

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS



Développement d'une nouvelle méthode de mesure simultanée du flux thermique et de la température moyenne à l'aide de nouveaux capteurs à fibre optique et de nouveaux réseaux LPG

Par

N'Guessan Guy Marcel Koffi

Thèse présentée au
Département d'informatique et d'ingénierie
Pour l'obtention de grade de

PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph. D)

En sciences et technologies de l'information



Novembre 2022

Jury d'évaluation :

- Président du Jury : Prof. Alan Davoust, Ph.D.
Département d'informatique et d'ingénierie,
Université du Québec en Outaouais.
- Examineur interne : Prof. Ahmed Lakhssassi, Ph.D.
Département d'informatique et d'ingénierie,
Université du Québec en Outaouais.
- Co-directeur de recherche : Prof. Tinko A. Eftimov, Ph.D.
Département d'informatique et d'ingénierie,
Université du Québec en Outaouais.
- Examineur externe : Prof. Oumarou Savadogo, Ph.D.
Département génie chimique,
École Polytechnique de Montréal
- Directeur de recherche : Prof. Frédéric J. Lesage, Ph.D.
Département d'informatique et d'ingénierie,
Université du Québec en Outaouais.

Remerciements

Le travail de thèse peut s'apparenter à un vrai marathon rempli de moments euphoriques, plaisants et joyeux mais aussi parfois difficiles et pénibles à cause des conséquences de la crise sanitaire mondiale actuelle et aussi à cause de l'avenir incertain du Centre de Recherche en Photonique de l'université du Québec à Outaouais. La dernière ligne droite de ce marathon jusqu'au franchissement de la ligne d'arrivée est un moment inoubliable et rempli d'émotions. Cependant, croyez-moi que cet accomplissement n'aurait jamais été possible sans l'effort collectif de nombreuses personnes.

J'ai eu la chance de pouvoir compter sur l'appui de tous mes encadrants, que ce soit en matière d'infrastructure, de financement ou de conseils. De ce fait, je leur en suis profondément reconnaissant.

Je voudrais tout d'abord remercier le professeur Wojtek J. Bock de m'avoir accueillie au sein des Laboratoires du Centre de Recherche de Photonique (CRP) où j'ai effectué mes travaux de thèse. Je souhaite ensuite remercier mon directeur de thèse, le professeur Frédéric J. Lesage, pour sa grande implication et son aide continu et ses précieux conseils. Je le remercie également pour sa patience sans fin et pour avoir toujours laissé sa porte ouverte durant mes travaux de recherche. Puis, un merci particulier au professeur Tinko A. Eftimov pour avoir codirigé ce travail de recherche, pour sa disponibilité, pour son regard neuf et pertinent sur mes résultats et ses encouragements qui ont contribué sans nul

doute au succès de cette thèse. La joie et l'enthousiasme qu'il a pour la recherche en photonique étaient contagieux et motivants pour moi.

Je tiens à remercier le responsable technique du laboratoire Predrag Mikulic pour la fabrication de réseaux de fibres à longue période dans le cadre de cette thèse.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir accepté de juger cette thèse et pour le temps qu'ils y ont consacré. Leurs commentaires et appréciations m'ont permis d'en améliorer la qualité.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour sa compréhension et pour son soutien indéfectible. Surtout, merci du fond du cœur à mes géniteurs, Koffi Kouadio Antoine et Kouassi Affoué Marie, pour l'éducation et les valeurs qu'ils m'ont transmises. Je leur dois beaucoup dans la réussite de ma thèse qui illustre aussi la fin d'un long cursus scolaire. Je tiens également à remercier mon épouse Arlette Kablan, notre fille Vérane Ashley et notre fils Christ Kimberly. Leur amour, leur prudence, leurs encouragements, leurs patiences et leurs aides ont été pour moi un soutien incroyable.

TABLE DE MATIÈRE

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	CONTEXTE GÉNÉRAL	1
1.2	MOTIVATION	3
1.3	CONTRIBUTIONS	6
1.3.1	<i>Contribution du point de vue amélioration de la sensibilité du réseau LPG.....</i>	<i>6</i>
1.3.2	<i>Contribution du point de vue de l'analyse théorique LPG.....</i>	<i>7</i>
1.3.3	<i>Contribution du point de vue intégration des capteurs dans des ouvrages civils.....</i>	<i>7</i>
1.4	ORGANISATION DU PROJET DE THÈSE	8
2	PRÉSENTATION ET REVUE DE LITTÉRATURE DES FLUXMÈTRES	11
2.1	LE FLUX THERMIQUE ET SA MESURE	11
2.2	REVUE DE LITTÉRATURE DES CAPTEURS DE FLUX THERMIQUES	13
2.2.1	<i>Capteurs à gradient de température conventionnels.....</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Les capteurs à fibre optique</i>	<i>17</i>
2.3	CONCLUSION	18
3	ÉTUDE GÉNÉRALE DES CAPTEURS À FIBRES OPTIQUES.....	19
3.1	GÉNÉRALITÉ SUR LES FIBRES OPTIQUES	19
3.1.1	<i>Structure d'une fibre optique.....</i>	<i>19</i>
3.1.2	<i>Types d'une fibre optique</i>	<i>20</i>
3.1.3	<i>Caractéristiques principales de la fibre optique</i>	<i>21</i>
3.1.4	<i>Théorie de la propagation du rayon lumineux dans la fibre.....</i>	<i>23</i>
3.1.5	<i>Avantage et inconvénients de la fibre optique par rapport aux câbles en cuivre</i>	<i>27</i>
3.2	TYPES DE RÉSEAUX À FIBRE OPTIQUE	28
3.2.1	<i>Réseau de courte période : FBG.....</i>	<i>28</i>
3.2.2	<i>Réseau Longue période : LPG</i>	<i>30</i>
3.2.3	<i>Différences fondamentales entre les réseaux LPG et FBG</i>	<i>32</i>
3.3	GÉNÉRALITÉ SUR LES CAPTEURS À FIBRES OPTIQUES	33
3.3.1	<i>Composants du système de mesure à fibre optique.....</i>	<i>34</i>

3.3.2	<i>Principe de fonctionnement</i>	35
3.3.3	<i>Élément sensible de détection : caractère intrinsèque vs extrinsèque</i>	35
3.3.4	<i>Distribution spatiale des capteurs à fibre optique</i>	35
3.3.5	<i>Classifications des capteurs à fibre optique</i>	36
3.4	ÉTAT DE L'ART DES CAPTEURS À FIBRE POUR LA MESURE DU GRADIENT DE TEMPÉRATURE	38
3.4.1	<i>Capteur à fibre optique à base de FBG</i>	38
3.4.2	<i>Capteur à fibre optique à base de LPG</i>	40
3.5	CONCLUSION	42
4	CAPTEUR À FIBRE OPTIQUE BASÉ SUR LES RÉSEAUX LPG	43
4.1	GRANDEURS PHYSIQUES MESURÉES AVEC UN CAPTEUR À FIBRE OPTIQUE À BASE DE LPG	43
4.2	TECHNIQUES DE FABRICATION DU RÉSEAU LPG	43
4.3	FABRICATION DU RÉSEAU LPG PAR DÉCHARGE D'ARC ÉLECTRIQUE	45
4.3.1	<i>Matériels de la configuration de fabrication</i>	45
4.3.2	<i>Principe de fonctionnement du montage</i>	45
4.3.3	<i>Propriétés du réseau LPG induits par décharge d'arc électrique</i>	48
4.4	FABRICATION DU RÉSEAU LPG PAR LA MÉTHODE D'IRRADIATION AU LASER CO ₂	49
4.4.1	<i>Matériels de la configuration de fabrication</i>	50
4.4.2	<i>Principe de fonctionnement du montage</i>	50
4.5	CONCLUSION	53
5	CAPTEUR À FIBRE OPTIQUE À BASE DE RÉSEAUX LPG POUR LA MESURE DU GRADIENT THERMIQUE DANS DES ENVIRONNEMENTS AYANT DIFFÉRENTS INDICES DE RÉFRACTION	55
5.1	MESURE DU GRADIENT DE TEMPÉRATURE ET DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE	56
5.1.1	<i>Analyse théorique</i>	56
5.1.2	<i>Simulation de la réponse spectrale du réseau LPG</i>	59
5.2	EXPÉRIENCE ET RÉSULTATS	67
5.2.1	<i>Montage expérimental (Matériels et procédure expérimentale)</i>	67
5.2.2	<i>Procédure expérimentale</i>	69
5.2.3	<i>Résultats</i>	74
5.3	DISCUSSION	82
5.4	CONCLUSION	84

6	DÉTECTION DE GRADIENTS THERMIQUES À L'AIDE DE LPG AYANT UNE DIFFÉRENCE D'INDICE DE RÉFRACTION EFFECTIVE VARIABLE	86
6.1	ANALYSE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTAL POUR UN RÉSEAU LPG.....	87
6.1.1	<i>Analyses théoriques des LPG avec $\Delta n_{eff, i}$ uniforme.....</i>	87
6.1.2	<i>Simulations théoriques des LPG avec $\Delta n_{eff, i}$ uniforme.....</i>	88
6.1.3	<i>Expérience avec des LPG avec $\Delta n_{eff, i}$ uniforme</i>	90
6.1.4	<i>Simulations théoriques des LPG avec $\Delta n_{eff, i}$ non uniforme</i>	92
6.1.5	<i>Test expérimental des réseaux LPG uniformes inscrits par arc électrique.....</i>	94
6.2	LPG AVEC UN GRADIENT DN GÉNÉRÉ DANS L'INDICE DE RÉFRACTION EFFECTIF $\Delta N_{EFF,0, i}$	97
6.3	CONCLUSION	103
7	RÉPONSES AUX GRADIENTS DE TEMPÉRATURE ET À LA TEMPÉRATURE MOYENNE DES RÉSEAUX LPG NON IDENTIQUES EN CASCADE	105
7.1	ANALYSE THÉORIQUE DE RÉSEAUX LPG EN CASCADE	106
7.1.1	<i>Représentation matricielle des réseaux en cascade</i>	106
7.1.2	<i>Simulations théoriques des LPG en cascade</i>	108
7.2	EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS.....	118
7.2.1	<i>Montage expérimental.....</i>	118
7.2.2	<i>Résultats et discussion.....</i>	121
7.3	CONCLUSION	133
8	MESURE SIMULTANÉE DU FLUX THERMIQUE ET DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE DANS UN BLOC DE BÉTON À L'AIDE DE RÉSEAUX DE FIBRES OPTIQUES À LONGUE PÉRIODE NON UNIFORMES	135
8.1	ANALYSE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTAL POUR UN RÉSEAU LPG.....	137
8.1.1	<i>Réseaux LPG en cascade non uniformes pour les mesures thermiques.....</i>	137
8.1.2	<i>Mesure simultanée Du gradient de température et de la température moyenne</i>	140
8.2	EXPÉRIENCES.....	141
8.2.1	<i>Fabrication de LPG non identique.....</i>	141
8.2.2	<i>Résultats des tests de LPG non uniformes</i>	142
8.2.3	<i>Mesures de gradient thermique et de température moyenne dans bloc de béton</i>	148
8.3	CONCLUSION	159
9	TRAVAUX FUTURS.....	160
10	CONCLUSION	161

RÉFÉRENCES.....	165
------------------------	------------

TABLE DES ANNEXES

1. ANNEXE A.....	190
2. ANNEXE B.....	193
3. ANNEXE C.....	206
4. ANNEXE D	236

Liste des figures

Figure 1: Modes de transmission et mesure du flux thermique	12
Figure 2: Coupe transversale d'une fibre optique	20
Figure 3: Distribution de l'indice de réfraction d'une fibre à saut d'indice	20
Figure 4: Guidage par réflexion à l'interface cœur/gaine dans une fibre à saut d'indice .	24
Figure 5: Couplage contre directionnel du mode cœur et du mode gaine dans le FBG. ..	29
Figure 6: Couplage Co directionnel dans une longue période de réseau	32
Figure 7: Composants de base d'un capteur à fibre optique.....	34
Figure 8: Dispositif de fabrication de réseau LPG par la méthode de décharge d'arc électrique.	47
Figure 9: Déformations périodiques des surfaces de la fibre SMF28E exposées aux décharges.....	48
Figure 10: Dispositif de fabrication de réseau LPG par irradiation au laser CO ₂	51
Figure 11: Déformations périodiques de la forme de la fibre introduites par le laser CO ₂ sur une fibre SMF28E : a) changements latéraux de période $\Lambda = 250 \mu\text{m}$ à une puissance de 20% du laser ; b) changements latéraux de période $\Lambda = 440 \mu\text{m}$ à une puissance de 30% du laser.	51
Figure 12: Représentation schématique du réseau LPG	56
Figure 13: Comportement spectral du réseau LPG aux variations de température : changement de la profondeur de l'intensité et déplacement horizontal de la longueur d'onde de couplage	59

Figure 14:Simulation du gradient de température le long d'un LPG (Λ constant) à l'aide de deux module Peltier avec $T_1 \neq T_2$	60
Figure 15:Variation de l'indice de réfraction dans la fibre Δn	63
Figure 16:Simulations d'un réseau LPG aux différences de température ΔT	66
Figure 17:Variation de l'intensité à différentes valeurs du paramètre m	66
Figure 18:Montage expérimental	68
Figure 19:Plateforme mobile : a) Zone de mesure b) Réseau LPG	69
Figure 20:Schéma du montage expérimental.....	70
Figure 21:Réponses spectrales aux différences de températures ΔT imposées aux deux moitiés du LPG engendrant des changements de la profondeur ΔI_c	72
Figure 22:Déplacements de la longueur d'onde de couplage λ_c en fonction T_{moy}	73
Figure 23:Changements de profondeur en dB causés par les changements des différences de température positifs et négatifs.	74
Figure 24:Variation de $\Delta \lambda_c$ en fonction de T_{moy}	76
Figure 25:Réponse aux différences de température du PS-358 à deux longueurs d'onde différentes : $\lambda_1 = 1314$ nm et $\lambda_2 = 1472$ nm et pour deux SRI : dans l'air (A) et dans l'eau (W) : variations de ΔI_c en fonction de ΔT	77
Figure 26 : Réponse aux différences de température du PS-358 à la longueur d'onde $\lambda_2 = 1472$ nm et pour deux SRI : dans l'air (A) et dans l'eau (W) : dépendance de $\Delta \lambda_c$ en fonction de T_{moy}	78
Figure 27 : Décalage de longueur d'onde de couplage λ_c aux différentes températures moyennes T_{moy} dans l'air.....	79

Figure 28: Dépendance de $\Delta\lambda_c$ en fonction de T_{moy}	79
Figure 29: Réponses spectrales aux différences de température.....	80
Figure 30: Dépendance de la profondeur ΔI en fonction de ΔT dans l'air (A) et dans l'eau (W)	80
Figure 31: Simulations de la réponses spectrales aux différences de température : $\Delta n_{\text{eff},0,1} = \Delta n_{\text{eff},0,2} = \Delta n_{\text{eff},0}$ et $\sigma_{\Delta n,T} = 0,000001$ riu.....	89
Figure 32: Simulations de la variation de la profondeur ΔI par rapport à ΔT : pour $\Delta n_{\text{eff},0,1} = \Delta n_{\text{eff},0,2} = \Delta n_{\text{eff},0}$ et $\sigma_{\Delta n,T} = 0,000001$ riu.....	89
Figure 33: Réponses spectrales aux différences de température.....	91
Figure 34: Dépendance de la profondeur ΔI en fonction de ΔT dans l'air (A).	91
Figure 35: Réponses théoriques aux différences de température ΔT dans une fibre avec changement progressif de l'indice de réfraction effectif le long du réseau pour différentes valeurs de dn	93
Figure 36: Apparition d'une symétrie dans la réponse en fonction de dn	93
Figure 37: Réponses aux gradients thermiques d'un LPG à double résonance fusionné à base de fibres photosensibles : a) modifications de la profondeur du spectre en fonction de ΔT	95
Figure 38: Intensité de couplage en fonction de ΔT	95
Figure 39: Changements de la profondeur du spectre en présence de ΔT	96
Figure 40: Courbes de ΔI en fonction de ΔT	96
Figure 41 : Combinaison expérimentale pour introduire un gradient dn dans l'indice de réfraction effectif $\Delta n_{\text{eff},0,i}$ dans les deux moitiés du LPG.	98

Figure 42: Changements de la profondeur spectrale.....	99
Figure 43 : Intensité de couplage en fonction de ΔT	99
Figure 44: Réponses à la différence de température ΔT du LPG à résonance unique PS-194.....	101
Figure 45: Réponses aux gradients thermiques avec des gradients d'indice imposés par la combinaison eau/air.	101
Figure 46: Représentation schématique d'une cascade de deux réseaux LPG	106
Figure 47: Réponse spectrale d'une cascade symétrique aux différences de température, m	110
Figure 48: Variation de la profondeur ΔI par rapport à ΔT , m ($\sim \Delta T$).	111
Figure 49: Réponses spectrales d'une cascade symétrique aux différences de température, m.....	112
Figure 50: Pertes minimale I_c en fonction de m ($\sim \Delta T$ pour $dn=16.10^{-6}$)	113
Figure 51: Comparaison des réponses au paramètre de différence de température, m pour les cascades symétriques et asymétriques pour l'intensité de couplage central.....	114
Figure 52: Comparaison des réponses au paramètre de différence de température, m pour les cascades symétriques et asymétriques pour l'intensité de couplage gauche et droit	114
Figure 53: Réponses spectrales d'une cascade de deux LPG distants de $L_0=22,12$ mm avec un rapport de mode variable dans la section intermédiaire.....	116
Figure 54: Variation de l'intensité par rapport à ΔT m pour $L_0=22,12$ mm montrant le retard de phase variable dans la section intermédiaire.....	116

Figure 55: Réponses spectrales d'une cascade de deux LPG distants de $L_0=42$ mm avec un rapport de mode variable dans la section intermédiaire.....	117
Figure 56: Variation de l'intensité par rapport à ΔT m pour $L_0=42$ mm montrant le retard de phase variable dans la section intermédiaire	117
Figure 57: Réponses spectrales à la température du LPG SMF-400-20-1 en cascade...122	
Figure 58: Décalage horizontal de l'intensité de couplage I_c par rapport à la température moyenne T_{moy}	122
Figure 59: Réponses aux gradients de température du LPG SMF-400-20-1 en cascade	123
Figure 60: Variation de l'intensité de couplage minimale ΔI_c en fonction de ΔT	123
Figure 61: Changements de la profondeur de l'intensité minimale IC par rapport à la différence de température ΔT du LPG en cascade SMF-400-20-1 : LPG gauche dans (A/A), (W/A) et (A/W)	124
Figure 62: Variation de l'intensité de couplage I_c en fonction de ΔT pour (A/W).....	125
Figure 63: Variation de l'intensité de couplage I_c en fonction de ΔT pour (W/A).....	125
Figure 64: Réponses spectrales du LPG en cascade PS-375-25-1 aux différences de température ΔT	127
Figure 65: Changements de profondeur de toutes les intensités de couplage par rapport à ΔT	128
Figure 66: Réponses différentielles des paires et réponse différentielle totale	128
Figure 67: Réponses différentielles des paires et réponse différentielle totale avec la partie droite du LPG dans l'eau (A/W).....	129

Figure 68: Décalage de longueur d'onde centrale λ_C en fonction des températures moyennes	130
Figure 69: Courbe $\Delta\lambda_C = f(T_{moy})$	130
Figure 70: Réponse au gradient de température d'un LPG non uniforme.....	138
Figure 71: Réponses spectrales des réseaux LPG non uniformes aux différences de température.....	143
Figure 72: Changements de la profondeur de l'intensité de couplage en fonction de ΔT	144
Figure 73: Décalage de λ_C en fonction des T_{moy} pour $\Delta T = 0^\circ C$	145
Figure 74: Décalage de λ_C en fonction des T_{moy} pour $\Delta T = -15^\circ C$ et $\Delta T = -15^\circ C$	146
Figure 75: Courbes $I_c = f(T_{moy})$ pour $\Delta T = 0^\circ C$ et $\Delta T = \pm 10^\circ C$; $\Delta T = \pm 15^\circ C$ et $\Delta T = \pm 20^\circ C$ fixes.	147
Figure 76: Graphique composite du décalage de longueur d'onde par rapport aux changements de température moyenne pour toutes les différences de température.	148
Figure 77: Montage schématique du LPG à l'intérieur d'un bloc de béton pour les mesures	149
Figure 78: Réponse spectrale du LPG aux changements de température moyens cas $\Delta T = 0$	150
Figure 79: Réponse spectrale du LPG aux changements de température moyens, cas $\Delta T < 0$	151
Figure 80: Réponse spectrale du LPG aux changements de température moyens cas $\Delta T > 0$	151

Figure 81: Courbes $\Delta\lambda_C=f(T_{moy})$ pour différentes valeurs de ΔT pour le réseau PS36.152

