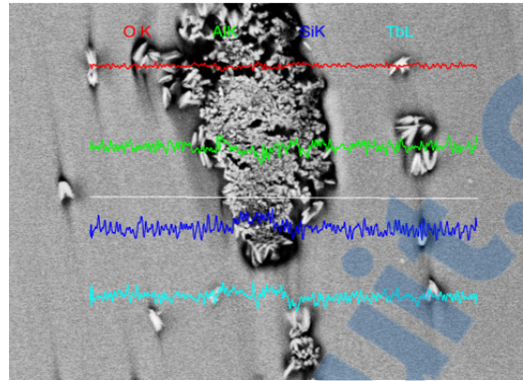


FIGURE 4.28 – Analyse microscopique par rayon X d'un germe dans le cœur de la fibre

4.4.3 Fibre optique à base de silice-aluminium et antimoine

Un essai d'étirement similaire à celui précédent a été fait sur la composition à base de silice-aluminium et antimoine avec 25%mol de Tb_2O_3 . Un tube de silice standard est choisi comme une gaine. Pour faire une fibre à deux modes de propagation et à cause de la différence d'indice de réfraction, le diamètre du cœur doit être assez petit, de l'ordre de 2 μ m. L'étirement est fait avec des vitesses différentes afin de trouver les bonnes conditions. L'état de la fibre résultante est présentée à la figure qui suit.

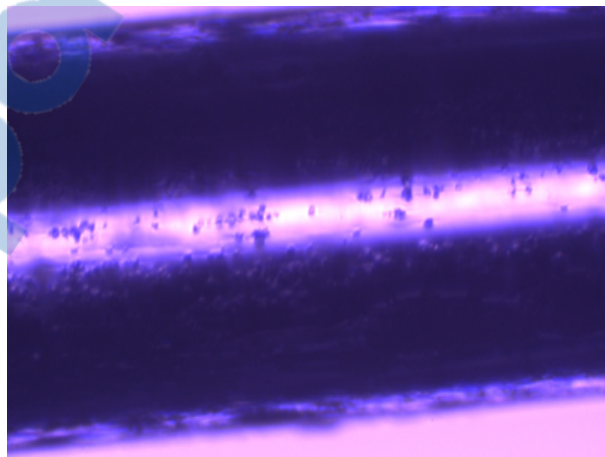


FIGURE 4.29 – Vue longitudinale d'une fibre à cœur de verre TSAS25 : présence de cristaux

La cristallisation affecte principalement le cœur de la fibre, c'est à dire que la composition a

une influence majeure sur ce défaut.

4.4.4 Fibre mono-indice à base de fluoro-phosphate dopé terbium

Un test d'étirement est fait sur plusieurs compositions de verres à base de fluoro-phosphate dopé avec 40, 35 et 30 %*mol* de TbF_3 . Vue l'instabilité thermique de ces compositions durant le fibrage, il était difficile de déterminer les conditions convenables pour avoir une fibre monoindice. La tige est totalement cristallisée durant le chauffage (figure 4.30)

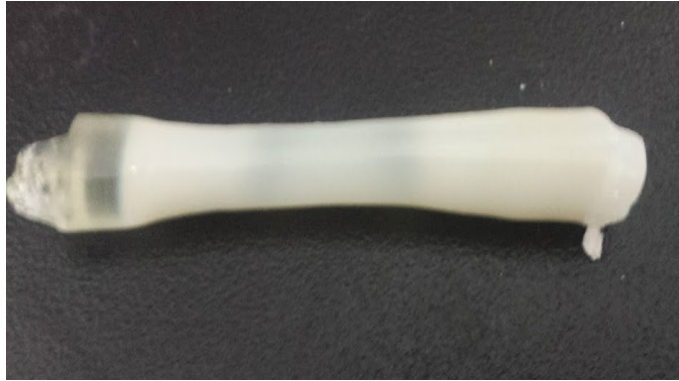


FIGURE 4.30 – Tige d'un verre de 40%mol de TbF_3 après un test d'étirement

Les tests faits sur les autres compositions dopées avec 35% et 30% ont donné des résultats semblables même si les tiges ont une cristallisation plus ou moins faible si on diminue la concentration du dopant. A partir de cela, on peut déduire que les ions Tb^{3+} ont aussi créé des phases cristallines avec les ions de phosphates de sodium ou celle du barium et cela a causé le mauvais déroulement du processus de fibrage.