Figure 82: Courbe de $\Delta I_C=f(\Delta T)$ pour différentes valeurs de T_{moy} pour le réseau PS36.152

Figure 83: Courbes $\Delta\lambda_C=f(T_{moy})$ pour différentes valeurs de ΔT pour le réseau PS18.153

Figure 84: Courbe de $\Delta I_C=f(\Delta T)$ pour différentes valeurs de T_{moy} pour le réseau PS18

.....153

Liste des tableaux

Tableau 1: Différences fondamentales entre les LPG et les FBG.....	33
Tableau 2: Méthodes d'inscription de réseau LPG dans la fibre optique.....	52
Tableau 3: Spécifications des LPG testés	67
Tableau 4: Mesures pour différents ΔT à une température moyenne constante.....	71
Tableau 5: Mesures pour des T_{moy} à une différence de température constante.....	73
Tableau 6: Comparaisons aux sensibilités : au gradient de température (dB/°C) et à la température (nm/°C) des trois LPG : PS-358, PS-368 et SMF-28 (368).....	81
Tableau 7: Réseaux LPG fabriqués et expérimentés	90
Tableau 8: Réseaux LPG expérimentés	119
Tableau 9: Sensibilités à T_{moy} et aux ΔT pour les réseaux en cascade PS-375-25-1.....	131
Tableau 10: Paramètres de fabrication des réseaux LPG.....	142
Tableau 11: Paramètres de sensibilité des réseaux testés dans le béton	154
Tableau 12: Paramétrage général de l'analyseur de spectre	207
Tableau 13: Acquisition des données.....	208
Tableau 14: Mesures aux températures des extrémités du gradient.....	208
Tableau 15: Tableau de mesures pour $\Delta T=0^{\circ}C$	209

Liste des symboles et des abréviations

Symbole	Description	Unités
α	Angle d'acceptance	<i>Rad</i>
a	Rayon	mm
S	Surface	m^2
β	Constante de propagation	-
$\beta_{\Delta T}$	Sensibilité aux gradients de température	dB/°C
$\gamma_{\Delta T}$	Sensibilité à la température	nm/°C
C	Vitesse de la lumière dans le vide	m/s
c_P	Chaleur spécifique	<i>J/kgK</i>
δ	Coefficient de désaccord	riu/nm
φ	Densité du Flux de chaleur	<i>W/m²</i>
ϕ	Flux de chaleur	W
Λ	Période	nm
d	Diamètre	mm
f	Distance focale	mm
h	Convective heat transfer coefficient	<i>W/m²K</i>
I	Intensité	<i>A</i>
k	Coefficient de conductivité	<i>W/m²K</i>
K	Coefficient de sensibilité	-
κ	Coefficient de couplage	riu /°C

Symbole	Description	Unités
λ	Longueur d'onde	nm
L	Longueur	mm
m	masse	kg
n	Indice de réfraction	riu
η	Efficacité (Rapport d'amplitude)	%
P	Puissance relative électrique optique	%
∂Q	Variation quantité de chaleur élémentaire	W
$S'_{\Lambda,i}$	Sensibilité à la température moyenne	nm/°C
$S'_{\Delta n,i}$	Sensibilité aux gradients de température	dB /°C
$S_{T_{moy}}$	Sensibilité à la température moyenne	nm/°C
$S_{\Delta T}$	Sensibilité aux gradients de température	dB /°C
T_i	Température	K
δU	Variation d'énergie interne élémentaire	W
$\sigma_{\Lambda,i}$	Sensibilité élémentaire à la température	nm/°C
$\sigma_{\Delta n,i}$	Sensibilité élémentaire aux gradients	dB /°C
v	Vitesse de la lumière dans un corps	m/s
w_0	Rayon du faisceau	μm
δW	Variation du travail élémentaire	W
Δx	distance	m

Abréviation	Description
A	Air
\mathbf{A}	Vecteur du champ électrique
β	Constante de propagation
C	Centre
CO_2	Dioxyde de carbone
Con	Convection
Cond	Conduction
CRP	Centre de Recherche de Photonique
DR	Double résonance
E	Champ électrique
eff	Effectif
FBG	Réseau à courte période
H	Champ magnétique

Abréviation	Description
L	Gauche
LPG	Réseau à longue période
<i>ON</i>	Ouverture numérique
<i>V</i>	Fréquence de normalisée
∇^2	Lapacien
<i>M</i>	Matrice de transformation
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
moy	Moyen (ne)
MMF	Multiple Mode Fiber
<i>N</i>	Nombre de périodes
nm	nanomètre
<i>OSA</i>	Optical Spectrum Analyzer
pm	Pico mètre
R	Droite
Rad	Radiation
RTD	Détecteur de température à résistance
<i>SiO₂</i>	Silice
SRI	Surrounding refractive index
<i>TE</i>	Mode transverse électrique

Abréviation	Description
<i>TEC</i>	Thermoélectrique
<i>TM</i>	Mode transverses magnétique
UQO	Université du Québec en Outaouais
UV	Ultra-violet
W	Watt

Résumé

La combinaison de certains effets naturels et humains, tels que les changements climatiques, l'exploitation industrielle, les glissements de terrain, fragilisent des installations et des ouvrages tels que les ponts, les digues, les bâtiments, les canaux, les conduites, etc. Il existe donc un grand besoin de contrôle et de surveillance dans plusieurs domaines d'activités tels que la production industrielle, l'exploration minière, le transport, la construction pour ne citer que ceux-ci. À titre d'illustration : en aéronautique, pour éviter des accidents d'avion, il est nécessaire de surveiller et de contrôler les contraintes mécaniques et les variations de températures dans le fuselage et les moteurs. En exploitation minier, il est difficile et parfois impossible d'installer des capteurs conventionnels dans cet environnement. En lien avec le domaine de génie civil au Québec, plusieurs effondrements de viaduc et de digues ont endeuillé des familles. Ainsi pour éviter d'éventuelles catastrophes, il est impératif de développer de nouvelles technologies de surveillance ayant de meilleures performances en termes de gestion thermique (durée de vie des capteurs, fiabilité, précision, rapidité, etc.).

En effet, une représentation précise du gradient de température est nécessaire dans la conception, la sécurité, le contrôle et la maintenance d'un large éventail de processus industriels. Ainsi, la connaissance du flux thermique permet d'une part de quantifier les pertes de chaleur à travers une ou plusieurs surfaces et d'autre part d'obtenir des informations sur ce qui se passe à l'intérieur du système étudié. Il existe une large gamme de capteurs conventionnels et de capteurs à fibre optique. En raison de leurs nombreux

avantages, les capteurs à fibre optique à base de réseau longue période (Long period grating-LPG) sont de meilleurs candidats de substitutions.

Le travail présenté dans cette thèse porte sur le développement et la conception d'une nouvelle architecture de réseaux longues périodes hautement sensibles aux différences de température et aux températures moyennes afin de proposer un nouveau capteur à fibre optique à base de réseau LPG.

Une architecture de réseaux longues périodes à large bande est présentée comme une nouvelle méthode à capturer la température et le flux thermique d'un substrat. Cette découverte est une première application de fibres optiques aux mesures thermiques d'un milieu. La méthode présentée exploite la sensibilité de fibres optiques à leur environnement. Plus particulièrement, une imperfection écrite par laser ultra violette induit une perte de transmission. Cette perte est mesurable et elle est en fonction de la période et des longueurs d'onde du spectre de transmission. Par conséquent, il est possible de détecter les variations des caractéristiques de la perte de transmission par rapport à la température du milieu et par rapport au flux thermique. En effet, Nos résultats ont démontré que les gradients thermiques entraînent le décalage vertical de l'intensité de couplage du spectre du réseau, tandis que les modifications de la température moyenne entraînent le décalage horizontal de la longueur d'onde de couplage. Les sensibilités des réseaux LPG obtenues sont largement plus grande que celles des réseaux FBG. L'apport principalement de cette œuvre est une démonstration de l'application de fibre optique qui mesure simultanément la température et le flux thermique sans toutefois appliquer la loi

de fourrier pour le flux et donc moins de mesures et moins d'incertitude. Un modèle expliquant la physique sous-jacente du phénomène, les résultats des expériences de validation et des applications prometteuses sont présentés.

Mots-clés : Réseau longue période, fibres photosensibles, multiplexage, gradient de température, gradient d'indice de réfraction, flux thermique, capteurs de température, capteurs de flux thermique, génie civil.

Abstract

The combination of certain natural and human effects, such as climate change, industrial exploitation, landslides, weaken installations and structures such as bridges, dikes, buildings, canals, pipes, etc. There is therefore a great need for control and surveillance in several fields of activity such as industrial production, mining exploration, transport, construction to name but a few. By way of illustration: in aeronautics, to avoid aircraft accidents, it is necessary to monitor and control the mechanical stresses and temperature variations in the fuselage and the engines. In mining, it is difficult and sometimes impossible to install conventional sensors in this environment due to the risk of fire and explosion. In connection with the field of civil engineering in Quebec, several collapses of viaducts and dikes have left families in mourning. So, to avoid possible disasters, it is imperative to develop new monitoring technologies with better performance in terms of thermal management (sensor lifespan, reliability, precision, speed, etc.).

Indeed, an accurate representation of the temperature gradient is necessary in the design, safety, control and maintenance of a wide range of industrial processes. Thus, knowing the heat flow makes it possible on the one hand to quantify the heat losses through one or more surfaces and on the other hand to obtain information on what is happening inside the studied system. There is a wide range of conventional sensors and fiber optic sensors. Due to their many advantages, long period grating (LPG) fiber optic sensors are better candidates for substitutions.

The work presented in this thesis focuses on the development and design of a new architecture for long-period networks highly sensitive to temperature differences and average temperatures in order to propose a new optical fiber sensor based on an LPG network.

A broadband long-period network architecture is presented as a novel method of capturing the temperature and heat flow of a substrate. This discovery is a first application of optical fibers to thermal measurements of a medium. The presented method exploits the sensitivity of optical fibers to their environment. More particularly, an imperfection written by ultraviolet laser induces a loss of transmission. This loss is measurable and is a function of the period and wavelengths of the transmission spectrum. Consequently, it is possible to detect the variations in the characteristics of the transmission loss with respect to the temperature of the medium and with respect to the heat flux. Indeed, our results demonstrated that thermal gradients cause the coupling intensity of the network spectrum to shift vertically, while changes in average temperature cause the coupling wavelength to shift horizontally. The sensitivities of the LPG networks obtained are much greater than those of the FBG networks. The main contribution of this work is a demonstration of the application of optical fiber which simultaneously measures temperature and heat flow without however applying the Fourier law for the flow and therefore fewer measurements and less uncertainty. A model explaining the underlying physics of the phenomenon, the results of validation experiments and promising applications are presented.

Keywords: Long period grating, photosensitive fiber, multiplexing, temperature gradient, refractive index gradient, heat flow, temperature sensors, heat flow sensors, civil engineering.

1 Introduction

1.1 Contexte général

Depuis des décennies, nous utilisons le son, le geste et la lumière pour véhiculer des informations. Cependant les systèmes de transmission des données utilisant la lumière comme vecteur de transmission sont beaucoup perturbés durant les intempéries. Face à cette problématique, les travaux de recherche de John Tyndall en 1870, ont permis de canaliser la lumière dans une structure filiforme [1] ce qui a permis de réduire de façon significative les pertes de transmission. Malheureusement, la technique proposée par John Tyndall rencontrait deux problèmes majeurs. En plus de l'inexistence de sources d'émissions lumineuses assez puissantes et fiables, il y avait aussi de grandes pertes de transmission à travers les guides d'onde lumineuse.

Par ailleurs en 1880, Alexander Graham Bell invente un système téléphonique qui utilise la lumière du soleil pour véhiculer l'information d'où son nom de photophone [2] [3]. Malheureusement, ce système est confronté aux mêmes problématiques que [1].

Face à ces limites, plusieurs travaux scientifiques ont permis de développer et de concevoir des fibres optiques. L'essor des fibres optiques est lié à deux travaux pionniers. Premièrement par l'invention du laser dans les années 1960 par Théodore Maiman [4]. C'est une source de lumière très cohérente, assez monochromatique et donc idéale comme source dans le domaine de la fibre optique ; deuxièmement par la création de la fibre optique. En effet, face aux pertes de transmissions lumineuses assez importantes générées

à travers les fibres de verre, le scientifique Kao a mené plusieurs recherches et a prouvé expérimentalement que ces pertes élevées de transmission étaient dues aux impuretés dans la fibre et donc en 1966 Kao et Hockham ont confirmé que la perte intrinsèque de verre à base de silice était suffisamment faible pour permettre son utilisation [5].

La mesure est une étape cruciale dans l'acquisition et le traitement de données pour une prise de décision rapide et efficace. Les capteurs conventionnels sont des éléments incontournables dans plusieurs domaines [6]. La télécommunication et les capteurs sont deux domaines et deux approches antagonistes. En fait, pour que les télécommunications actuelles fonctionnent, il a fallu que tous les composants (source, fibre optique, récepteur) soient stables en tout temps, donc ne doivent pas être influencés dans le temps par son environnement. C'est ainsi que plusieurs techniques ont été mis au point pour minimiser, voir annuler, l'influence de ces paramètres externes. Alors, sachant que la fibre optique est impactée par l'environnement, des chercheurs ont décidé d'en tirer profit en maximisant ces influences en réponse à ces perturbations environnementales.

Plusieurs capteurs à fibre optique ont été développés et sont déjà disponibles sur le marché [7]. Les fibres à base de réseaux permettent d'augmenter les sensibilités des fibres par rapport aux fibres optiques classiques sans réseaux. Il existe deux types de réseaux : les réseaux à période courte, appelés réseaux de Bragg (FBG) et les réseaux à longue période (LPG) [8] [9].

La quantification dans le temps et dans l'espace des grandeurs physiques est primordiale pour la surveillance et le contrôle de plusieurs infrastructures civiles. Dans notre travail

de recherche, nous nous intéressons à la mesure du flux thermique et de la température. Une large gamme d'instruments existe pour la mesure de la température dans les industries et dans les laboratoires. Cependant, Il existe un grand besoin de conception et de fabrication de capteurs capables de mesurer le flux thermique avec précision.

1.2 Motivation

La majorité des secteurs d'activité forme notre environnement et affecte les aspects humains, sociaux, écologiques, économiques, culturels et bien d'autres de nos sociétés. Par conséquent, le développement de nouveaux fluxmètres garantira une surveillance et un contrôle de qualité et donc une bonne exploitation durable et sûre dans toute la majorité des domaines d'activité nécessitant des mesures de températures et de son gradient.

Dans le domaine de la construction, les structures civiles et industrielles sont soumises à des modifications très dommageables induites par l'usure, les erreurs de conception et de construction, les exploitations abusives, les surcharges et certains événements naturels inattendus tels que les tremblements de terre, les glissements de terre le réchauffement climatique, gel et dégel [10]. Plusieurs exemples d'effondrement de structures causant la mort et des dégâts importants de matériels peuvent être recensés sur tous les continents. À titre d'exemple, nous pouvons citer l'effondrement spectaculaire d'un immeuble résidentiel près de Miami en juin 2021 (97 morts et 1 disparu), l'effondrement d'un pont piétonnier en Floride en 2018 (6 morts), l'effondrement d'une poutre en porte-à-faux géante du pont de Québec le 29 août 1907 (84 morts), l'effondrement du viaduc de la Concorde dans la banlieue de Montréal le 30 septembre 2006, écrasant deux voitures et

leurs cinq occupants tués, le bris de la digue de Sainte-Marthe-sur-le-Lac le 27 avril 2019 inondant des centaines de maisons, l'effondrement spectaculaire du pont de Morandi en Italie en 2018 (43 morts), l'effondrement du pont Nanfang'ao en Taiwan en 2019 (6 morts), l'effondrement d'un viaduc de métro à Mexico en 2021 (26 morts). Les infrastructures et ouvrages civils nécessitent donc plusieurs capteurs pour surveiller des paramètres physiques et chimiques tels que l'humidité, la température, les contraintes mécaniques, la croissance des fissures. Les fibres optiques conviennent pour enrobage dans le béton avant solidification et donc pour le suivi de la conformité structurale en tout temps.

Dans le domaine de la santé, malgré tout le développement des outils matériels et logiciels pour le traitement thermique de certaines tumeurs [11] [12], le mauvais contrôle de la chaleur injectée pour détruire la tumeur endommage des cellules saines à proximité de la tumeur provoquant d'autres lésions graves ou tuant le patient.

Il est urgent de développer des capteurs efficaces pour la surveillance et le contrôle dans le but d'assurer la sécurité du public et pour garantir une meilleure gestion des infrastructures et ouvrages civils. Il existe un fort besoin de capteur à fibre optique capable de mesure des gradients de température puisqu'il existe beaucoup d'incertitudes dans les mesures de température et de flux thermique en utilisant les capteurs conventionnels existant sur le marché. En effet, la majorité de ces capteurs conventionnels ont besoin de courant pour leur fonctionnement d'où un dégagement de chaleur interne propre à ce type

de capteur. Il y a aussi à un risque d'explosion dans certains environnements en y installant ce type de capteur conventionnel intrusif pour des mesures.

" Pourquoi la mesure du flux thermique ? Quelle technologie pourrait répondre à ce besoin avec de meilleures performances ? "

En effet, une représentation précise du gradient de température est essentielle pour la conception, la sécurité, le contrôle et la maintenance d'un large éventail de processus industriels [13] [14]. La connaissance du flux thermique permet d'une part de quantifier les pertes de chaleur à travers une surface et d'autre part d'obtenir des informations sur ce qui se passe à l'intérieur du système étudié.

En raison de leurs meilleurs avantages, les capteurs à fibre optique sont de meilleurs candidats face aux capteurs conventionnels. Des recherches antérieures ont permis de mesurer des gradients thermiques à l'échelle macro lors de l'ablation thermique mais ces systèmes de capteurs à base de réseau Bragg sont extrêmement encombrants et coûteux et n'effectuent qu'une mesure inférieure au millimètre puis sont très sensibles à la flexion [15].

Il n'existe cependant aucune littérature sur les capteurs à fibre optique à base de réseau LPG pour la mesure du gradient thermique et pourtant, comparés au sein des dispositifs optiques, le réseau LPG présente des avantages uniques, tels qu'une très faible réflexion de la lumière, une inscription facile dans toutes sortes de fibres et ayant une sensibilité supérieure aux autres capteurs optiques. Ce nouveau capteur aux réseaux diélectriques et chimiquement inerte permettra, pour une toute première fois, de surpasser les limites des

capteurs conventionnels et donc il sera possible de l'utiliser de façon efficace dans les environnements difficiles, soumis à des températures élevées, à une exposition radioactive et chimiquement corrosive. Ce nouveau capteur à fibre optique à base de réseau LPG est peu intrusif et il fournira des mesures précises et fiables.

1.3 Contributions

Plusieurs technologies ont été développées pour la mesure du flux thermique, telles que la combinaison en série de capteurs conventionnels et des capteurs à base de réseaux de Bragg. Cependant ces technologies font face à de nombreuses contraintes liées à la mesure du flux thermique. Pour avoir une qualité de conception, de surveillance et de contrôle des systèmes, les capteurs à flux thermique doivent être justes, efficaces, fidèles, stables et peu intrusifs. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans cette vision avec pour objectif final le développement de nouveaux réseaux LPG afin de proposer un nouveau capteur à fibre optique répondant aux contraintes liées à la mesure d'un flux thermique utilisable dans la majorité des domaines.

1.3.1 Contribution du point de vue amélioration de la sensibilité du réseau LPG

La capacité de modifier les spectres de réseaux LPG en termes de choix de longueurs d'onde de résonance (λ_c) et donc perte de transmission de couplage (I_c), dépend de l'indice de réfraction du milieu externe environnant et de la période du réseau. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que la variation des propriétés thermo-optiques et électro-optiques créée par la méthode de fabrication du LPG induise une modification de la réponse spectrale du LPG. Cependant, la possibilité de régler les sensibilités à la température et

aux flux thermiques en changeant les paramètres de fabrication est une réalisation **récente**. Cette mesure du flux thermique avec un seul réseau LPG n'a jamais été démontrée dans le milieu scientifique. Son potentiel est en cours d'être breveté pour la mesure simultanée de la température et du flux thermique. Nous avons été capables non seulement de mesurer l'amplitude de la réponse thermique du LPG et aussi de modifier son signe et sa direction en créant des combinaisons de réseaux en cascades et en induisant des gradients d'indice de réfraction dans les réseaux.

1.3.2 Contribution du point de vue de l'analyse théorique LPG

Nous proposons un nouveau modèle théorique du LPG qui permet de prédire le comportement du réseau exposé aux variations de température pour cela nous proposons une nouvelle programmation Excel pour la simulation du comportement du réseau exposé à la variation de température. Jusqu'à présent, il y a un manque de publications consacrées exactement à ce sujet.

1.3.3 Contribution du point de vue intégration des capteurs dans des ouvrages civils

Il a été question de la conception et de la fabrication d'un prototype de bloc de béton dans lequel sont installés des réseaux LPG pour la mesure du flux thermique. Bien évidemment, l'objectif est de constamment surveiller et de contrôler le comportement du bloc de béton soumis à différentes intempéries.

Les résultats obtenus permettent ainsi de rédiger un cahier de recommandations pour les utilisateurs techniques et économiques intéressés aux capteurs à fibre optique, en relatant les points sensibles détectés dans notre nouvelle conception et en précisant les

précautions d'emploi du nouveau capteur optique avant son usage. Ce n'est que de cette manière que cette nouvelle technologie deviendra un outil clé pour la surveillance et le contrôle de structures industrielles et civiles.

1.4 Organisation du projet de thèse

Cette thèse s'organise en 10 chapitres. Le chapitre 1 présente la motivation et la structure de la thèse tout en énumérant notre nouvelle contribution au sein de la communauté scientifique.

Le chapitre 2 est consacré à l'état de l'art des fluxmètres conventionnels proposés à l'heure actuelle. Les limites des fluxmètres conventionnels ne leur permettent pas d'être utilisés dans plusieurs applications de grande envergure raison pour laquelle nous proposons de nouveaux capteurs à fibre optique.

Le chapitre 3 présente tout d'abord la fibre optique et son principe de fonctionnement. Ensuite, il présente de façon générale les capteurs à fibres optiques existants. Dans ce chapitre, nous expliquons pourquoi notre choix s'est porté sur les capteurs à fibre optique, puis les raisons pour lesquelles les capteurs à fibre optique à base de réseau LPG sont favorisés dans notre recherche.

Le chapitre 4 présente les concepts physiques liés aux réseaux à longue période. Ce chapitre présente également les techniques de fabrication et la caractérisation mises en œuvre pour concevoir la nouvelle architecture des réseaux longues périodes. Une

description détaillée de l'analyse théorique des réseaux longues périodes est présentée dans tous les chapitres suivants.

Le chapitre 5 présente les résultats de notre première publication scientifique. Nous démontrons qu'il est possible de prévoir les calculs la sensibilité aux gradients de température et de la température sans toutefois appliquer la loi de Fourier.

Le chapitre 6 est dédiée à la caractérisation expérimentale des capteurs à fibre optique basé sur les réseaux longues périodes fabriqués dans nos laboratoires du centre de recherche en photonique. Les bancs d'essais y sont présentés. Les résultats obtenus démontrent donc qu'un seul réseau longue période peut être utilisé comme un capteur de vecteur de flux thermique.

Le chapitre 7 est une suite logique du chapitre 6. En effet, le chapitre 7 présente les résultats des différents réseaux longue période mis en cascade ayant des caractéristiques différentes. Selon nos résultats théoriques et expérimentaux, l'introduction d'un gradient d'indice de réfraction local dans le réseau modifie considérablement la profondeur de l'intensité de couplage minimale en fonction de la différence de température et la courbe obtenue évolue de manière monotone et donc permet de mesurer l'amplitude du gradient de température et de connaître son signe.

Le chapitre 8 présente les résultats des mesures simultanées de la température moyenne T_{moy} et de la différence de température ΔT dans des blocs de béton. Les réseaux à longue période utilisés ont été mis en service dans une fibre optique photosensible à l'aide d'un laser CO_2 pulsé. Comme déjà présenté dans les chapitres précédents, nous remarquons que

la température moyenne T_{moy} et les différences de température ΔT sont respectivement dues au décalage horizontal de la longueur d'onde de couplage λ_C et du décalage vertical de l'intensité minimale de couplage I_C dans les blocs de béton. Aussi dans ce chapitre, les résultats expérimentaux montrent que des LPG non uniformes peuvent être utilisés pour mesurer simultanément l'amplitude et le signe du gradient de température aux extrémités d'un LPG ainsi que la température moyenne. Le chapitre 9 présente les améliorations à apporter à partir de cette thèse et le chapitre 10 fait une synthèse globale de ce très beau travail de recherche.

2 Présentation et revue de littérature des fluxmètres

Tout d'abord, ce chapitre présente brièvement le principe général de la mesure du flux thermique suivi des différents types de capteurs permettant la mesure du flux thermique traversant une surface et enfin, un état de de l'art des fluxmètres est présenté.

2.1 Le flux thermique et sa mesure

La thermique, une branche de la thermodynamique, est la science qui décrit les échanges d'énergie entre différents éléments d'un système. Le flux de chaleur est le taux de transfert d'énergie thermique traversant une surface donnée, par unité de temps mesurée en watt [16]. Le premier principe de la thermodynamique mentionne que l'énergie se conserve et peut être transformée d'un état à un autre (1) :

$$\delta U_{int} = \delta Q + \delta W \quad (1)$$

Où δU_{int} est la variation de l'énergie interne du système, δQ est la quantité de chaleur élémentaire et δW est le travail élémentaire en lien avec le système.

L'équation (1) indique que la variation de l'énergie interne d'un système thermodynamique varie avec une variation de la quantité de chaleur et du travail. Le transfert d'énergie sous forme de chaleur, flux thermique, peut donc s'exprimer par [17]:

$$\phi_{th} = \frac{\partial}{\partial t}(Q) = \phi_{cond} + \phi_{conv} + \phi_{rad} \quad (2)$$

Où ϕ_{cond} , ϕ_{conv} et ϕ_{rad} sont respectivement les flux de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, exprimé en Watt.

Ayant une surface définie, le capteur de flux thermique permet donc de mesurer la densité du flux thermique ($\vec{\varphi}$) qui est le taux de chaleur par unité de surface (3):

$$\vec{\varphi}_{th} = \vec{\varphi}_{cond} + \vec{\varphi}_{conv} + \vec{\varphi}_{rad} \quad (3)$$

Où $\vec{\varphi}_{cond}$, $\vec{\varphi}_{conv}$ et $\vec{\varphi}_{rad}$ sont respectivement les densités de flux de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, exprimé en ($\frac{w}{m^2}$).

Dans un environnement où les trois modes de transfert de chaleur sont présents, les capteurs du flux fournissent une mesure globale (Figure 1).

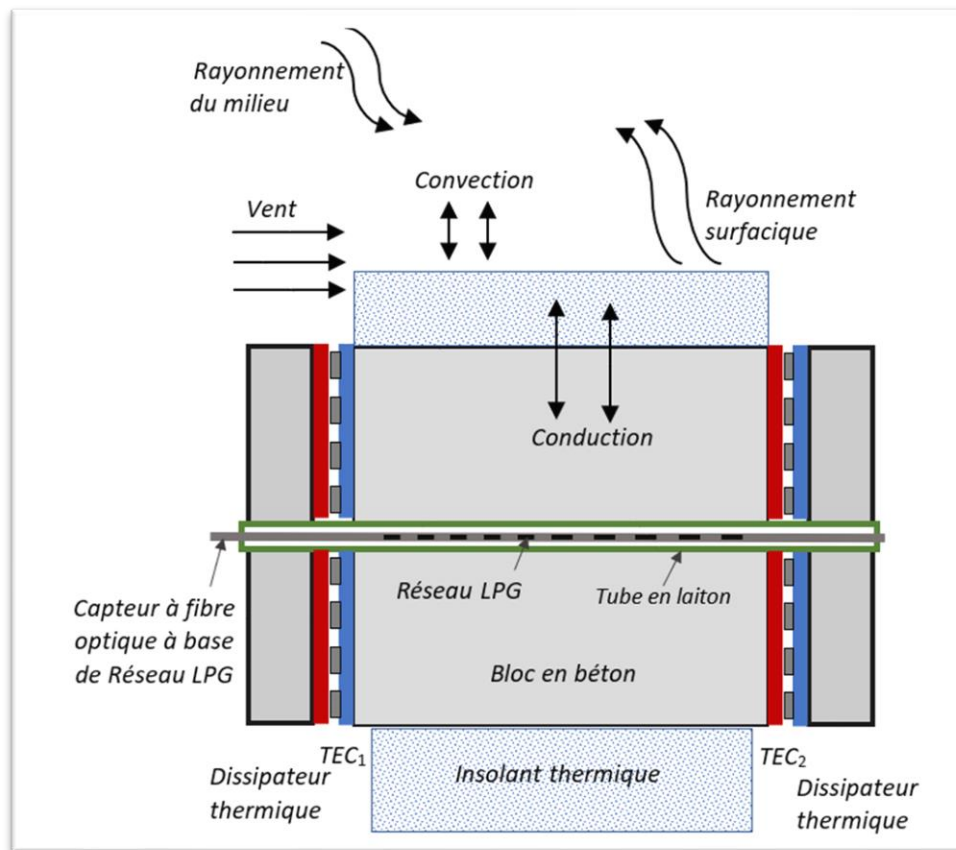


Figure 1: Modes de transmission et mesure du flux thermique

Lorsqu'un fluxmètre est installé dans un système, il mesure le flux thermique total échangé entre les parois et son milieu environnant (Figure 1).

2.2 Revue de littérature des capteurs de flux thermiques

Plusieurs technologies de capteurs de flux ont été largement développées dans [18] [19] [20] [21] [22] mais dans notre travail de recherche, nous nous intéressons spécifiquement aux familles des fluxmètres qui mesurent le transfert de chaleur traversant la surface d'un corps. Ainsi, parmi les capteurs à gradient de température (les fluxmètres à enthalpie et les fluxmètres à inertie [23]), nous nous intéressons aux fluxmètres à gradient de température. Cette technologie permet tout d'abord de mesurer directement un gradient de température sur un substrat de propriétés thermiques connues et ensuite d'appliquer la loi de Fourier qui permet de déterminer la densité de flux thermique. En régime permanent, la loi de Fourier définit la densité du flux thermique comme étant la puissance thermique par unité de surface (4) :

$$\varphi = \vec{q} \cdot \vec{n} = \frac{d\phi}{dS} = -k \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \vec{n} \quad (4)$$

Où \vec{n} est la normale à la surface (S), k est la conductivité thermique du matériau, $\overrightarrow{\text{grad}}(T)$ est le gradient de température et ϕ le flux de chaleur. Connaissant la conductivité thermique et l'épaisseur du matériau, le capteur de flux permet donc de mesurer la densité du flux [17] à partir de l'évaluation du gradient de température, soit par application de la loi de Fourier en régime permanent.

Les capteurs de gradient de température sont divisés en deux grands groupes :

- Les capteurs conventionnels (basé sur les thermopiles ou les sondes à résistance)
- Les capteurs à fibre optique

Avant de faire une comparaison non exhaustive entre les capteurs conventionnels et les capteurs à fibre optique, un bref aperçu des techniques conventionnelles pour la détection de gradients de température est présenté.

2.2.1 Capteurs à gradient de température conventionnels

Dans la méthode du gradient [24], un changement de température à travers une surface est mesuré et corrélé au flux de chaleur, en utilisant la loi de Fourier. Parmi ces capteurs à gradient de température conventionnels, nous avons : les thermocouples et les détecteurs à résistances variables.

Il est important de noter que ces capteurs conventionnels de flux thermiques mesurent le flux indirectement. La stratégie de ces capteurs est de mesurer la température à au moins deux points et d'appliquer la loi de Fourier. Cette méthode entraîne une incertitude cumulative à chaque point de mesure lors de l'application de la loi de Fourier. Ce qui manque dans l'industrie et dans la littérature est une méthode qui permet de mesurer un flux thermique à partir d'une seule mesure précise.

2.2.1.1 Les thermocouples

Les thermocouples sont couramment utilisés pour la mesure du flux de chaleur. Pour ce faire, ils sont généralement connectés en séries [25] [26] pour former une thermopile. Le circuit d'un thermocouple est composé de deux fils de métaux différents qui sont joints à une extrémité et ouverts à l'autre extrémité. Par l'effet de Seebeck, une force

électromotrice (FEM) est générée. C'est-à-dire, en raison de la différence de tension entre les extrémités ouvertes lorsque la jonction est chauffée. La différence de tension entre les bornes à fil ouvert est le résultat des différences de température qui connectent les joints [27]. Les travaux de recherches de Duthoit, Maréchal, Pauquet et Théry ont débouché au développement d'un capteur de flux thermique à partir de thermocouples [28] [29]. La majorité de ces capteurs ont été étalonnés en fonction de différents modes de transfert de chaleur [30] et utilisés dans plusieurs domaines d'activités.

Hager et al. [31] ont développé, mesurés puis analysés les performances d'un micro-capteur à flux thermique composé de plusieurs thermocouples en série. L'étalonnage statique de ce capteur a été effectué sur un mode convectif, et la réponse transitoire a été mesurée, avec et sans revêtement noir en surface, en appliquant un échelon en mode radiatif. Diller [32] et Epstein et al. [33] ont développé et étalonné des capteurs de flux de chaleur de film à double couche sur la base de la conduction thermique à une dimension de Fourier. Avec une seule couche, il est possible de déterminer la densité de flux de chaleur local en analysant le processus de chauffage transitoire de la paroi [34] [35]. Holmberg et Diller [36] ont développé une nouvelle méthode d'étalonnage d'un micro-capteur à flux de chaleur pour des utilisations en mode convectif à l'intérieur d'un tunnel de choc pour mesurer simultanément le flux de chaleur de surface et la température. Rencz, Kollar et Szekely [37] ont présenté un capteur de flux de chaleur microélectronique à gradient basé sur une thermopile. Ce capteur a été développé pour la mesure du flux thermique dans les circuits intégrés. Dans le domaine du transport, les pertes de chaleur étant importantes, il est nécessaire de quantifier les pertes de chaleurs qui affectent les trois

objectifs d'optimisation (puissance, émissions et efficacité) en utilisant des capteurs de flux de chaleur pour les moteurs à combustions [38] [39] afin de calculer avec précision la puissance, l'efficacité et les émissions au cours du développement du moteur [40]. En aéronautique, des chercheurs ont utilisé des thermocouples pour quantifier les mesures de flux thermiques dans le but d'améliorer leur efficacité [41] [42]. Ces capteurs ont été calibrés suivant les deux méthodes : un étalonnage en flux conductif entre deux systèmes de chauffage à des températures différentes et un étalonnage en flux radiatif avec un laser. En 2010, Pullins and Diller [43] ont développé un capteur de flux de chaleur à thermopile robuste destiné à être utilisé dans des environnements thermiques extrêmes. Basé sur un étalonnage en rayonnement, ce capteur est capable de mesurer simultanément la température de la surface de la thermopile et le flux thermique à des températures de capteur pouvant atteindre 1000 °C. En 2012, Li, Wang et Fan [44] ont développé un capteur, basé sur une thermopile, pour mesurer simultanément le flux de chaleur et la température au niveau de la paroi d'une chambre de combustion à allumeur à jet multiple.

2.2.1.2 Les capteurs à résistance variables (RTD)

Ce sont des capteurs permettant de mesurer la température grâce à la corrélation qui existe entre la résistance de l'élément du détecteur de température à résistance (RTD) et la température [45] [46]. L'utilisation de ces capteurs nécessite une alimentation électrique pour produire une chute de tension aux bornes de l'élément thermo résistif. Klems and DiBartolomeo [47] ont conçu, des capteurs de flux de chaleur, basé sur une mesure de résistance en régime périodique, qui servent à étudier la performance de l'isolation des

bâtiments. Hamadi *et al.* [48] ont développé en 2012 des micro-capteurs pour la mesure de température et de flux dans des micro-canaux

2.2.1.3 Quelques limites des Capteurs de flux thermique conventionnels

Ce sont des capteurs intrusifs et donc perturbateurs. En effet, les capteurs de flux conventionnels présentent une contrainte du fait de leur taille qui modifie les lignes de flux thermiques dans la zone de mesure où ils sont installés [49] [50]. L'oxydation lié à leur matériau de conception [51] réduit leur durée de vie. Les capteurs (RTD) ont besoin de courant pour fonctionner par conséquent un dégagement de chaleur du capteur qui perturbe les mesures de température [52]. Il est donc coûteux de contrôler une large surface vu le nombre de capteurs de flux conventionnels nécessaires. Les matériaux de conception de ces capteurs limitent leur utilisation dans plusieurs domaines comme dans le domaine médical [53] et dans le domaine minier puisqu'étant un environnement exposé au gaz et que ce type de capteur émet des champs électromagnétiques et des surchauffes internes durant son fonctionnement et donc il pourrait être la source d'incendie pouvant avoir des dégâts matériels et des pertes humaines. Aussi, vu que leurs tailles et les risques d'incendie et d'explosion qui découleraient de leurs défauts entre autres les charges électriques dont ces capables dépendent pour leur fonctionnement et donc des étincelles issues de ces capteurs sont la base d'explosion et d'incendie.

2.2.2 Les capteurs à fibre optique

L'état de l'art des capteurs à fibre optique est détaillé au chapitre 3. Il n'existe aucune littérature sur la mesure de gradients de température prise avec un capteur à fibre optique

à réseaux LPG. Nous avons récemment montré théoriquement et expérimentalement [54] que les LPG sont sensibles aux gradients de température.

2.3 Conclusion

Après une brève présentation du mode de transmission du flux thermique, nous avons présenté l'état de l'art et les limites des fluxmètres conventionnels et des fluxmètres à fibre optique existants. Ces limites sont les raisons pour lesquelles nous proposons de nouveaux capteurs à fibre optique à base de réseaux.

3 Étude générale des capteurs à fibres optiques

Pour comprendre la notion d'inscription des réseaux LPG dans la fibre optique, il est important de présenter la structure et les caractéristiques principales de la fibre optique [55]. La théorie de propagation du rayon lumineux dans la fibre et les équations fondamentales liées au couplage entre le mode cœur et les modes de gaine sont aussi présentés dans cette section.

3.1 Généralité sur les fibres optiques

3.1.1 Structure d'une fibre optique

La fibre optique est un fil en verre (en silice ou en plastique) très fin qui a la propriété d'être un bon guide de lumière ayant une section circulaire. Dans sa forme la plus simple, la fibre optique est composée, d'après la Figure 2, de deux cylindres concentriques en silice pure (SiO_2) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du cœur. Le cœur, de plus petit diamètre, est composé de silice mélangée au bore, de germanium ou d'autres dopants et d'indice de réfraction d'environ 1,5 nm dans lequel circule le faisceau lumineux comportant l'information. La gaine permet de créer une interface propice au phénomène de réflexion. Un revêtement supplémentaire assure une protection à la fois mécanique et chimique des deux premières couches. Considérons une fibre ayant un diamètre de cœur d_1 et un diamètre de gaine d_2 ayant respectivement comme indice de réfraction dans chaque couche : n_1, n_2 avec $n_1 > n_2$ [55] [56] qui est une condition au phénomène de réflexion totale de l'onde lumineuse dans la fibre. La

deuxième condition sera discutée plus loin et elle concerne l'ouverture numérique qui est l'angle avec laquelle le flux lumineux rentre dans le cœur de la fibre. La Figure 2 présente la géométrie circulaire de la fibre et la Figure 3 montre la distribution de l'indice de réfraction de la fibre à saut d'indice que nous avons utilisé dans de ce travail de recherche.

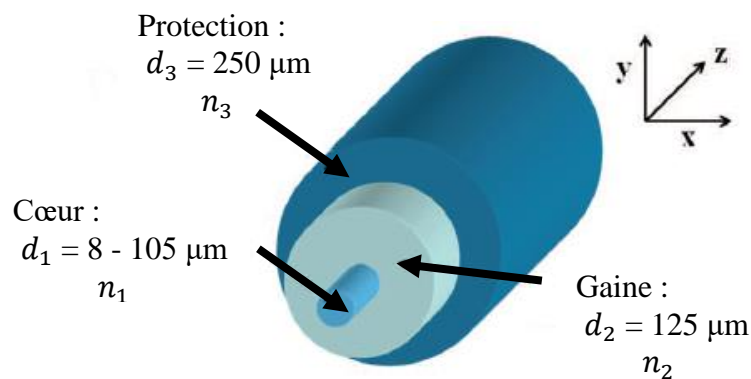


Figure 2: Coupe transversale d'une fibre optique

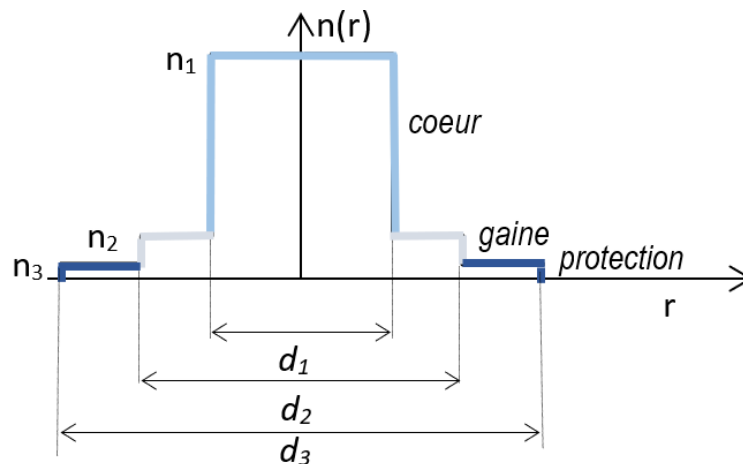


Figure 3: Distribution de l'indice de réfraction d'une fibre à saut d'indice

3.1.2 Types d'une fibre optique

Il existe deux paramètres permettant de classer les fibres soit la longueur d'onde de coupure et la fréquence normalisée. Il existe deux grands types de fibres optiques :

- La fibre optique multimode : elle a un cœur ayant un plus gros diamètre d'environ $d = 50 - 105 \mu\text{m}$ dans lequel il existe différents modes de propagation de la lumière. La fibre multimode est utilisée pour des signaux lumineux de longueur d'onde compris entre 800 nm et 1300 nm.
 - Débit compris entre 100 Mbits/s et 1 Gbits/s
 - Portée maximale : environ 2 Km
 - Affaiblissement : 10 dB/Km
- La fibre optique monomode a un cœur de petit diamètre. L'onde lumineuse n'a qu'un seul mode de propagation possible, le mode en ligne droite. Le signal est transmis sans déformation. Pour des signaux de longueur d'onde compris entre 1280 nm et 1640 nm, on peut utiliser une fibre monomode.
 - Débit de plus de 100 Gbits/s
 - Portée maximale : environ 100 Km
 - Affaiblissement : 0,5 dB/Km

3.1.3 Caractéristiques principales de la fibre optique

La fibre optique est caractérisée par sa longueur d'onde de coupure, son ouverture numérique, sa fréquence normalisée, son atténuation, sa bande passante et sa dispersion.