Le travail sur les différentes matrices vitreuses dopées en terbium a démontré la difficulté de fabriquer une fibre optique. Les verres dopés en terbium ont une bonne réponse magnéto-optique s'ils sont utilisés en forme de verre massique que en état de fibre puisque celle-ci se cristallise rapidement.

Conclusion et perspectives

Une étude exhaustive a été réalisée sur différents systèmes vitreux afin d'obtenir des matrices vitreuses capables de répondre aux exigences des matériaux avec un haut pouvoir rotatoire de Faraday. Pour pouvoir solubiliser une forte concentration d'ions de Tb^{3+} , deux types de matrices vitreuses à base d'oxyde et fluorure ont été explorées. Des techniques de préparation de préformes et leur polissage optique ont été mis au point durant ce projet pour valider la production des fibres optiques sur quelques compositions. Nous avons aussi mis en place un montage expérimental au sein du groupe de recherche pour caractériser l'effet Faraday sur les verres en forme massique avec différentes concentrations de dopant.

La constante de Verdet a été caractérisée dans les différents systèmes vitreux et aussi en fonction des différentes concentrations du dopage à des longueurs d'ondes au delà de 600 nm. La longueur d'onde de transition responsable de l'effet magnéto-optique des ions de terbium est calculée pour les verres d'oxyde comme étant de l'ordre de 245 nm et les verres de fluorure elle serait 217 nm et cette valeur est maintenue pour des différentes concentrations.

Malgré la forte réponse magnéto-optique dans les verres d'oxydes fortement dopés en terbium, ils ne présentent pas une bonne transmission au delà de 1 μm en comparaison des verres de fluorure de phosphate. Cela explique le fait que ces derniers ont une figure de mérite peu élevée. Par conséquent, cette matrice s'avère plus prometteuse pour une fibre magnéto-optique.

Cependant, les deux verres ont des propriétés thermiques et mécaniques assez particulières : température de transition vitreuse de l'ordre de 800°C pour un verre avec 30%mol de Tb_2O_3 et des indices de réfraction de l'ordre de 1.7 à 1.5 μm pour un TSAB30. Cela a rendu la fabrication d'une fibre à deux modes de propagation plus délicate. Les tests d'étirement des tiges synthétisées à partir des verres ont montré une cristallisation pas seulement au niveau de la surface de la fibre mais aussi à l'intérieur. L'analyse des résultats a démontré que les

cristaux sont essentiellement formés d'ions de terbium ; autrement dit ces ions ont créé de nouvelles phases cristallines.

Le travail sur la réalisation d'un rotateur de Faraday tout fibre bimodal continue. Afin d'expliquer l'effet de cristallisation des verres fortement dopés en ions de Tb, il est recommandé de faire une étude structurale de ces composés et d'essayer d'identifier les phases cristallines qui présentent une forte tendance de cristallisation. D'autre part, durant les tests de synthèse des verres, nous avons remarqué la possibilité d'intégrer plus d'ions Tb dans un verre d'oxyde de silice à condition qu'il faille bien choisir les produits de départ et ajuster les paramètres de fusion pour réussir le moulage. Ensuite, on peut faire une simulation des ondes électromagnétiques qui seront guidées dans la fibre en fonction des indices de réfraction des verres du cœur et de la gaine afin de déterminer le profil des modes de propagation dans la fibre. L'ajustement des paramètres de l'étirement de la fibre est une étape nécessaire pour trouver la meilleure cohérence entre les propriétés chimiques et physiques des verres utilisés dans le cœur et la gaine.