3.1.3.1 Ouverture numérique

L'ouverture numérique (ON) représente le cône d'acceptance des angles d'entrée de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte dans le cœur de la fibre par réflexion totale. L'ouverture numérique s'exprime comme suit (5):

$$ON = \sin\alpha_{max} = \sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2} \quad (5)$$

3.1.3.2 Longueur d'onde de coupure

C'est la longueur d'onde de référence qui permet de déterminer si la fibre est monomode ou multimode. Si la longueur d'onde de la lumière utilisée est inférieure à λ_c , la fibre est multimode ; sinon elle est monomode.

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} ON \quad (6)$$

Où a est le rayon du cœur de la fibre.

Lorsque la lumière traverse un matériau, sa vitesse diminue. L'indice de réfraction est une grandeur adimensionnelle caractéristique des propriétés optiques d'un matériau et il est obtenu en divisant la vitesse de la lumière dans le vide (C) par la vitesse de cette même onde, v , dans le matériau.

$$n = \frac{C}{v} \quad (7)$$

La calibration de l'échelle des indices s'effectue à partir de la connaissance de la différence d'indice relatif normalisée Δn (8) et qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta n = \frac{n_{coeur} - n_{gaine}}{n_{coeur}} \quad (8)$$

3.1.3.3 Fréquence normalisée

La fréquence normalisée V (9) permet aussi de déterminer le nombre de modes dans une fibre optique.

$$V_{\text{coeur}} = \frac{2\pi a}{\lambda} ON \quad (9)$$

Un seul mode se propage dans la fibre lorsque $V < 2,405$; il s'agit du mode fondamental LP_{01} (Linéairement Polarisé), et la fibre est dite monomode. Cependant lorsque $V > 2,405$ plusieurs modes se propagent dans la fibre, il s'agit donc d'une fibre multimode.

3.1.4 Théorie de la propagation du rayon lumineux dans la fibre

Les travaux de recherches scientifiques de John Tyndall en 1870, ont permis de démontrer que la réflexion totale interne de la lumière dans un jet d'eau permettait un guidage de cette lumière à l'intérieur de ce jet d'eau [1]. Dans le cas de la fibre optique, la lumière est confinée par réflexion totale aux interfaces de contacts (supérieure et inférieure) entre le cœur et la gaine. Sa propagation, dans le cœur, suit un trajet en forme de zigzag (Figure 4). Ce trajet, défini par la réflexion et la réfraction aux interfaces, est expliqué par la loi de Snell-Descartes (10) qui formule la dépendance entre l'angle incident (ou réflexion) i et l'angle de réfraction r d'un rayon lumineux incident à l'interface de deux milieux ayant différents indices de réfraction n_1 et n_2 (Figure 4).

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (10)$$

Avec i et r qui représentent respectivement l'angle incident et l'angle de réfraction par rapport à l'axe normale N .

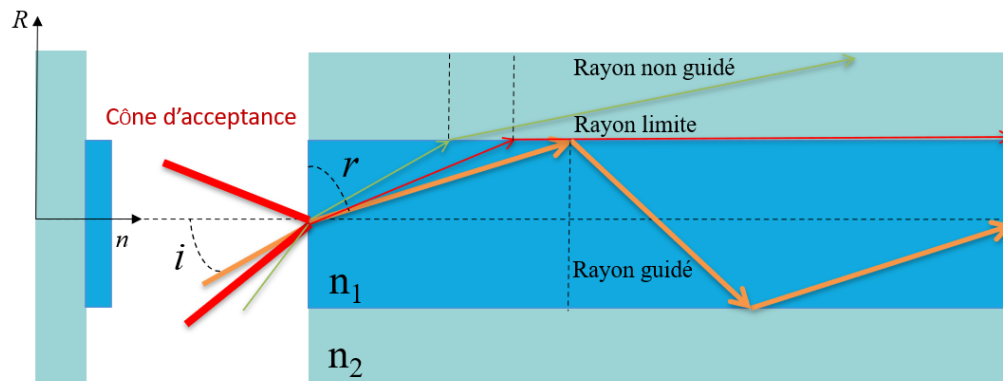


Figure 4: Guidage par réflexion à l'interface cœur/gaine dans une fibre à saut d'indice

La lumière se propage le long de la fibre par réflexion à l'interface cœur/gaine sous deux conditions. La première est que l'indice de réfraction du cœur doit être supérieur à celui de la gaine, ce qui permet au rayon lumineux de s'écarter de l'axe normal. Concernant la deuxième condition, l'angle incident avec laquelle le rayon lumineux rentre dans la fibre doit être à l'intérieur du cône d'acceptance d'où le respect de l'équation (5), il s'agit du mode guidé, sinon on observe le mode de gaine (mode de fuite ou encore appelé mode non guidé).

3.1.4.1 Modes guidées et modes non guidées

Les modes sont des concepts incontournables dans le domaine optique. Connaître et surtout maîtriser leurs caractéristiques de propagation est très important pour la conception de nombreux dispositifs à base de fibres optiques [57] [58] [59] [60]. La théorie des modes est basée sur le comportement des ondes électromagnétiques. Les modes guidés sont les champs électriques et magnétiques solutions de l'équation de propagation (11), dont la forme est une onde progressive le long de l'axe de la fibre. Pour

analyser la propagation de la lumière dans les fibres optiques, nous supposons que la fibre optique est un matériau diélectrique linéaire, isotrope, homogène, sans perte, sans aucune source telle que des courants, des charges libres et un milieu ferromagnétique, l'équation de propagation scalaire (11) est déduite à partir des équations de Maxwell comme suit.

$$(\nabla^2 + k^2) \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Avec E le champ électrique, H le champ magnétique, k est le vecteur d'onde et ∇^2 le Laplacien qui s'expriment comme suit :

$$k = \sqrt{\mu E} \quad \text{et} \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (12)$$

Les solutions de l'équation de propagation (11) sont de la forme :

$$\vec{E}_0(z, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (13)$$

$$\vec{H}_0(z, t) = \vec{H}_0 e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (14)$$

Où \vec{E}_0 et \vec{H}_0 représentent les fonctions de distributions radiales d'amplitude du champs électromagnétique, β est la constante de propagation suivant l'axe oz. Les solutions (13) et (14) sont appelées les modes de propagation dans la fibre optique. Ces modes ont une dépendance spatiale et temporelle proportionnelle à $e^{j(\omega t - \beta z)}$.

Les équations (13) et (14) sont de nature vectorielle, cela implique que les solutions modales peuvent avoir des composantes soit longitudinales, soit transversales ou hybrides.

Les modes peuvent être classés comme :

- Modes transverses électriques TE_{lm} : $E_z = 0$ et $H_z \neq 0$

Le mode transverse électrique caractérise la propagation d'une onde électromagnétique avec des composantes dans l'axe transversal (oz) qui est l'axe de propagation nulle et non nulle pour les champs électrique et magnétique respectivement.

- Modes transverses magnétiques TM_{lm} : $H_z = 0$ et $E_z \neq 0$

Le mode transverse magnétique caractérise la propagation d'une onde électromagnétique avec un champ magnétique dans l'axe transversal (oz) et avec un champ électrique associé nul sur cet axe.

- Modes Hybrides : $E_z \neq 0$ et $H_z \neq 0$, généralement noté HE_{lm} ou EH_{lm} lorsque la composante magnétique, H_z , ou la composante électrique, E_z , a un effet dominant sur l'amplitude du champ transversal respectivement.

Pour notre projet de thèse, nous nous intéresserons aux fibres monomodes à saut d'indice. Dans ce cas un seul mode de propagation est excité, c'est le mode fondamental LP_{01} . En effet les modes LP_{0m} ne sont pas des modes exacts de la fibre (sauf pour le mode fondamental) mais ce sont des combinaisons des modes trouvés dans la théorie exacte du guide d'onde. Les modes LP_{0m} sont appelés modes de polarisation linéaire (LP) en utilisant l'approximation de fibre faiblement guidée : $\frac{n_{\text{gaine}}}{n_{\text{coeur}}} = 1$ introduite pour la première fois par Gloge en 1971 [61]. Cette approximation est valable pour les fibres monomodes classiques (SMF) puisque leur différence d'indice de réfraction (8) est de l'ordre de 0,3% à 1%.

3.1.5 Avantage et inconvénients de la fibre optique par rapport aux câbles en cuivre

La fibre optique présente des avantages multiples par rapport à leurs inconvénients. Toutefois, les inconvénients restent très largement acceptables devant ces avantages innombrables.

Nous pouvons résumer les inconvénients comme suit :

- Fibre très fragile
- Technologie assez chère et complexe
- Coût d'exploitation élevé
- Difficultés de raccordement, entre deux fibres et entre une fibre et d'autres équipements
- Nécessite de la main d'œuvre hautement qualifiée et expérimentée pour sa fabrication, ses raccordements, son installation et son entretien.

Face aux inconvénients cités, les avantages de la fibre optique restent de loin les plus nombreux :

- Très large bande passante par comparaison à celle des câbles en cuivre, de l'ordre de 1 GHz / km, qui permet le multiplexage en longueur d'onde.
- Capacité de détection distribuée sur de grandes distances
- Multiplexage de capteurs ponctuels
- Possibilité de détection à au moins deux paramètres
- Petite taille, mince, moins encombrante et légère de l'ordre de quelque gramme au kilomètre, 9 fois moins pesant que les câbles en cuivre.

- Atténuation des signaux lumineux plus faible que les signaux électriques
- Insensibilité aux perturbations électromagnétiques.
- Diélectrique (la silice est la matière première de la fibre qui lui confère cette immunité contre les interférences électromagnétiques et le rayonnement ionisant) ce qui lui permet de transporter plus d'informations en toute sécurité et avec une plus grande fidélité que le cuivre.
- Résistance aux conditions environnementales défavorables ; Moins d'influence des liquides corrosifs, gaz et variations de température comparé au cuivre.
- Les prix de la fibre restent faibles puisqu'ayant une matière première, en occurrence la silice (verre très pur composé de dioxyde de silicium), qui est très abondante et disponible.

3.2 Types de réseaux à fibre optique

Les réseaux à fibre optique consistent en une perturbation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre effectuée par différentes techniques. Selon la longueur de la période du réseau, on distingue deux catégories de réseaux : les réseaux de courte période (FBG) et les réseaux de longue période (LPG) comme le décrit Erdogan [62] [63]. La présentation des deux réseaux permet de faire une comparaison et de justifier notre choix porté sur le réseau LPG.

3.2.1 Réseau de courte période : FBG

Le réseau à courte période a une période inférieure au micron et permet de coupler l'onde lumineuse du mode de propagation directe de la fibre optique à un mode de

propagation inverse (Figure 5). Il s'agit de la longueur d'onde de couplage appelé la longueur d'onde de Bragg (15) [64]:

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (15)$$

Avec Λ la période de modulation du réseau et n_{eff} l'indice effectif.

L'équation (15) montre que la longueur d'onde de Bragg est régie par la période de la FBG et l'indice effectif du mode de propagation, de sorte qu'un changement de l'un de ces paramètres modifie cette longueur d'onde. En règle générale, les capteurs à base de FBG ont des longueurs de l'ordre de 5 mm, avec des sensibilités respectivement à la température et à la contrainte de $13 \text{ pm. } k^{-1}$ et $1 \text{ pm. } \mu\epsilon^{-1}$, pour des FBG ayant la longueur d'onde de fonctionnement de 1300 nm [65].

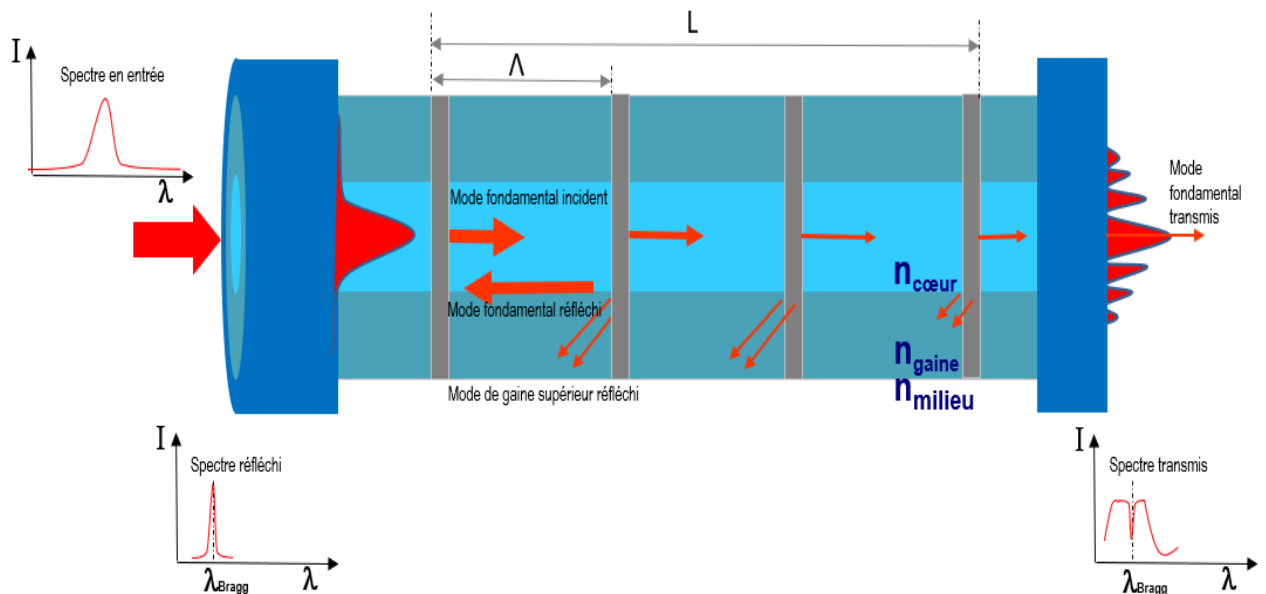


Figure 5: Couplage contre directionnel du mode cœur et du mode gaine dans le FBG.

Les constantes de propagation du cœur et de la gaine sont respectivement :

$$\beta_{coeur} = \frac{2\pi n_{coeur}}{\lambda} = kn_{coeur} \quad (16)$$

$$\beta_{gaine} = \frac{2\pi n_{gaine}}{\lambda} = kn_{gaine} \quad (17)$$

Avec k, le coefficient de couplage.

La condition de couplage de phases entre le mode cœur et le mode gaine est (18) :

$$\beta_{coeur} - \beta_{gaine} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (18)$$

Ainsi, pour qu'une onde électromagnétique puisse se propager dans le cœur de la fibre, la constante de propagation du mode guidé β_{coeur} dans le cœur doit satisfaire à la condition suivante [66]:

$$\beta_{gaine} \leq \beta_{coeur} \quad (19)$$

D'autre part, les modes de fuites, dans la gaine, par l'interface gaine-milieu environnant présentent une constante de propagation appartenant à l'intervalle :

$$kn_{milieu} \leq \beta_{gaine} \quad (20)$$

3.2.2 Réseau Longue période : LPG

Contrairement au réseau FBG, le réseau LPG a une plus longue période Λ , comprise entre 100 μm et 1 mm dans lequel le mode fondamental du cœur est couplé aux modes d'ordres supérieurs de la gaine à des longueurs d'onde de résonance spécifiques [8]. Le couplage du mode fondamental du cœur (LP_{01}) aux modes d'ordres supérieurs de la gaine

(LP_{0m}) allant dans la même direction. Ce couplage de phase est obtenu à la longueur d'onde de résonance λ_{LPG} (21) [67].

$$\lambda_{LPG} = [n_{coeur,eff} - n_{gaine,m,eff}] \cdot \Lambda \quad (21)$$

Où $n_{coeur,eff}$ est l'indice de réfraction effectif du cœur et $n_{gaine,m,eff}$ est l'indice de réfraction du $m^{ième}$ mode de gaine.

L'équation (21) montre que les longueurs d'onde de couplage dépendent de la période du LPG, aux indices de réfraction de la fibre [68]. Une toute petite variation de ces deux paramètres entraîne une modification des conditions d'adaptation de phase (23) pour le couplage aux modes de gaine ce qui entraîne une modification de la profondeur du spectre transmis. Cette profondeur de spectre représente la puissance minimale transmise et s'exprime comme suit :

$$T_m = \cos^2(k_m L) \quad (22)$$

Où L est la longueur du réseau LPG et k_m est le coefficient de couplage pour le $m^{ième}$ mode de gaine.

La Figure 6 présente le couplage de la lumière du mode fondamental guidé LP_{01} aux modes d'ordre supérieurs de la gaine LP_{0m} allant dans la même direction.

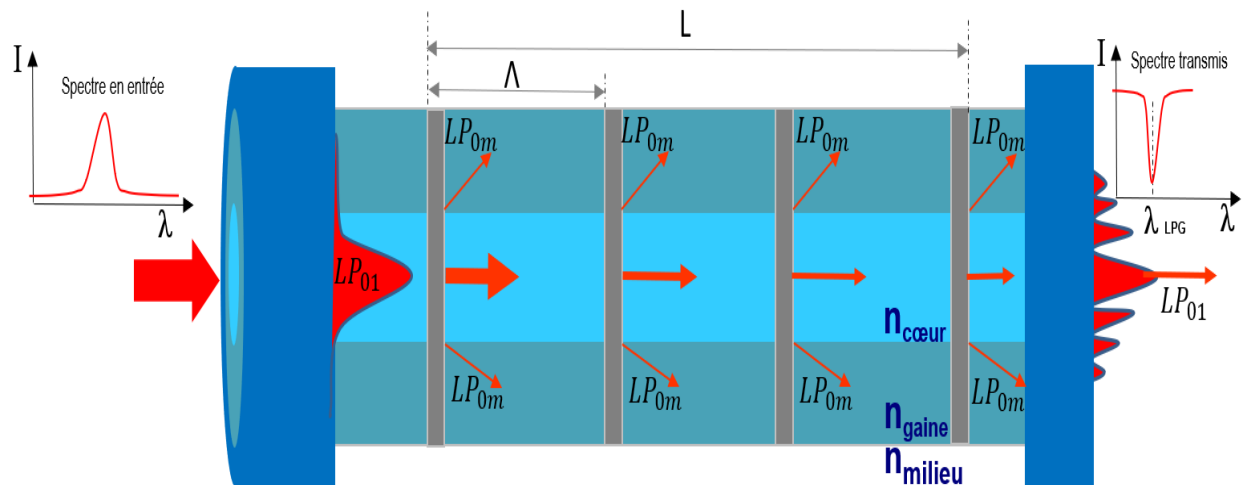


Figure 6: Couplage Co directionnel dans une longue période de réseau

Ce couplage est réalisé lorsque la condition de couplage de phase est atteinte (23) :

$$\beta_{\text{coeur}} - \beta_{\text{gaine},m} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (23)$$

Avec $\beta_{0m,\text{gaine}}$, la constante de propagation du $m^{\text{ième}}$ mode de gaine

En somme, la Figure 6 montre que l'onde lumineuse induite dans la fibre est perturbée lorsqu'elle traverse le réseau LPG. Tout le long du réseau, il y aura une Co propagation du mode fondamental du cœur et les modes d'ordre supérieur de la gaine, on parle donc de modes couplés avec LP_{01} pour le mode cœur et LP_{0m} pour le $m^{\text{ième}}$ mode de gaine.

3.2.3 Différences fondamentales entre les réseaux LPG et FBG

Le Tableau 1 récapitule les principales différences entre ces deux types de réseaux de fibres.

Tableau 1: Différences fondamentales entre les LPG et les FBG

Réseau longue période LPG	Réseau Bragg FBG
Période (Λ) comprise entre 100 μm et 1 mm	Période (Λ) inférieure à 1 μm
Propagation : couplage Co directionnel du mode de cœur et des modes supérieurs de gaine	Propagation : couplage contre directionnel du mode de cœur directe au mode de gain
Les spectres de transmission se composent de plusieurs bandes d'atténuation à différentes longueurs d'onde ($\cos^2(\kappa L)$), réflexion négligeable	Les spectres de transmission montrent que le FBG agit comme un filtre d'arrêt à bande étroite provoquant une transmission à une seule longueur d'onde de Bragg ($\cosh^{-2}(\kappa L)$)
Large bande passante de transmission spectrale	Étroite bande passante de transmission spectrale
Capacité de mesurer plusieurs paramètres	Capacité de mesurer uniquement 2 paramètres

3.3 Généralité sur les Capteurs à Fibres Optiques

Yu [69] définit le Capteur à Fibre Optique comme étant un dispositif qui, sous l'effet d'une grandeur physique que l'on souhaite mesurer, délivre une grandeur physique exploitable. Par rapport aux capteurs conventionnels, les capteurs à fibre optique présentent de nombreux avantages [70] [71]. Ces dispositifs sont compacts et légers, faciles à installer, peu coûteux et insensibles aux interférences électromagnétiques [72], qui sont des caractéristiques clés recherchées pour les applications de détection.

3.3.1 Composants du système de mesure à fibre optique

De façon générale, un capteur à fibre optique est composé d'une source lumineuse, de la fibre d'un récepteur optique, d'un système d'acquisition de données et de composants complémentaires (Figure 7).

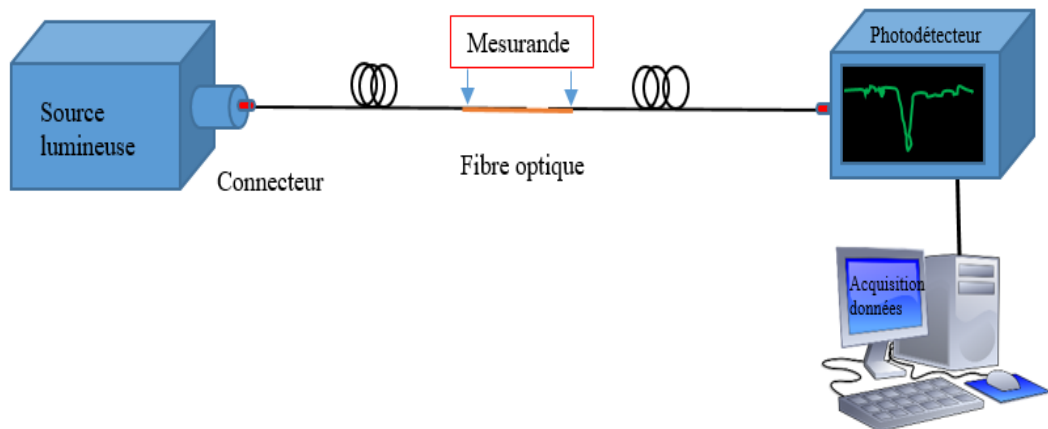


Figure 7: Composants de base d'un capteur à fibre optique

- La source lumineuse qui convertit le signal électrique en un signal optique.
- La fibre optique monomode qui guide l'onde lumineuse.
- Les composants optiques complémentaires (coupleurs, connecteurs, etc.).
- Le récepteur optique qui convertit le signal optique en un signal électrique.
- Le système d'acquisition qui recueille et traite les données.
- Un circuit d'alimentation en énergie.

3.3.2 Principe de fonctionnement

Une source lumineuse émet un signal qui peut être détecté par une photo détectrice qui lui à son tour émet un signal de sortie. Des grandeurs physiques, telles que la température, la contrainte, le déplacement et autres, vont provoquer des variations d'un paramètre optique du système. Le signal lumineux transmis ou réfléchi par la fibre peut ensuite être modulé en fréquence, en phase, en amplitude ou en polarisation.

3.3.3 Élément sensible de détection : caractère intrinsèque vs extrinsèque

Sur la base de l'emplacement de détection, la norme NFC 93-800 (1991) [73] stipule qu'un capteur à fibre optique peut être classé comme extrinsèque ou intrinsèque.

Pour un capteur à fibre optique extrinsèque, la fibre est simplement utilisée pour véhiculer la lumière vers un dispositif optique externe où la détection a lieu. Contrairement pour un capteur à fibre optique intrinsèque, une ou plusieurs des propriétés physiques de la fibre subissent une modification. Les grandeurs physiques ou chimiques agissent sur la fibre et plusieurs caractéristiques de la fibre sont modifiées. Ces changements sont ensuite analysés et des conclusions en sont tirées. La fibre est donc le détecteur.

3.3.4 Distribution spatiale des capteurs à fibre optique

Selon [74], on peut classer les capteurs à fibres optiques selon la surface mesurée :

- Capteur de point : il mesure un paramètre à un point discret,
- Capteur distribué : il mesure un paramètre tout le long d'une fibre optique avec une résolution spatiale donnée,

- Capteur quasi-distribué : il mesure une ou plusieurs paramètres en des points discrets situés sur une seule fibre optique (par exemple, une série de réseaux FBG ou LPG inscrits sur le long d'une fibre optique).

3.3.5 Classifications des capteurs à fibre optique

La connaissance des caractéristiques des modes de propagation permet de concevoir des capteurs à fibres optiques [57] [58] [75].

Pour un mode guidé se déplaçant le long de l'axe (oz) de la fibre avec une constante de propagation β , les vecteurs du champ électrique (E), mode fondamental (\vec{E}_0) et mode gain (\vec{E}_m), définis en coordonnées cylindriques peuvent s'écrire comme suit [59]:

$$\vec{E}_0(z, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega_0 t - \beta_0 z)} \quad (24)$$

$$\vec{E}_m(z, t) = \vec{E}_m e^{j(\omega_m t - \beta_0 z)} \quad (25)$$

Les équations (1) et (25) montrent que les modes ont une dépendance spatiale et temporelle proportionnelle à $e^{j(\omega t - \beta z)}$ et définissent la classe de chaque capteur à fibre optique selon le paramètre à mesurer.

3.3.5.1 Capteur à modulation d'amplitude (ou d'intensité) [76] [77]

Le paramètre de l'onde sensible au mesurande (la grandeur que l'on veut mesurer) est l'amplitude du champ électrique. Il s'agit de l'atténuation ou de l'amplification de l'intensité : $I = |E_0|^2$. Ces capteurs à fibre optique basés sur l'intensité reposent sur le signal subissant une perte. Deux techniques sont principalement utilisées : soit des variations de couplage, soit la création de pertes optiques par modification de micro-

courbures de la fibre sous l'effet de contrainte. Le capteur basé sur l'intensité nécessite par ailleurs plus de lumière et utilise donc généralement des fibres à grand cœur multimodes [78]. Sa limite est que les variations d'intensité de la source lumineuse peuvent fausser les lectures.

3.3.5.2 Capteur à modulation de polarisation [79]

La sensibilité du capteur est dépendante du degré de rotation de polarisation du vecteur \vec{E}_0 induite par le mesurande et de la rotation minimale détectable. Le mesurande va faire tourner la polarisation entraînant une variation d'intensité vue par le détecteur (polariseur). Il s'agit donc du déphasage de deux ondes polarisées s'étant propagées dans le même chemin.

3.3.5.3 Capteur à modulation de phase (interféromètre de Fabry-Pérot) [80]

Les capteurs à modulation de phase utilisent les changements de phase de la lumière pour la détection. Le mesurande va affecter la différence de phase des deux ondes ayant parcouru des chemins différents, soit : $\Delta\phi = \phi_m - \phi_o$ avec $\phi_i = \beta_{iz}$ dans les équations (1) et (25). Cette modulation de phase est ensuite détectée de manière interférométrique, en comparant la phase de la lumière dans la fibre de signal à celle d'une fibre de référence (principe de l'interférométrie).

3.3.5.4 Capteurs à modulation de la longueur d'onde

Le paramètre de l'onde sensible au mesurande est la différence des constantes de propagation : $\delta\beta = \beta_{coeur} - \beta_{gaine} = \frac{2\pi}{\lambda}$. Les capteurs à modulation de longueur d'onde utilisent les changements de longueur d'onde de la lumière pour la détection. Il s'agit donc

de la variation verticale ou horizontale de la position de la longueur d'onde de résonance ou de la variation de la largeur spectrale.

Dans notre travail de thèse, nous nous sommes uniquement intéressés aux capteurs à modulation de la longueur d'onde utilisant des réseaux LPG inscrits dans la fibre optique comme élément sensible. Ces derniers découlent de la photosensibilité des fibres dopées au germanium découverte au Canada par Hill et al. [81].

3.4 État de l'art des capteurs à fibre pour la mesure du gradient de température

Dans notre étude, nous nous intéressons particulièrement à la mesure de deux grandeurs physiques : température et gradient de température.

3.4.1 Capteur à fibre optique à base de FBG

Othonos et Kalli [82] ont présenté les tous premiers dispositifs à fibre optique pour la mesure de la température. Parmi ceux-ci, les capteurs à fibre optique à base de réseaux FBG [83] [84] sont plus intéressantes pour une détection distribuée, mais leur sensibilité à la température s'est avérée très petite et limitée par leur petite réflexion arrière ($\sim 0,01$ nm/°C).

Face aux réflexions des réseaux LPG, Starodumov et al. ont proposé une technique alternative qui utilise un capteur de température de fibre à base d'interféromètre qui est indépendant de la polarisation et sa sensibilité élevée à la température ($\sim 0,99$ nm / K) [85]. Cependant, ce capteur à fibre de température requiert des composants volumineux

tels qu'un contrôleur de polarisation ou des polariseurs et est peu pratique pour une détection distribuée.

Les premiers réseaux FBG exposés aux températures très élevées, étaient complètement détruite. C'est ainsi que les scientifiques Lowder et al. ont proposé un nouveau type de réseau de Bragg à fibre optique (FBG) pouvant être utilisé dans les applications de détection à haute température (à environ 1100 °C) [86]. Il s'agit d'un réseau FBG formé en modifiant physiquement la géométrie de la fibre. Cependant, le processus de fabrication du réseau de relief de surface est plutôt complexe et fragilisait d'avantage le réseau.

Un sujet particulièrement important concerne la mesure de la température sur de grandes distance permettant d'obtenir la distribution de la température. En raison de leur petite taille et de leur largeur spectrale étroite, un agencement de plusieurs FBG peut être utilisé pour mesurer la distribution de la température et les gradients thermiques. Cependant, la mesure du gradient thermique est impossible avec **un seul** réseau FBG.

Shen *et al* [87] ont développé deux types de capteurs à fibres optiques pour mesurer le flux de chaleur dans un matériau de revêtement réfractaire. Il s'agit d'une détection de la durée de vie de la fluorescence et le pic de changement de longueur d'onde d'une fibre à réseau de Bragg. Hirayama et Sano [88] ont développé puis intégré une fibre à réseau de Bragg dans un boîtier de capteur électrique conventionnel afin de pouvoir être installé facilement dans les systèmes d'instrumentation ; ils ont mesuré une sensibilité à la température de 10,3 pm/°C. En plus des FBG, divers types de méthodes de mesure de la température ont

été développés à l'aide de fibres optiques, notamment la radiation et la pyrométrie à corps noir, l'absorption, la diffusion intrinsèque, diverses formes d'interférométrie et les techniques basées sur la fluorescence [89]. Comparés aux systèmes utilisant des **réseaux de fibres**, les capteurs de fibres basés sur MMF (*multi modes fiber*) offrent des avantages tels que le fonctionnement à faible coût et à haute température [90] [91]. Cependant, ces capteurs de température basés sur du MMF conventionnel ont généralement de petites sensibilités à la température basse d'environ 0,01 nm/°C et 0,05 nm/°C.

Bien que la mesure de la température soit relativement simple avec les FBG et les LPG, **les gradients de température posent un problème**. Jusqu'ici, les gradients de température [92] [93] ont d'abord été mesurés avec des FBG à pulsion linéaire dans lesquels ils provoquent des modifications de la bande passante. En 2014, Ricchiuti *et al* [94] ont proposé un capteur à base de réseau FBG de 10 cm de long pour la mesure du gradient de température et la distribution de température avec une résolution spatiale de 1mm. Plusieurs capteurs à base de réseau FBG à fibres chirpées linéairement ont été développés pour des applications biomédicales pour mesurer les gradients thermiques sur de plus petites longueurs [95] [96] [97] [98] [99] [100]. **Cependant, la sensibilité aux gradients de température enregistrée est assez faible pour une mesure satisfaisante.**

3.4.2 Capteur à fibre optique à base de LPG

Le capteur de température à fibre optique à base de LPG peut provoquer des modifications indésirables de la réponse spectrale en raison de la sensibilité aux contraintes mécaniques [101]. Les scientifiques James et Tatam [102] ont démontré une

sensibilité thermique des LPG standard en fibres de verre beaucoup plus grande que les FBG d'où un intérêt pour la mesure de gradient thermique. Sur cette base, d'autres chercheurs Min et al [103] ont récemment développé un capteur à base de LPG écrits dans des fibres polymère PMMA ayant une sensibilité à la température de 276 pm/°C.

Les réseaux à longue période sont sensibles à plusieurs grandeurs physiques [102] [104]. Leur bande passante plus large est un avantage pour leur insertion dans diverses applications spécifiques. Grâce à leur large bande passante et à leur principe de fonctionnement, les LPG permettent de fabriquer des interféromètres intermodaux de Mach-Zehnder dans la fibre [105], dans lesquels ils servent à la fois de couplage / recombinaison et de détection. Les chercheurs Youngquist, Brooks et Shaw [106] ont développé mécaniquement le premier réseau de fibres à longue période en 1983. Avec l'avancée des techniques d'inscription des réseaux LPG, Hill et al. [107] [108] ont proposés des réseaux LPG inscrits par photo-induction dans les fibres optiques. Silveira et ses collaborateurs [109] ont présenté les effets de la non-linéarité et de la sensibilité croisée dans la condition de résonance du LPG résultant des effets combinés de la température et de la déformation mécanique.

Il n'existe cependant aucune littérature sur la mesure de gradients de température avec les LPG. En Voilà donc une autre motivation de notre thèse. Ce n'est que récemment que notre équipe de recherche a démontré théoriquement puis confirmé par des expériences [54] que les LPG sont sensibles aux gradients de température.

3.5 Conclusion

Le chapitre 3 présente tout d'abord la fibre optique et son principe de fonctionnement. Nous présentons les avantages à utiliser la fibre optique pour la conception de capteur par rapport à l'utilisation du câble en cuivre. Dans ce chapitre, nous présentons également les raisons pour lesquelles notre choix s'est porté sur le réseau LPG au lieu du réseau FBG. La revue de la littérature démontre la suite naturelle dans le domaine de capteurs à fibre optique qui est de les appliquer à la mesure de température et de flux thermique. En utilisant les capteurs à fibre optique basés sur les réseaux, le flux thermique est directement mesuré sans toutefois appliquer la loi de fourrier pour le flux et donc moins de mesures et moins d'incertitude. Cette thèse répond à ce besoin avec quatre études précises : (1) « ce les deux techniques d'inscription du LPG qui nous ont permis de fabriquer la nouvelle architecture des réseaux longues périodes. » ; (2) : « Nos résultats qui démontrent pour la toute première fois qu'il est possible de prédire les sensibilités aux gradients de température et de la température sans toutefois appliquer la loi de Fourier. » ; (3) « Nos résultats des sensibilités aux gradients de température et à la température moyenne obtenues avec un seul réseau longue période. Des sensibilités obtenues par deux réseaux longue période non uniformes mis en cascade ; (5) « Les résultats des mesures simultanées de la température moyenne T_{moy} et de la différence de température ΔT des réseaux LPG installés dans des blocs de béton. » .

4 Capteur à fibre optique basé sur les réseaux LPG

4.1 Grandeurs physiques mesurées avec un capteur à fibre optique à base de LPG

Contrairement aux FBG, les LPG sont sensibles à plusieurs facteurs externes qui ont été utilisés pour le développement des divers capteurs fibres optiques [110] [111] [112]. L'équation (26) exprime les sensibilités du LPG aux physiques et mécaniques externes :

$$\frac{\delta\lambda_{LPG}}{\lambda_{LPG}} = K_T\delta T + K_\varepsilon\delta\varepsilon + K_b\delta b + K_n\delta n + K_P\delta P \quad (26)$$

Avec K_T , K_ε , K_b , K_n , K_P les coefficients de sensibilités à la variation respectivement de la température, de l'allongement, de la torsion, de l'indice de réfraction et de la pression.

La mesure des grandeurs physiques et mécaniques externes résulte de la technique de fabrication du réseau dans la fibre monomode. Il est donc nécessaire de présenter la méthode d'inscription du réseau LPG dans cette thèse de doctorat.

4.2 Techniques de fabrication du réseau LPG

Rappelons que le LPG est une modulation périodique des propriétés optiques de la fibre. Il peut donc s'agir d'une modification permanente de l'indice de réfraction du cœur ou d'une déformation physique de la fibre. Les différentes techniques de fabrication du réseau LPG sont les suivantes :

- Irradiation ultraviolette (UV) [101] [113] [114],
- Implantation ionique [115],
- Irradiation par impulsions femtosecondes dans l'infrarouge [116],

- Irradiation par des lasers à CO₂ [117] [118],
- Déformation mécanique [119] [120],
- Décharge d'arc électrique [121] [122] [123] [124].

Parmi ces techniques de fabrication des réseaux LPG, les techniques par décharge l'arc électrique et l'irradiation par laser à CO₂ ont été utilisées pour la fabrication des nouveaux réseaux LPG dans ce travail de recherche. La technique par décharge d'arc électrique a le plus grand nombre d'avantages comparés aux autres méthodes. Il s'agit d'une technique point par point, simple, flexible et qui ne nécessite pas de sources lumineuses coûteuses. Contrairement aux autres méthodes, la méthode par décharge d'arc électrique et l'irradiation par des lasers à CO₂ permettent l'écriture de LPG dans toutes les catégories de fibres telles que : les fibres photosensibles [125] [106] [126] et non photosensibles [121] [122]. De plus, les réseaux fabriqués possèdent une stabilité thermique élevée d'où la création de capteurs à haute température. Enfin, cette technique est chimiquement inoffensive et peu coûteuse.

Notre objectif premier est de développer de nouvelles architectures de réseau LPG. Pour ce cela, nous devons avoir une certaine flexibilité pour modifier certaines caractéristiques spectrales de la fibre et la méthode par décharge d'arc électrique nous offre cette grande flexibilité. Cette technique est donc la meilleure dans le cadre de notre étude à cause de sa simplicité et de sa flexibilité, ainsi que du faible coût de fabrication et de son applicabilité non seulement aux fibres photosensibles couramment utilisées, mais également aux fibres de cristal photonique, qui sont constituées de silice pure [127]. Il est

donc possible de personnaliser le profil d'écriture (par exemple avoir un réseau à périodes variables ou des gradients d'indice de réfraction).

4.3 Fabrication du réseau LPG par décharge d'arc électrique

Tous les LPG étudiés dans le cadre de ce travail ont été fabriqués au Centre de recherche en photonique (CRP) de l'UQO. Nous présentons l'ensemble des instruments utilisés et une description détaillée de la fabrication des réseaux LPG dans cette section qui est similaire à celui de Kalachev et Pureur [128].

4.3.1 Matériels de la configuration de fabrication

La Figure 8 présente le schéma du dispositif de fabrication des réseaux LPG composé de :

- Source lumineuse *Agilent 83437A*
- machine d'épissure par fusion *FITEL*
- Analyseur de spectre optique *OSA Agilent 86142B*
- Fibres optiques monomodes photosensibles
- Table motorisée et ordinateur
- Poids de masse $m = 3,22 \text{ g}$

4.3.2 Principe de fonctionnement du montage

Une section de la fibre optique sans son revêtement de protection est placée entre les électrodes d'une machine d'épissure (fusion de fibre) et fixée sur une table motorisée se plaçant horizontalement. L'une des extrémités de la fibre est maintenu serré sur la table et

l'autre extrémité est attachée à une masse de 3,22 g. Cette masse permet de maintenir la fibre sous une tension axiale constante, on parle alors de relaxation partielle de contrainte mécanique.