Bibliographie

- [1] M. Shalaby, Ma. Peccianti, Y. Ozturk, and R. Morandotti. A magnetic non-reciprocal isolator for broadband terahertz operation. *Nature Communications*, 4 :1558, 2013.
- [2] D. Jalas, A. Petrov, M. Eich, W. Freude, S. Fan, Z. Yu, R. Baets, M. Popović, A. Melloni, J. D. Joannopoulos, M. Vanwolleghem, C. R. Doerr, and H. Renner. What is — and what is not — an optical isolator. *Nature Photonics*, 7 :579–582, 2013.
- [3] D. J. Richardson, J. M. Fini, and L. E. Nelson. Space-division multiplexing in optical fibres. *Nature Photonics*, 7 :354–362, 2013.
- [4] P. W Atkins, L. L. Jones, L. Laverman, and A. Pousse. *Principes de chimie*. W.H. Freeman Company, édition 2017.
- [5] A. K. Zvezdin and A. K. Anatolii Konstantinovich. *Modern Magnetooptics and Magneto-optical Materials*. Institute of Physics Pub, 1997.
- [6] K. A. Ross, S. D. Arntfield, and S. Cenkowski. *Polymer Science*. Number 978-953-51-0941-9. January 2013.
- [7] I. Hidetoshi, H. Shintaro, and I. Hiroshi. A compact optical isolator using a Y3Fe5O12 crystal for near infra-red radiation. *Optical and Quantum Electronics*, 10(5) :393–398, 1978.
- [8] K. Shiraishi, S. Sugaya, and S. Kawakami. Fiber Faraday rotator. *Applied Optics*, 23 :1103–1106, 1984.
- [9] L. Sun, S. Jiang, J. D. Zuegel, and J. R. Marciante. Effective Verdet constant in a terbium-doped-core phosphate fiber. *Optical Society of America*, 34 :1699–1701, 2009.

- [10] L. Sun, S. Jiang, J. D. Zuege, and J. R. Marciante. All-fiber optical isolator based on faraday rotation in highly terbium-doped fiber. *Journal of the Optical Society of America*, 35 :706–708, 2010.
- [11] L. Sun1, S. Jiang, and J. R. Marciante. Compact all-fiber optical faraday components using 65-wt *Optical Society of America*, 18 :12191–12196, 2010.
- [12] Y.Ledemi. *Verres et vitrocéramiques à base de chalco-halogénures dopés par des ions de terres rares pour la luminescence dans le visible*. PhD thesis, Université de Rennes, 2008.
- [13] Lei Sun. *All-fiber Faraday Devices Based on Terbium-doped Fiber*. PhD thesis, University of Rochester, New York, 2010.
- [14] M. Matecki, N. Duhamel, and J. Lucas. Sodium fluorometaphosphate glasses with high rare earth ion concentrations. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 184 :273–277, 1995.
- [15] Thanh Nam Nguyen. *Etude de composants optiques à base de fibres optiques non-linéaires*. PhD thesis, Université de Rennes I, 2009.
- [16] X. Dong, H. Y. Tam, and P. Shum. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based sagnac interferometer. *Applied Physics*, 90 :151113, 2007.
- [17] Y. Yung, S. Alam, Z. Li, A. Dhar, D. Giles, I. Giles, J. Sahu, L. Grüner-Nielsen, F. Poletti, and D. Richardson. First demonstration of multimode amplifier for spatial division multiplexed transmission systems. *Optics Express*, 19 :B952–B957, 2011.
- [18] W. V. Sorin, B. Y. Kim, and H. J. Shaw. Highly selective evanescent modal filter for two-mode optical fibers. *Optics Letters*, 11 :581–583, 1986.
- [19] K. Y. Song and B. Y. Kim. Broad-band LP02 mode excitation using a fused-type mode-selective coupler. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15 :1734 – 1736, 2003.
- [20] J. N. Blake, B. Y. Kim, and H. J. Shaw. Fiber-optic modal coupler using periodic microbending. *Optics Letters*, 11 :177–179, 1986.
- [21] B. Y. Kim, J. N. Blake, H. E. Engan, and H. J. Shaw. All-fiber acousto-optic frequency shifter. *Optics Letters*, 11 :389–391, 1986.