La fibre, en position horizontalement droite, se déplace d'une distance équivalente à la période du réseau Λ_{LPG} (400 μm - 700 μm) entre les deux électrodes d'une machine d'épissure par fusion (écriture point par point) après chaque décharge. La décharge électrique (de 8,5 mA à 10 mA) est faite sur la longueur dénudée de la fibre durant 12 ms à 20 ms. En effet, selon [129], la décharge d'arc électrique est un phénomène durant lequel les électrons sont émis par la cathode en raison du champ électrique de haute intensité généré à la pointe des électrodes. Ces électrons, en transit entre les électrodes, ionisent les atomes d'azote et d'oxygène créant un plasma à haute température. La séquence de déplacement de la fibre est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que l'atténuation désirée du pic de perte soit obtenue. Le nombre de périodes du réseau LPG est augmenté au niveau souhaité en répétant l'ensemble du processus avec un nombre spécifique de fois.

Durant la fabrication, les spectres des réseaux sont contrôlés à partie d'un analyseur de spectre optique. La partie exposée de la fibre est légèrement déformée en raison de la contrainte latérale créée par le poids de traction, créant une micro-courbure périodiquement. L'amplitude de la micro-courbure est contrôlée par la durée d'exposition à l'arc électrique et de la puissance de décharge. Ces étapes sont répétées jusqu'à l'obtention de la longueur de réseau voulue ayant une atténuation la plus minimale. La période de réseau est donc principalement déterminée par l'étape de déplacement de l'étage

de translation qui est contrôlé par un ordinateur et par certains autres facteurs tels que :
l'intensité de l'arc, la durée de l'arc, le poids de traction.

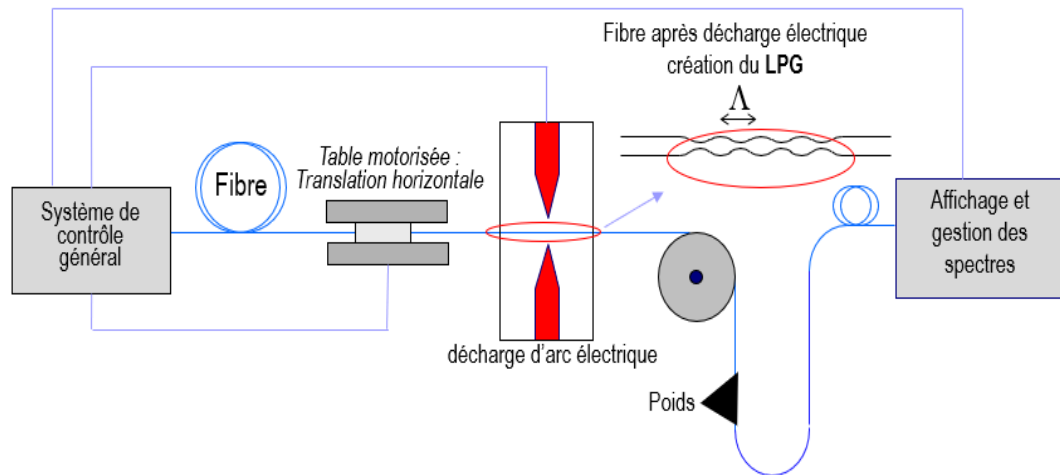


Figure 8:Dispositif de fabrication de réseau LPG par la méthode de décharge d'arc électrique.

Avant la fabrication des réseaux, il faudrait parfaitement régler tous les éléments du montage [130]. La poulie et la masse permettent un mouvement dans le plan perpendiculaire à la direction du déplacement horizontal de la fibre lors de la fabrication des réseaux. Un problème important à éviter, outre le bon alignement du système, est la propreté des deux électrodes. Pour éviter la contamination de la fibre, les électrodes doivent être nettoyées avec de l'alcool et la fibre avec de l'acétone. De plus, avant de placer la fibre entre les électrodes, quelques décharges d'arc doivent être effectuées pour nettoyer les électrodes de la poussière ou des particules de SiO_2 .

4.3.3 Propriétés du réseau LPG induits par décharge d'arc électrique

Les réseaux fabriqués par décharge électrique sont plus attrayants pour plusieurs applications parce qu'ils ont des propriétés de performances supérieures comparées aux réseaux fabriqués par la méthode de laser UV. On distingue entre autres une stabilité à très hautes températures et donc ces réseaux peuvent être utilisés pour des capteurs à haute température pour une application telle que la chaudière de centrales électriques, où peu de capteurs de température peuvent y résister. Aussi avec la technique de décharge électrique, nous avons obtenu de plus grandes sensibilités à la température et aux gradients de température en modifiant les paramètres du processus de fabrication du réseau. Aussi en faisant le bon choix des caractéristiques de la fibre (exemple : avoir $\lambda = 1550$ nm [131], ce qui fournirait une sensibilité plus élevée aux paramètres externes de détection [30,31] [132]). Parmi les paramètres modifiables, on distingue le type de fibre, la période et la longueur des réseaux, les paramètres de décharge de l'arc (énergie des impulsions, la durée des impulsions, la vitesse de répétition), la tension de traction et également le traitement thermique de la fibre.

La déformation géométrique de la fibre est montrée à la Figure 9.

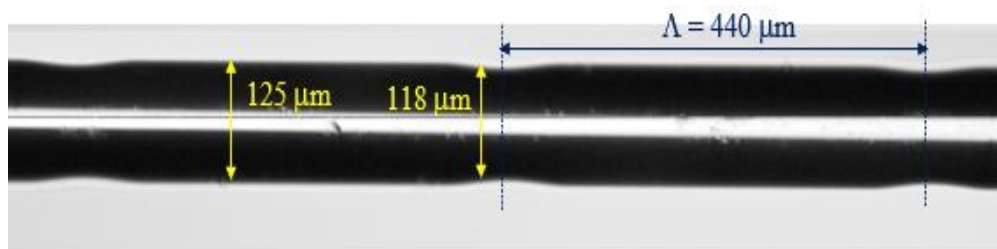


Figure 9: Déformations périodiques des surfaces de la fibre SMF28E exposées aux décharges

4.4 Fabrication du réseau LPG par la méthode d'irradiation au laser CO_2

La méthode de fabrication par un laser aux impulsions CO_2 est semblable à la méthode de décharge électrique et le réseau est écrit par le faisceau du laser concentré sur la surface de la fibre. Le laser CO_2 émet dans l'infrarouge jusqu'à $\lambda = 10,6 \mu m$. À cette longueur d'onde, le rayonnement laser est fortement absorbé par le SiO_2 puis est converti en chaleur et donc la partie de la fibre, exposée au rayonnement, est partiellement fondue. Cela introduit une relaxation des contraintes mécaniques gelées entre le cœur et la gaine au cours de leur solidification durant la fabrication de la fibre. La relaxation de ces contraintes mène aux changements de la géométrie de la forme de la fibre et de l'indice de réfraction.

On a utilisé le laser aux impulsions SYNRAD modèle 48-1 et une tête de balayage du faisceau FHFL30-U. La longueur d'onde du laser λ est de $9,3 \mu m$ à $10,6 \mu m$, la puissance optique moyenne est $P_{optique} = 14,78 W$, le diamètre du faisceau est $2w_0 = 3,5 mm$, sa divergence étant de 4 milliradians. La tête, de balayage de contour et de montage, jumelée avec son alimentation et termine par une lentille dont la distance focale est $f = 128 mm$.

Le faisceau se concentre sur la fibre et son rayon sur le plan focal est w donné par :

$$w = \frac{\lambda f}{\pi w_0} \quad (27)$$

Le rayon du faisceau est de $w \approx 230 \mu m$.

4.4.1 Matériels de la configuration de fabrication

Le dispositif expérimental pour la fabrication des réseaux se compose de (voir Figure 16) :

- Source lumineuse lumière blanche haute puissance *Super K Compact* (NKT Photonics)
- Analyseur de spectre optique OSA AQ6370C (Yokogawa)
- Système laser CO₂ *Synrad*
- Fibres optiques monomodes photosensibles PS1250/1500 (Fibercore)
- Masse $m = 3,22$ g

4.4.2 Principe de fonctionnement du montage

Pour fabriquer un réseau LPG, un morceau de fibre d'au moins 1 m a dû être clivé aux deux extrémités. La membrane protectrice de la fibre est retirée sur une longueur de 6 cm et cette section dénudée exposée à l'irradiation. Le clivage d'une fibre est une coupe contrôlée qui permet d'obtenir une face d'extrémité plate, plane et perpendiculaire à l'axe longitudinal de la fibre.

Le réseau LPG fabriqué à l'aide du laser CO₂ a été optimisé par le choix des paramètres de réseau (période Λ , nombre des périodes N). La modification de la différence des indices de réfraction effectifs Δn_{eff} est variée en manipulant la puissance optique relative du laser (en %) puisque Δn_{eff} augmente avec la puissance du laser. Certains paramètres du dispositif laser (puissance et vitesse de balayage du faisceau) sont contrôlés pour optimiser l'obtention d'un pic maximal.

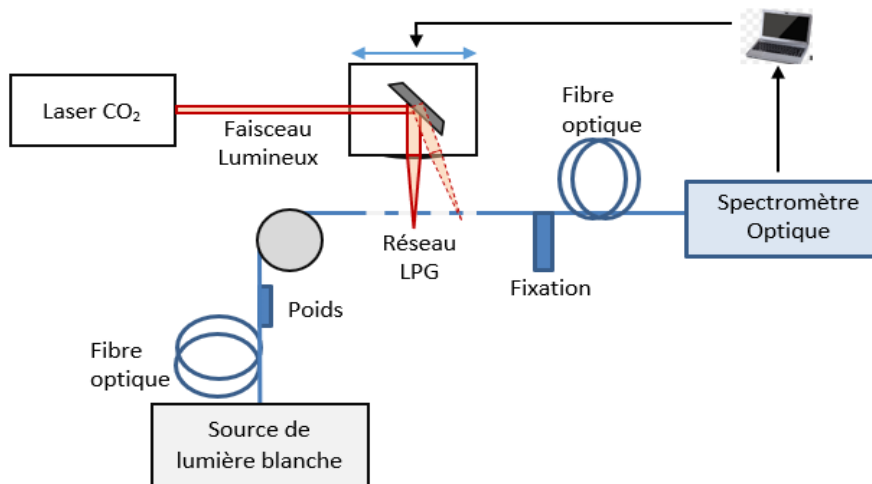


Figure 10: Dispositif de fabrication de réseau LPG par irradiation au laser CO₂

Le réseau est fabriqué sur la paroi latérale de la fibre en l'exposant au rayonnement infrarouge du laser qui modifie l'indice de réfraction à la fois du cœur et de la gaine et modifie aussi la forme de la géométrie de la fibre. Ces modifications varient avec le type de fibre. Pour une fibre de communications SMF28E, l'énergie relative du laser était entre 25% et 30% et la modification de la géométrie de la fibre est montrée à la Figure 11.

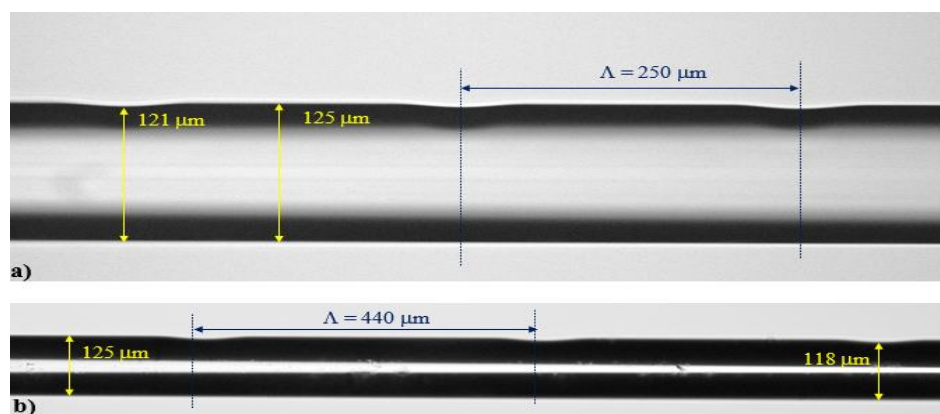


Figure 11: Déformations périodiques de la forme de la fibre introduites par le laser CO₂ sur une fibre SMF28E : a) changements latéraux de période $\Lambda = 250 \mu\text{m}$ à une puissance de 20% du laser ; b) changements latéraux de période $\Lambda = 440 \mu\text{m}$ à une puissance de 30% du laser.

Pour la fibre photosensible PS1250/1500 une énergie relative plus faible entre 11% et 13% était suffisante pour modifier Δn_{eff} et les changements géométriques sont négligeables.

Le Tableau 2 présente la comparaison des deux méthodes de fabrication de LPG réalisées au centre de recherche photonique de l'UQO.

Tableau 2: Méthodes d'inscription de réseau LPG dans la fibre optique

Méthode	Décharge par arc électrique	Irradiation par laser à CO₂
Matériel clé	Machine d'épissure de fusion	Laser CO ₂ aux impulsions
Procédure de fabrication	Facile ; Écriture manuelle ; Difficile à réaliser : $\Lambda_1 \neq \Lambda_2$; Très difficile à réaliser : $\Delta n_{eff,1} \neq \Delta n_{eff,2}$	Facile ; Écriture programmable ; Facile à réaliser : $\Lambda_1 \neq \Lambda_2$; Facile à réaliser : $\Delta n_{eff,1} \neq \Delta n_{eff,2}$
Stabilité thermique	Très stable (jusqu'à des températures provoquant une déformation du verre)	Très stable (jusqu'à des températures provoquant une déformation du verre)
Forme extérieure du réseau	Surface lisse ; Déformations circulaires.	Surface lisse ; Déformations latérales.
Polarisation	Faible sensibilité à la polarisation de la source	Forte sensibilité à la polarisation de la source
Période minimale	200 micromètres	100 micromètres
Reproductibilité	Moyenne	Comparable ou meilleur
Inscription	Point par point sans balayages multiples	Point par point. Permet des balayages multiples.
Coûts	Moins coûteux	Plus coûteux

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes techniques d'inscription des réseaux LPG dans une fibre optique ont été présentées. Nos réseaux LPG ont été fabriqués dans nos laboratoires par la décharge d'arc électrique et par le laser CO₂. Ces deux techniques ont été expliqués en détails suivi d'une comparaison de ces deux techniques qui sont finalement similaires nonobstant le coût d'investissement et leur vitesse de reproductibilité qui sont totalement différents.

La suite de ce travail est issue de nos différents articles publiés (3, 4 et 5), en cours de publication (6) et de nos présentations aux conférences scientifiques (1 et 2) :

1. M. Koffi, T. Eftimov, W. J. Bock, F.J. Lesage, and P. Mikulic, “Measurement of temperature and thermal gradients using fiber optic Long Period Gratings”, in Proc. Complex Days Conf., Nice, France, Jan. 11, 2018, pp. 17-24.
2. M. Koffi, T. Eftimov, F. Lesage, P. Mikulic, W. J. Bock, “Measurement of thermal gradients using long period gratings at different levels of ambient refractive indices”, in Proc. Complex Days Conf. Opt. Fiber Sensors, Lausanne, Switzerland, 2018, Paper TuE69.
3. M. Koffi, T. Eftimov, F. J. Lesage, P. Mikulic, W. J. Bock, “Measurement of thermal gradients using long period gratings at different levels of ambient refractive indices”, Special issue of J.of Lightwave Technolgy, May 20, 2019.
4. T.A. Eftimov*, N'G. Koffi, F.J. Lesage, P. Mikulic, W.J. Bock, “Thermal gradients sensing using LPGs with a spatially varying effective refractive index difference”, Optics and Laser Technology 122 (2020) 105836
5. T.A. Eftimov*, N'G. Koffi, F.J. Lesage, P. Mikulic, W.J. Bock, “Responses to temperature and thermal gradients of non-identical cascaded LPGs taking into account dispersion”, Optical Fiber Technology 55 (2020) 102098
6. N'G. Koffi, T. Eftimov, A. Arapova, F.J. Lesage, P. Mikulic, W.J. Bock, A. Cherif “Simultaneous measurement of thermal gradients and average temperatures in concrete blocks using non-uniform long period optical fiber gratings”

5 Capteur à fibre optique à base de réseaux LPG pour la mesure du gradient thermique dans des environnements ayant différents indices de réfraction

Ce chapitre retranscrit en majorité l'analyse de notre tout premier article intitulé, « *Measurement of thermal gradients using long period gratings at different levels of ambient refractive indices* » publié dans le *Journal of Lightwave Technology* en 2019 et présenté à la Conférences des capteurs fibres optiques OFC 2019 à Lausanne en Suisse (2018). Ce chapitre présente les premiers résultats théoriques et expérimentaux des réseaux LPG pour la mesure simultanée du gradient de température et de température. Ce résultat est l'accomplissement le plus marquant de cette thèse. En effet, les gradients thermiques entraînent des modifications de la profondeur de l'intensité minimale de couplage I_c , tandis que des changements de la température moyenne entraînent un décalage horizontal de la longueur d'onde de couplage λ_c . Cela prouve que les gradients thermiques $\frac{\Delta T}{\Delta X}$ et la température moyenne T_{moy} peuvent être mesurés indépendamment à l'aide d'un seul LPG contrairement au FBG. Les sensibilités à la différence de température et à la température moyenne des LPG dans l'air se sont révélées plus élevées que dans l'eau.

5.1 Mesure du gradient de température et de la température moyenne

5.1.1 Analyse théorique

La différence d'indice de réfraction du mode cœur et du mode gaine ainsi que la période de réseau sont tous deux dépendants de la température d'où la dépendance spectrale des LPG à la température. Ainsi, l'expression de la longueur d'onde centrale du réseau LPG (21) peut s'écrire comme suit :

$$\lambda_c (T) = \Delta n_{eff} (T) \cdot \Lambda (T) \quad (28)$$

La dépendance spectrale du LPG peut être trouvée en utilisant l'approche matricielle. La Figure 12 est une représentation matricielle du réseau LPG de N périodes de longueur $L = N \cdot \Lambda$.

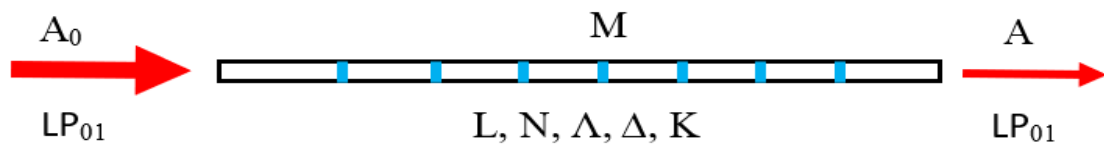


Figure 12: Représentation schématique du réseau LPG

Les performances du LPG sont théoriquement décrites à l'aide de la méthode matricielle selon laquelle l'amplitude du champ électrique entrant dans la fibre A_0 est transformée en une amplitude du champ électrique sortant A . L'équation (29) présente cette transformation à travers une matrice notée \mathbf{M} .

$$A = \mathbf{M} \cdot A_0 \quad (29)$$

Avec

$$A_o = \begin{pmatrix} A_{o,c} \\ A_{o,g} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} A_c \\ A_g \end{pmatrix} \quad (30)$$

Et \mathbf{M} [105] [133] [134] est la représentation matricielle du réseau LPG (31) :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} C + j\Delta S & jKS \\ jKS & C - j\Delta S \end{bmatrix} \quad (31)$$

Avec :

$$C = \cos(\delta\beta L) \text{ et } S = \sin(\delta\beta L)$$

$$\delta\beta = 2\sqrt{\delta^2 + \kappa^2}, \quad \Delta = \frac{2\delta}{\delta\beta}, \quad K = \frac{2\kappa}{\delta\beta}, \quad \Delta^2 + K^2 = 1 \quad (32)$$

La variation de la constante de propagation du mode cœur et des modes supérieurs gaine $\delta\beta$ dépend de la longueur d'onde λ à travers les coefficients de désaccord δ et de couplage κ des modes. Ces deux coefficients dépendent eux-mêmes de la température puisque Δn_{eff} et Λ sont en fonction de la température (voir équation (33)).

$$\delta(T) = \pi \left[\frac{\Delta n_{eff}(T)}{\lambda} - \frac{1}{\Lambda(T)} \right] \text{ et } \kappa(T) = \frac{\Delta\lambda_{oc}}{\lambda^2} \Delta n_{eff}(T) \quad (33)$$

Avec $\Delta\lambda_{oc}$, la bande passante du LPG et λ la longueur d'onde de fonctionnement.

À l'entrée du LPG, seul le mode fondamental LP_{01} est excité dans le cas de la fibre monomode, l'amplitude du champ électrique à l'entrée s'écrit donc : $A_0 = \begin{pmatrix} A_{o,c} \\ A_{o,g} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ et à la sortie du réseau, nous détectons également ce même mode. Après quelques manipulations algébriques des équations (29) (38) et (36), nous déterminons une expression pour le champ électrique dans le cœur de la fibre A_c . L'intensité normalisée de la lumière transmise peut être ainsi déterminée comme suit :

$$I = A_c \cdot A_c^* = |A_c|^2 \quad (34)$$

L'équation (29) devient donc :

$$\begin{bmatrix} A_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C + j\Delta S & jKS \\ jKS & C - j\Delta S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C + j\Delta S \\ jKS \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$A_c = C + j\Delta S \quad (36)$$

Alors, l'intensité de couplage I (réponse spectrale) du réseau LPG, devient :

$$I = C^2 + \Delta^2 S^2 = 1 - K^2 S^2 \quad (37)$$

Selon (33), contrairement au coefficient de couplage κ qui ne dépend que de Δn_{eff} , le paramètre de désaccord δ dépend de Δn_{eff} et de la période Λ . Alors en observant l'équation (28), un changement de la température entraîne un décalage de cette longueur d'onde de résonance qui à son tour agit sur la forme et la profondeur du spectre du LPG à cause du paramètre de désaccord. Cela implique que le coefficient $K^2 = \left(\frac{2\delta}{\delta\beta}\right)^2$ sera responsable des changements de la profondeur I_c du LPG et du déplacement horizontal de la longueur d'onde de résonance λ_c (voir Figure 12).

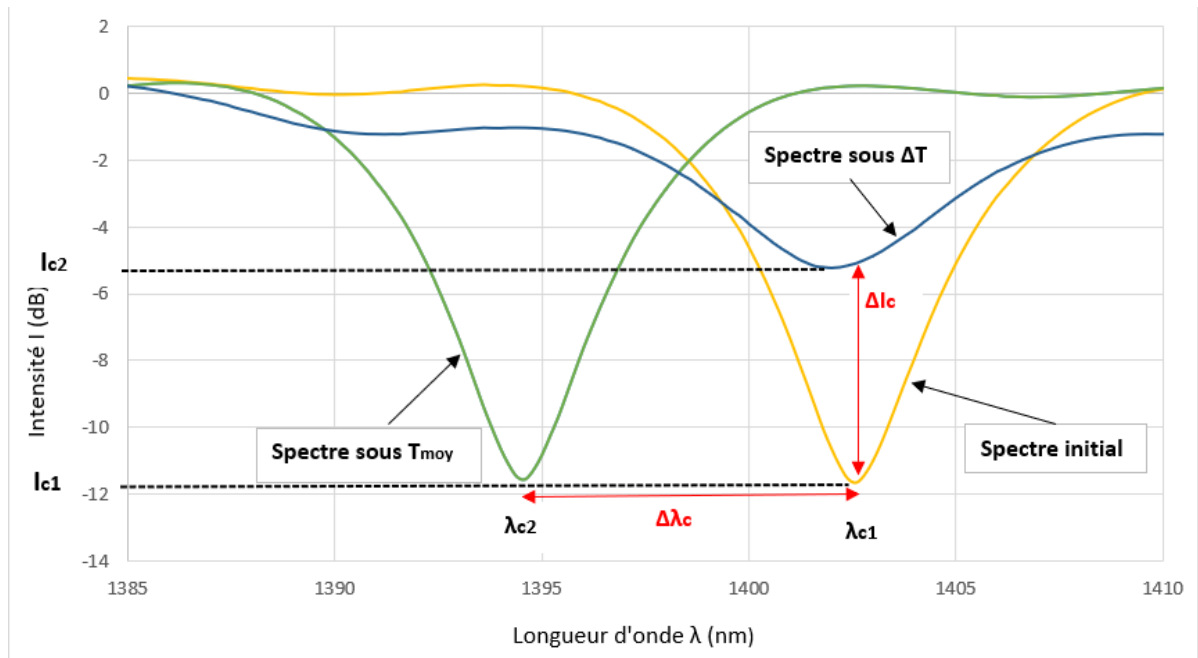


Figure 13: Comportement spectral du réseau LPG aux variations de température : changement de la profondeur de l'intensité et déplacement horizontal de la longueur d'onde de coupure

Le réseau LPG est donc caractérisé par Δn_{eff} et Λ (voir Figure 12). Ces deux paramètres seront étudiés en détails dans la suite dans nos travaux de recherche.

5.1.2 Simulation de la réponse spectrale du réseau LPG

On réalise une simulation numérique de différents modes de la fibre monomode à partir d'une programmation dans Excel développé dans au centre de recherche en photonique.

Cette programmation a pour but de simuler la propagation des modes dans les fibres optiques monomodes, et plus particulièrement ici dans les fibres conventionnelles SMF-28 (*Corning*) et fibres photosensibles (PS). Le mode LP_{01} est excité et se propage tout le long de la fibre jusqu'au réseau où un couplage du mode fondamental du cœur LP_{01} et des

modes supérieurs de la gaine LP_{0m} se réalise. On commence à insérer dans notre programme les différentes variables connues. Ces variables connues sont entre autres les périodes du réseau, la longueur d'onde de fonctionnement, la longueur du réseau, les indices de réfraction et d'autres caractéristiques du réseau. Par la suite les variables inconnues sont calculées grâce aux équations du programme. Une suite logique des variables calculées permet d'en déduire la puissance de transmission minimale et la longueur d'onde de couplage.

Bien avant la simulation proprement dite, il est important de mentionner qu'un seul réseau LPG est simultanément chauffé d'une moitié et l'autre côté est refroidi en utilisant deux modules Peltier (Figure 14). Ainsi le seul réseau, dont les deux moitiés sont exposées à des températures différentes (T_1 et T_2), se comporte comme deux réseaux LPG en cascades.

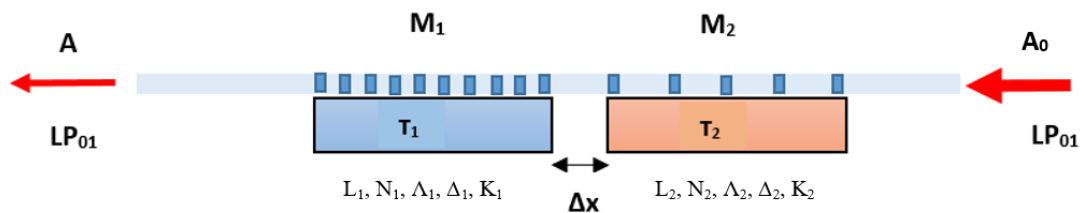


Figure 14: Simulation du gradient de température le long d'un LPG (Λ constant) à l'aide de deux module Peltier avec $T_1 \neq T_2$

Les longueurs d'onde de couplage de chaque moitié du réseau LPG se déplacent horizontalement dans un sens imposé par les valeurs de la température. Aussi, les

profondeurs minimales de chaque moitié de réseau se déplacent verticalement lorsque des différences de température leurs sont appliquées. Initialement nous avons $T_0 = T_1 = T_2$.

Une différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$ sur une distance ΔL crée ainsi un gradient de température selon une température moyenne de : $T_{moy} = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$.

En raison de leur dépendance linéaire thermique, la période et la différence d'indice de réfraction sont modélisés en supposant que $\Delta T_i = T_i - T_0$ de telle sorte que :

$$\Lambda_i(T) = \Lambda_{0,i} + S'_{\Lambda,i} \Delta T_i \quad (38)$$

$$\Delta n_{eff,i}(T) = \Delta n_{0,i} + S'_{\Delta n,i} \Delta T_i \quad (39)$$

$$\text{où} \quad S'_{\Lambda,i} = \frac{d\Lambda_i(T)}{\Delta T}, S'_{\Delta n,i} = \frac{d\Delta n_{eff,i}(T)}{\Delta T} \quad (40)$$

$S'_{\Lambda,i}$ est la sensibilité à la température de la période Λ avec $S'_{\Lambda,i} > 0$. $S'_{\Delta n,i}$ est la sensibilité à la température de Δn_{eff} , ici $S'_{\Delta n,i}$ peut être positive ou négative. ΔT_i est la variation de température de la $i^{\text{ème}}$ moitié ($i = 1,2$) le long du LPG par rapport T_0 (température initiale avant le chauffage ou le refroidissement), $\Lambda_{0,i}$ et $\Delta n_{0,i}$ sont respectivement les périodes et les différences d'indice de réfraction effectif des deux moitiés du réseau LPG à T_0 .

Dans nos simulations, nous cherchons à décrire le type de réponse I_c attendu en fonction du signe et des valeurs de la sensibilité $S'_{\Delta n,i}$ prédéfinis puisque $S'_{\Lambda,i}$ reste

toujours positif. Pour simplifier les simulations, nous représentons les différences de température comme suit :

$$\Delta T_i = T_i - T_0 = m\delta T_i \quad (41)$$

Avec δT une différence de température unitaire et $m = \pm\{1; 2; 3; 4; 5; \dots\}$ un entier naturel.

$$\Lambda_i(T) = \Lambda_{0,i} + mS'_{\Lambda,i} \delta T_i = \Lambda_{0,i} + m\sigma_{\Lambda,i} \quad (42)$$

$$\Delta n_{eff,i}(T) = \Delta n_{0,i} + mS'_{\Delta n,i} \delta T_i = \Delta n_{0,i} + m\sigma_{\Delta n,i} \quad (43)$$

Avec $\sigma_{\Lambda,i} = S'_{\Lambda,i}\delta T_i$ la sensibilité élémentaire à la température de Λ exprimée en nm/°C.

et $\sigma_{\Delta n,i} = S'_{\Delta n,i}\delta T_i$ la sensibilité élémentaire à la température de Δn_{eff} exprimée en riu/°C.

En faisant varier la valeur et le signe de m représentant le paramètre de la différence de température ΔT , nous simulons une augmentation progressive de ΔT de chaque moitié du réseau LPG, c'est-à-dire $\Delta T_1 = -\Delta T_2$.

La simulation de la dépendance des réponses spectrales pour la différence de température nous mène donc à définir Λ_1 et Λ_2 , ensuite $\Delta n_{eff,1}$ et $\Delta n_{eff,2}$:

$$\Lambda_1(T) = \Lambda_{0,1} + S'_{\Lambda,1} m\delta T_1 \quad (44)$$

$$\Lambda_2(T) = \Lambda_{0,2} - S'_{\Lambda,2} m\delta T_2 \quad (45)$$

$$\Delta n_{eff,1}(T) = \Delta n_{0,1} + S'_{\Delta n,1} m\delta T_1 \quad (46)$$

$$\Delta n_{eff,2}(T) = \Delta n_{0,2} - S'_{\Delta n,2} m\delta T_2 \quad (47)$$

Avec $\delta T_1 = T_1 - T_0$, $\delta T_2 = T_2 - T_0$ et $\Delta n_0 = \frac{\lambda_c}{\Lambda_0}$

Pour effectuer la simulation, plusieurs grandeurs sont fixées et d'autres calculées à partir des équations ci-dessus. La première fibre monomode utilisée est la fibre photosensible PS_368. Le seul réseau LPG inscrit dans la fibre se comporte comme deux réseaux uniformes et symétriques montés en cascade. En effet, deux modules Peltier installés à environ 1 mm en dessous du réseau LPG de telle sorte qu'un module chauffe une moitié du réseau et que le deuxième module refroidisse la deuxième moitié du réseau LPG simultanément. Ce principe permet de créer un gradient de température tout le long du réseau. Le réseau est dit symétrique lorsque $\Delta n_{01} = \Delta n_{02}$ (Figure 15). Ainsi, les deux moitiés identiques du réseau sont dans les mêmes conditions initiales de température et de pression d'où :

$$\Lambda_{0,1} = \Lambda_{0,2} = \Lambda_0 ; \Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0,2} = \Delta n_{eff,0} ; S'_{\Lambda,1} = S'_{\Lambda,2} ; S'_{\Delta n,1} = S'_{\Delta n,2}$$

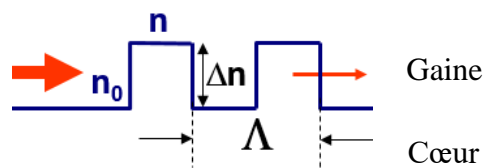


Figure 15: Variation de l'indice de réfraction dans la fibre Δn

❖ Les grandeurs fixes appelées valeurs d'entrée sont les suivantes :

$$\Lambda_0 = 250 \mu m ; \lambda_c = 1,55 \mu m ; \Delta \lambda = 0,043 \mu m \quad N_1 = N_2 = 100$$

$$\sigma_{\Lambda,T} = 0,01 \mu m/^\circ C ; \sigma_{\Delta n,T} = 0 \pm 1.10^{-6} \text{ riu}/^\circ C ; \Delta n_{eff,0} = 0,0062 \text{ riu}$$

Le paramètre de la différence de température m prend différentes valeurs comprises entre -10 et +10 pour simuler une augmentation graduelle de la différence de température, qui est $\Delta T > 0$ pour un côté, et $\Delta T < 0$ pour l'autre. C'est à dire $\Delta T_1 = -\Delta T_2$.

❖ Les grandeurs calculées :

$$\Delta n_{eff,0} = \frac{\lambda_c}{\Lambda_0} = \frac{1,55}{250} = 0,0062$$

$$L_0 = \frac{N_0 \cdot \Lambda_0}{1000}$$

❖ Les grandeurs calculées qui dépendent de m :

$$\Delta T_i = \delta T_i m ; \delta n = 0,0000015 * m ; m \delta T_1 = -m \delta T_2 = 0,00002^\circ C$$

$$\Delta n_{eff,1} = \Delta n_{0,1} + S'_{\Delta n,1} m \delta T_1 \quad ; \quad \Delta n_{eff,2} = \Delta n_{0,2} - S'_{\Delta n,2} m \delta T_2$$

$$\Lambda_1 = \Lambda_{0,1} + S'_{\Lambda,1} m \delta T_1 \quad ; \quad \Lambda_2 = \Lambda_{0,2} - S'_{\Lambda,2} m \delta T_2$$

L la longueur de chaque moitié du réseau ($i = \{1,2\}$)

$$L_i(T) = N_i \cdot \Lambda_i(T) \tag{48}$$

$$L_1 = \frac{N_1 \cdot \Lambda_1}{1000} \quad ; \quad L_2 = \frac{N_2 \cdot \Lambda_2}{1000}$$

δ (Paramètre de désaccord) et κ (paramètre de couplage) pour les deux moitiés du réseau ($i = \{1,2\}$) voir (33).

Les différentes grandeurs suivantes se réfèrent aux équations dans (32) :

$\delta\beta$ (Constante de propagation du mode cœur et des modes supérieurs de gaine)

$C_i; \Delta_i; S_i; K_i$ (Les composantes des matrices M pour les deux moitiés du réseau ($i = \{1,2\}$))

A_c (Le champ électrique dans le cœur)

$$A_c = C_1 C_2 - (\Delta_1 \Delta_2 + K_1 K_2) S_1 S_2 + j(\Delta_1 S_1 C_2 + \Delta_2 S_2 C_1) \quad (49)$$

I (La réponse spectrale du réseau)

$$I = [C_1 C_2 - (\Delta_1 \Delta_2 + K_1 K_2) S_1 S_2]^2 + [\Delta_1 S_1 C_2 + \Delta_2 S_2 C_1]^2 \quad (50)$$

I_{dB} (La réponse spectrale en décibel)

$$I_{db}(\lambda) = 10 \log I(\lambda) \quad (51)$$

La Figure 16 présente la réponse spectrale du réseau en fonction des différences de température imposées. En effet, en faisant varier la valeur et le signe du paramètre de la différence de température m , nous simulons une augmentation progressive de la différence de température qui est $\Delta T > 0$ pour un côté, et $\Delta T < 0$ pour l'autre. C'est à dire $\Delta T_1 = -\Delta T_2$. En posant comme hypothèse la similitude des deux moitiés réseaux issue du seul réseau initial lorsque le gradient de température est créé, nous calculons les coefficients de désaccord δ et de couplage κ de modes pour les deux longueurs d'onde de chaque réseau. Pour ce faire, les grandeurs $\Lambda_0; \lambda_c; \Delta \lambda; N; \sigma_{\Lambda, T}; \sigma_{\Delta n, T}$ et $\Delta n_{eff, 0}$ sont fixées puis, les grandeurs ne dépendant pas de m : $\Delta n_0; L_0$; sont calculées avant le calcul des grandeurs dépendantes de m : $\Delta T_i; \delta n; \Delta n_{eff, i}; A_i; L_i; \delta; \kappa; \delta \beta; C_i; \Delta_i; S_i; K_i$, pour $m \Delta T_1 = -m \Delta T_2$ soit $m \Delta T_1 = -m \Delta T_2 = 0,00002^\circ C$. Toutes ces grandeurs nous permettent de calculer l'intensité du couplage minimale I .

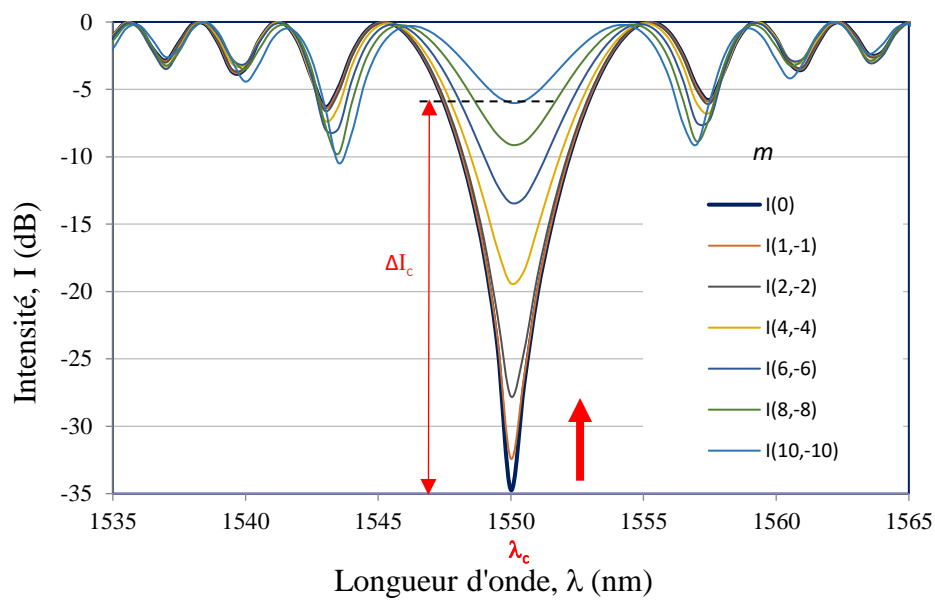


Figure 16: Simulations d'un réseau LPG aux différences de température ΔT

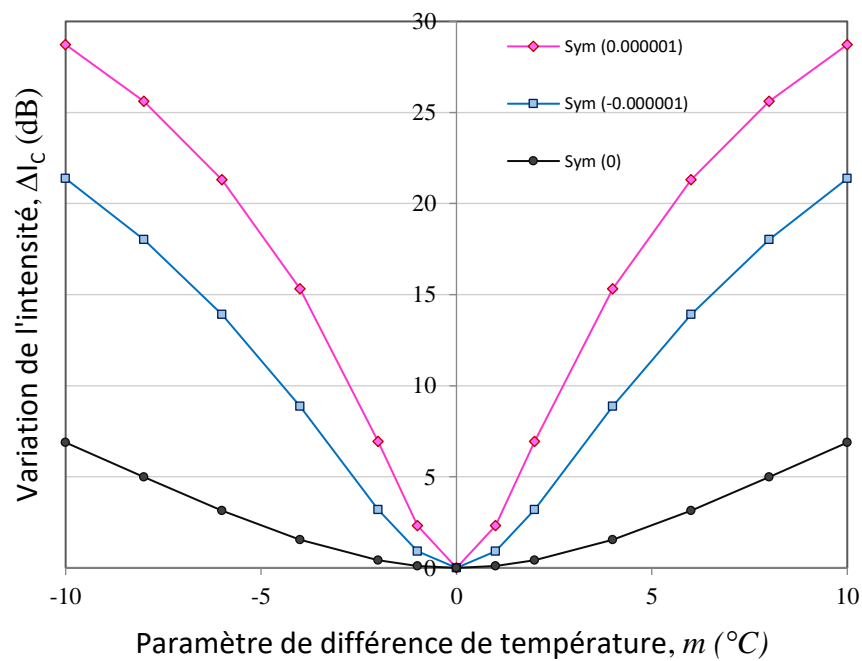


Figure 17: Variation de l'intensité à différentes valeurs du paramètre m

La Figure 17 montre la variation de l'intensité de couplage en fonction de la variation du paramètre m représentant la différence de température. Les résultats montrent que la profondeur I_c du LPG varie considérablement avec la différence de température ΔT et que la dépendance de la différence de l'intensité ΔI_c de ΔT est symétrique. Dans le cas d'une sensibilité nulle aux changements de température ($s_{\Delta n, T} = 0$), l'expression de l'intensité I_c en fonction de ΔT , soit $I_c = f(\Delta T)$ est moins prononcée (voir la ligne de couleur noir Figure 17).

En conclusion, ces simulations prédisent que la température moyenne T_{moy} peut être mesurée grâce au décalage horizontal de la longueur d'onde de couplage λ_c , tandis que le gradient $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ peut être mesuré selon du décalage verticale de l'intensité de couplage I_c du LPG.