- [22] H. S. Park, K. Y. Song, S. H. Yun, and B. Y. Kim. All-fiber wavelength-tunable acousto-optic switches based on intermodal coupling in fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 20 :1864–1866, 2002.
- [23] H. G. Park, S. Y. Huang, and B. Y. Kim. All-optical intermodal switch using periodic coupling in a two-mode waveguide. *Optics Letters*, 14 :877–879, 1989.
- [24] N. Andermahr and C. Fallnich. Long-period fiber gratings for transverse mode conversion induced by the optical kerr effect. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 18, 2010.
- [25] G. Stepniak, L. Maksymiuk, and J. Siuzdak. Binary-phase spatial light filters for mode-selective excitation of multimode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 29 :1980 – 1987, 2011.
- [26] A. Li, Y. Wang, and W. Shieh Q. Hu. Characterization of in-line interferometric based temperature sensors in two-mode fibers. *Optics Express*, page AW3D.4, 2015.
- [27] R. Sasaki, Y. Nii, Y. Iguchi, and Y. Onose. Nonreciprocal propagation of surface acoustic wave in Ni :LiNbO₃. *American Physical Society*, 95, 2016.
- [28] M. A. Schmidt, L. Wondraczek, H. W. Lee, N. Granzow, N. Da, and P. St. J. Russell. Complex Faraday rotation in microstructured magneto-optical fiber waveguides. *Adv. Mater.*, 23 :2681–2688, 2011.
- [29] P. A. Williams, A. H. Rose, G. W. Day, T. E. Milner, and M. N. Deeter. Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses. *Applied Optics*, 30 :1176–1178, 1991.
- [30] S. Yuan and X. Z. Shu. A new Faraday rotation glass with a large Verdet constant. *Journal of Applied Physics*, 75 :6375 – 6377, 1994.
- [31] Edward Collett. *Field Guide to Polarization*. 1934.
- [32] A. CADENE. *Mesures de biréfringences magnétiques dans l’hélium et le xénon gazeux, et dans le vide*. PhD thesis, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2015.
- [33] J. Zarzycki. *Les verres et l’état vitreux*. Masson, Paris, 1982.

- [34] M. Hamzaoui. *Verres d'oxydes lourds à base de Sb_2O_3 , exploration, caractérisation physico-chimiques et application à l'amplification optique*. PhD thesis, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [35] P. France. *Fluoride Glass Optical Fibres, Applications*. 1990.
- [36] C. B. Rubinstein, S. B. Berger, L. G. Van Uitert, and W. A. Bonner. Faraday rotation of rare-earth (iii) borate glasses. *Journal Of Applied Physics*, 35(8) :2338, 1964.
- [37] S. B. Berger, C. B. Rubinstein, C. R. Kurkjian, and A. W. Treptow. Faraday rotation of rare-earth (iii) phosphate glasses. *Physical Review : American Physical Society*, 133(3A) :723–727, 1964.
- [38] M. Daybell, W. C. Overto Jr, and H. L. Laquer. The Faraday effect at low temperatures in terbium alumina silicate glass. *Applied Physics Letters*, 11 :79, 1967.
- [39] V. V. Zhukov and O. E. Zakurenko. The Faraday effect in silicate glasses containing rare earths at low temperature. *Applied Spectroscopy*, 6 :236–238, 1967.
- [40] J. Pommier, J. Ferre, and S. Senoussi. Origin of the faraday effect in a transparent magnetic Mn^{2+} glass. *Solid State Physics*, 17 :5621, 1984.
- [41] V. Letellier, A. Seignac, A. Le Floch, and M. Matecki. Magneto-optical properties of heavily rare-earth doped non-crystalline fluorophosphates. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 111 :55–62, 1989.
- [42] J. Qiu, K. Tanaka, N. Sugimoto, and K. Hirao. Faraday effect in Tb^{3+} -containing borate, fluoride and fluorophosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 213-214 :193 – 198, 1997.
- [43] A.V. Malakhovskii, I.S. Edelman, Y. Radzyner, Y. Yeshurun, A.M. Potseluyko, T.V. Zarubina, A.V. Zamkov, and A.I. Zaitzev. Magnetic and magneto-optical properties of oxide glasses containing Pr^{3+} , Dy^{3+} and Nd^{3+} ions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 263 :161–172, 2003.
- [44] Y. Ruan, R. A. Jarvis, A. V. Rode, S. Madden, and B. Luther-Davies. Wavelength dispersion of verdet constants in chalcogenide glasses for magneto-optical waveguide devices. *Optics Communications*, 252 :39–45, 2005.

- [45] J. Ballato and E. Snitzer. Fabrication of fibers with high rare-earth concentrations for faraday isolator applications. *Applied Optics*, 34, October 1995.
- [46] K. Linganna, B. Hyeon Kim S. Ju, and W. Han. Fabrication and characterization of lanthanum boroaluminosilicate glass fiber for magneto-optical device applications. *OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS), 2016 21st*, 2016.
- [47] M. Geho, T. Sekijima, and T. Fujii. Growth of terbium aluminum garnet ($\text{Tb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$; tag) single crystals by the hybrid laser floatingzone machine. *Journal of Crystal Growth*, 267 :188–193, 2004.
- [48] A. Balbin Villaverde, D. A. Donatti, and D. G. Bozinis. Terbium gallium garnet verdet constant measurements with pulsed magnetic field. *J. Phys. C : Solid State Phys*, 11, 1978.
- [49] E. G. Villora, P. Molina, M. Nakamura, K. Shimamura, T. Hatanaka, A. Funaki, and K. Naoe. Faraday rotator properties of $\text{Tb}_3[\text{Sc}_{1.95}\text{Lu}_{0.05}](\text{Al}_3)\text{O}_{12}$, a highly transparent terbium-garnet for visible-infrared optical isolators. *Applied Physics Letters*, 99 :011111, 2011.
- [50] G.T. Petrovskii, I.S. Edelman, T.V. Zarubina, A.V. Malakhovskii, V.N. Zabluda, and M.Yu. Ivanov. Faraday effect and spectral properties of high-concentrated rare earth oxide glasses in visible and near uv region. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 130 :35–40, 1991.
- [51] G. Gao, A. Winterstein-Beckmann, O. Surzhenko, C. Dubs, J. Dellith, M. A. Schmidt, and L. Wondraczek. Faraday rotation and photoluminescence in heavily Tb^{3+} doped $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ glasses for fiber-integrated magneto-optics. *Nature, Scientific Reports/5*, 5 :8942, 2015.
- [52] Scholze and Horst. *Le Verre : Nature, Structure et Propriété*. Institut du Verre Paris, 1974.
- [53] Hruby. Evaluation of glass forming tendency by means of dta. *Czechoslovak Journal of Physics*, 22 :1187–1193, 1972.

- [54] M. Saad and M. Poulain. Glass forming ability criteria. *Materials Science Forum*, 19-20 :11–18, 1987.
- [55] Jan W. Gooch. *Sellmeier Equation*, pages 653–654. Springer New York, New York, NY, 2011.
- [56] M. Honshima and K. Ohashi. High-energy ndfeb magnets and their applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 3 :218–222, 1994.
- [57] S. Nagel, J. MacChesney, and K. Walker. An overview of the modified chemical vapor deposition MCVD process and performance. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 18 :459 – 476, 1982.
- [58] M. Boivin, M. El-Amraoui, Y. Ledemi, F. Celari, R. Vallée, and Y. Messaddeq. Thermal stress analysis and supercontinuum generation in germanate-tellurite composite fibers. *Optical Materials Express*, 6 :1653–1662, 2016.
- [59] M. Kasahara, K. Saitoh, T. Sakamoto, N. Hanzawa, T. Matsui, K. Tsujikawa, Fumihiko Yamamoto, and M. Koshiba. Design of few-mode fibers for mode-division multiplexing transmission. *IEEE Photonics Journal*, 5 :1–8, 2013.
- [60] I.A.A. Terra, L.J. Borrero-Gonzalez, J. M. Carvalho, M.C. Terrile, M.C.F.C. Felinto, H.F. Brito, and L.A.O. Nunes. Spectroscopic properties and quantum cutting in Tb³⁺+Yb³⁺+ co-doped ZrO₂ nanocrystals. *Journal Of Applied Physics*, 113 :073105–1–073105–6, 2013.
- [61] Z.X. Mo, H.W. Guo, P. Liu, Y.D. Shen, and D.N. Gao. Luminescence properties of magneto-optical glasses containing Tb³⁺ ions. *Journal of Alloys and Compounds*, 658 :967–972, 2015.