5.2 Expérience et résultats

5.2.1 Montage expérimental (Matériels et procédure expérimentale)

Le dispositif expérimental est présenté à la Figure (20). La plage de la bande de la source lumineuse blanche Agilent 83437A se situe entre 1100 nm et 1700 nm. L'analyseur de spectre optique est un Agilent 86142B. Le Tableau 3 présente les trois échantillons de réseau LPG expérimentés.

Tableau 3:Spécifications des LPG testés

		Réseaux LPG	Méthode de fabrication

	Paramètres physiques (μm)	L(mm)	$\Lambda_0(\mu\text{m})$	
SMF-28	Diamètre : cœur/gaine 4 / 62,5	50	368	Arc électrique
PS1250/1500	Diamètre : cœur/gaine 4 / 62,5	50	368	Arc électrique
PS1250/1500	Diamètre : cœur/gaine 4 / 62,5	50	358	Irradiation par laser UV

La Figure 18 présente le montage expérimental utilisé dans le laboratoire du Centre de Recherche de l'Université du Québec en Outaouais. Le réseau LPG est situé dans la zone en rouge appelée zone de mesure (Figure 19).

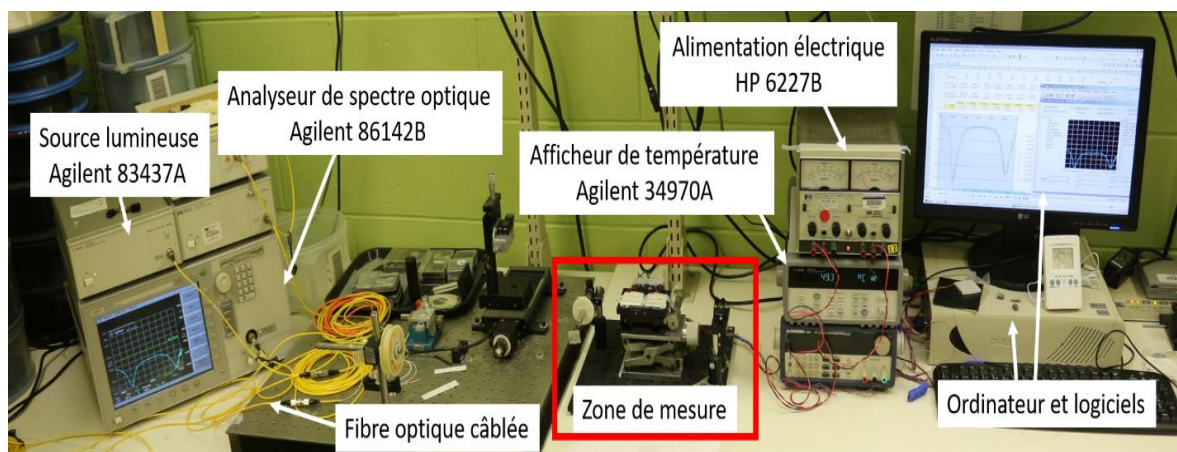


Figure 18: Montage expérimental

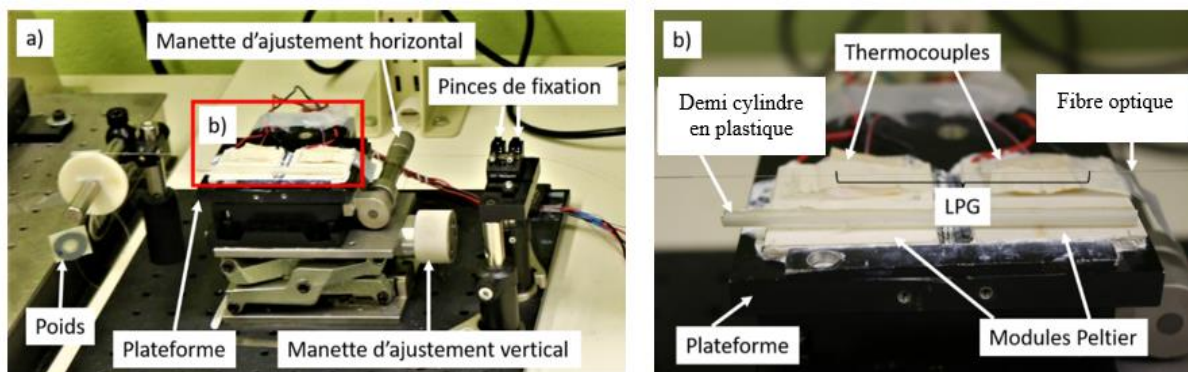


Figure 19: Plateforme mobile : a) Zone de mesure b) Réseau LPG

Sachant que la fibre est très sensible aux contraintes mécaniques et donc pour obtenir des résultats cohérents aux variations de température, une relaxation de contraintes mécaniques est créée pour conserver la même tension de la fibre optique quelles que soient les températures auxquelles elle est exposée. Pour créer cette relaxation, une extrémité de la fibre est insérée dans une pince de fixation de la zone de mesure et l'autre est collée à une masse placée à la verticale soumise à la gravité. En effet, la pince de fixation à droite empêche tout mouvement de la fibre et le poids à gauche crée une traction constante dans la fibre. Les modules Peltier sont collés à la plateforme, à environ 1 millimètre en dessous du réseau LPG pour des mesures dans l'air ou dans l'eau déminéralisée.

5.2.2 Procédure expérimentale

Afin de bien expliquer les étapes, le montage expérimental est schématisé à la Figure 20. La fibre optique est connectée à la source lumineuse, tendue à quelques millimètres au-dessus des modules Peltier, puis elle est reliée à l'analyseur de spectre. Les deux associations, source de courant / modules Peltier et afficheur de

température/thermocouples, nous permettent de générer et de contrôler deux températures différentes qui sont appliquées au réseau LPG. Le LPG doit être installé de façon symétrique au-dessus des modules Peltier afin d'assurer une bonne répartition de la température et donc avoir une température moyenne juste. Le LPG est maintenu à 0,5 mm au-dessus de deux réchauffeurs/refroidisseurs thermoélectriques (TEC). En modifiant la tension aux bornes des TEC, les températures sont contrôlées entre -40°C et $+40^{\circ}\text{C}$.

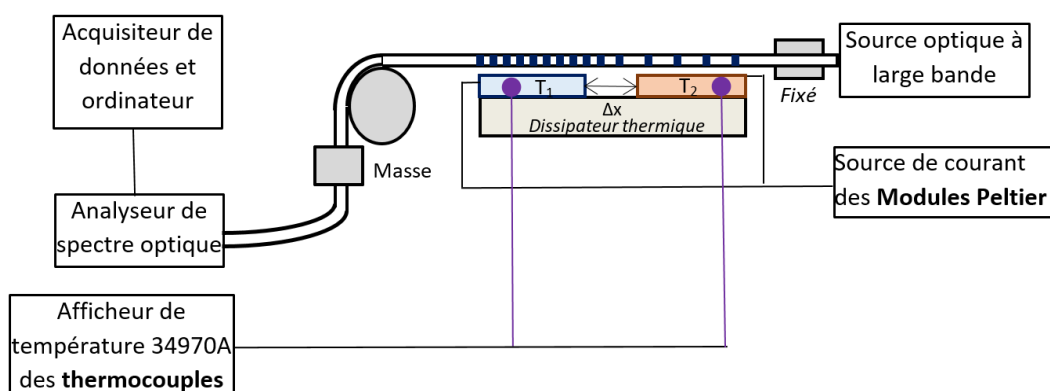


Figure 20:Schéma du montage expérimental

Le fonctionnement de ce montage permet de déterminer la sensibilité aux gradients de température des LPG. Pour cela, plusieurs mesures ont été effectuées. Lors de ces prises de mesures les modules Peltier émettent différentes températures. Ces températures sont comprises entre 5°C et 45°C engendrant donc une différence de température variant de -40°C et $+40^{\circ}\text{C}$. Plusieurs mesures sont effectuées dans différents milieux à savoir : l'air et l'eau et enfin la distance Δx entre les deux modules Peltier varie de 1 mm à 10 mm.

Après l'étalonnage (Annexe C) et les connexions finales des appareils, les différentes mesures sont effectuées, collectées puis traitées dans le logiciel Excel.

Le Tableau 4 présente une série de données de mesure effectuée pour mettre en évidence les gradients de température variables pour une température moyenne constante $T_{moy} = \frac{T_1+T_2}{2} = 25^\circ\text{C}$. Pour cette série de mesures, on observe un déplacement vertical de la profondeur (l'intensité minimale de couplage) du spectre. Le sens de ce déplacement est déterminé par la valeur et le signe de la différence de température imposée par les modules Peltier (voir flèches bleue et noir de la Figure 21). Cette expérience a été réalisée dans l'air ($n_{air} = 1$).

Tableau 4: Mesures pour différents ΔT à une température moyenne constante

Mesures	Peltier 1 T_1 ($^\circ\text{C}$)	Peltier 2 T_2 ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{moy} ($^\circ\text{C}$)
1	5	45	40	25
2	10	40	30	25
3	15	35	20	25
4	20	30	10	25
5	25	25	0	25
6	30	20	-10	25
7	35	15	-20	25
8	40	10	-30	25
9	45	5	-40	25

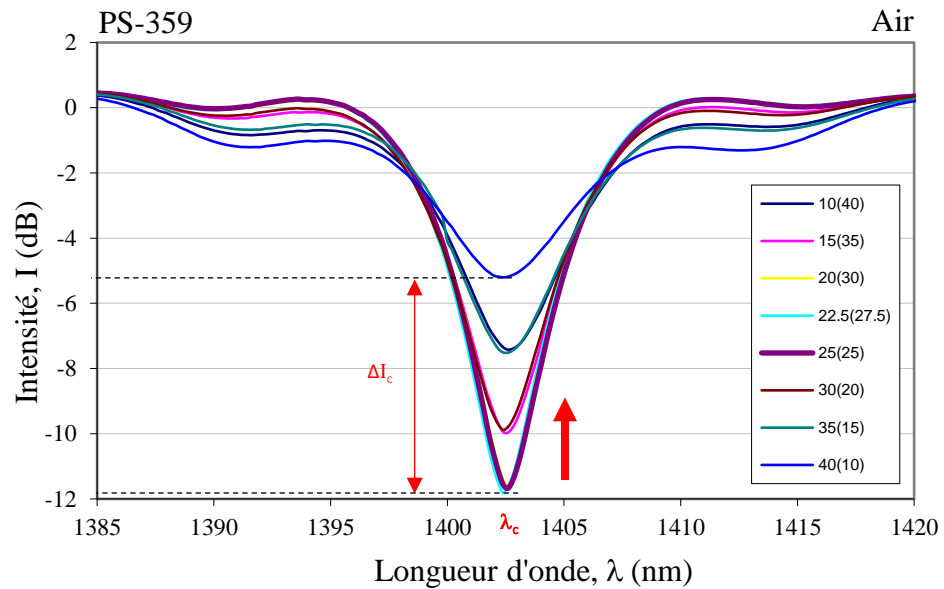


Figure 21: Réponses spectrales aux différences de températures ΔT imposées aux deux moitiés du LPG engendrant des changements de la profondeur ΔI_c

Deux autres mesures ont été effectuées dans l'eau et dans des indices de réfraction différents. Il s'agit de l'eau ($n_{eau} = 1,333$) et d'une solution de glycérine ($n_{glycérine} = 1,3753$). La distance entre les modules Peltier a été fixée à $\Delta x = 1\text{mm}$.

Pour des différences de températures constante : $\Delta T=0^\circ\text{C}$, $\Delta T=10^\circ\text{C}$, $\Delta T=15^\circ\text{C}$ et $\Delta T=20^\circ\text{C}$, plusieurs mesures sont effectuées pour mesurer la température moyenne. Ces trois séries de mesures sont effectuées afin de mettre en évidence l'impact des différences de températures constantes. Le Tableau 5 présente une série de données des mesures de la température moyenne ayant une différence de température constante : $\Delta T=0^\circ\text{C}$. On observe pour ces mesures un déplacement horizontal de la longueur d'onde de résonance.

Le sens de ce déplacement est imposé par la valeur et le signe de la température moyenne (voir flèches bleue et noir de la Figure 22).

Tableau 5: Mesures pour des T_{moy} à une différence de température constante

Mesures	T_1 (°C)	T_2 (°C)	ΔT	T_{moy} (°C)
1	5	5	0	5
2	10	10	0	10
3	15	15	0	15
4	20	20	0	20
5	25	25	0	25
6	30	30	0	30
7	35	35	0	35
8	40	40	0	40
9	45	45	0	45

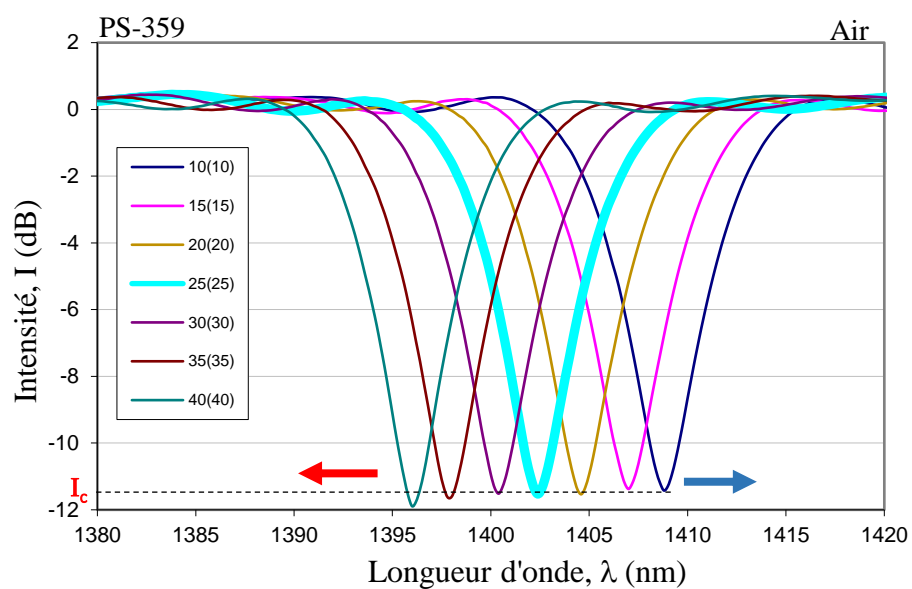


Figure 22: Déplacements de la longueur d'onde de couplage λ_c en fonction T_{moy}

5.2.3 Résultats

Des profils de température, notés $T_1(T_2)$, ont été imposés sur les moitiés gauche (droite) du LPG. Les différentes données de chaque mesure ont été collectées et traitées dans Excel puis les spectres correspondants ont été tracés (Voir Figure 21 et Figure 22).

Les variations de la différence de températures ΔT , qui modifient la profondeur de l'intensité de couplage du spectre I_c à une température moyenne constante, permettent de déterminer une dépendance de la différence de la profondeur de l'intensité de couplage du spectre ΔI_c aux changements de ΔT en traçant la courbe $\Delta I_c = f(\Delta T)$ (voir Figure 23). La pente de cette courbe représente la sensibilité $S_{\Delta T}$ du réseau LPG à la différence de température.

La Figure 23 présente aussi la courbe $\Delta I_c = f(\Delta T)$ de la réponse spectrale du LPG plongé dans l'eau puis dans la glycérine.

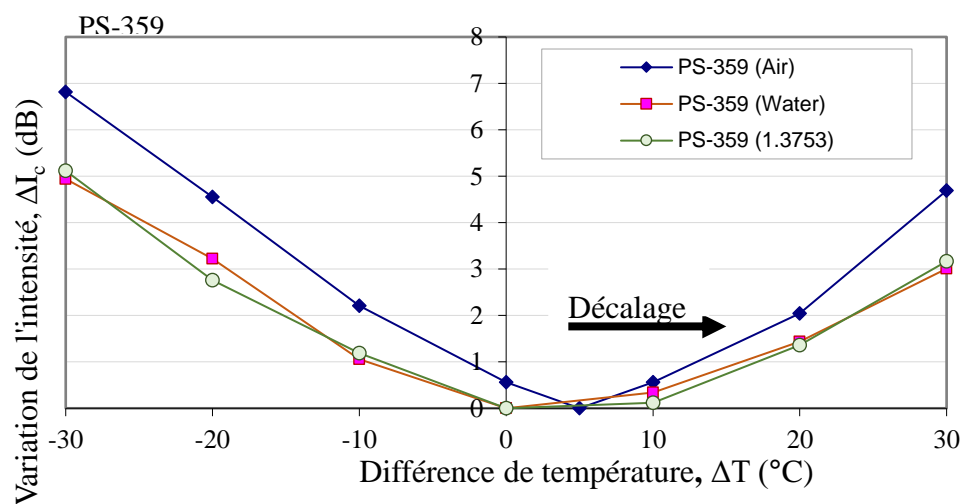


Figure 23: Changements de profondeur en dB causés par les changements des différences de température positifs et négatifs.

On obtient donc une grande sensibilité dans un milieu ayant un petit indice de réfraction. L'indice de réfraction du milieu environnant peut être perçu comme un facteur de ralentissement de la propagation et/ou du raccourcissement de la période.

Avec la même configuration expérimentale, des expériences similaires ont été menées dans lesquelles le réseau LPG est exposé à différentes températures moyennes ayant une différence de température ΔT nulle. Les résultats expérimentaux affichent une réponse de la longueur d'onde de résonance aux variations de température moyennes comme le présente la Figure 22. Il est donc possible de déterminer la dépendance de la variation de longueur d'onde de couplage $\Delta\lambda_c$ aux changements de la température moyenne T_{moy} en traçant la courbe $\Delta\lambda_c = f(T_{moy})$ (voir Figure 25). La pente de cette courbe représente la sensibilité $S_{T_{moy}}$ à la température moyenne T_{moy} . Cette sensibilité se traduit donc par le déplacement horizontal de la longueur d'onde de couplage λ_c en fonction de la température moyenne T_{moy} . La Figure 25 présente aussi la courbe $\Delta\lambda_c = f(T_{moy})$ de la réponse spectrale du LPG plongé dans l'eau puis dans la glycérine.

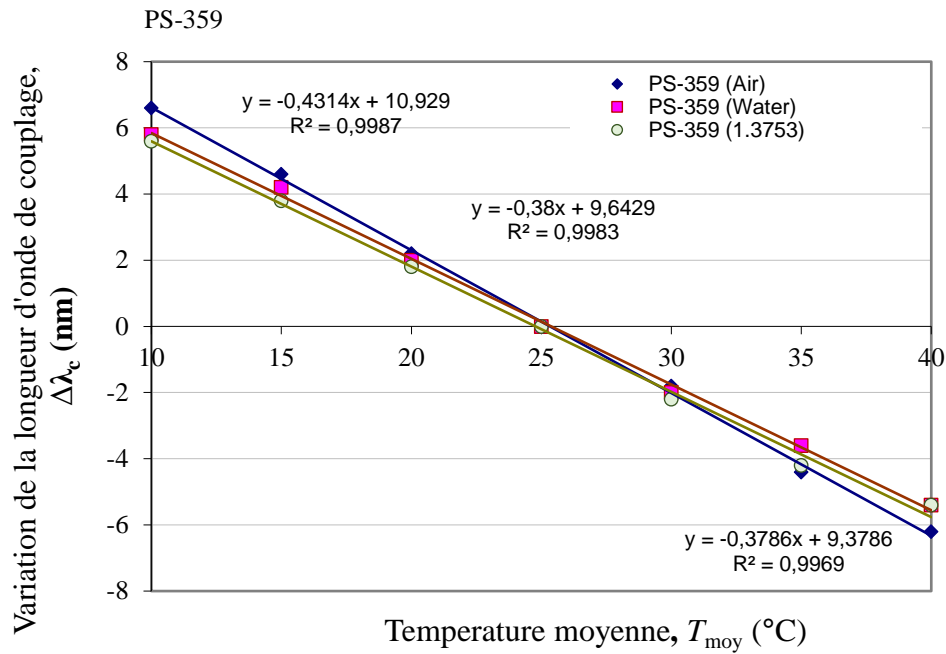


Figure 24: Variation de $\Delta\lambda_c$ en fonction de T_{moy}

On obtient donc une grande sensibilité dans un milieu ayant un petit indice de réfraction. L'indice de réfraction du milieu environnant peut être perçu comme un facteur de ralentissement de la propagation et/ou du raccourcissement de la période.

De manière similaire, nous répétons les mêmes expériences avec un autre type de réseau LPG. La Figure 25 présente les résultats des réseaux LPG_PS (358) ayant différentes longueurs d'onde de fonctionnement ($\lambda_1 = 1314 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 1472 \text{ nm}$). Cette courbe de la sensibilité est similaire à celle de la Figure 23. Il s'agit de la courbe de la variation de l'intensité de couplage minimale en fonction de la différence de température.

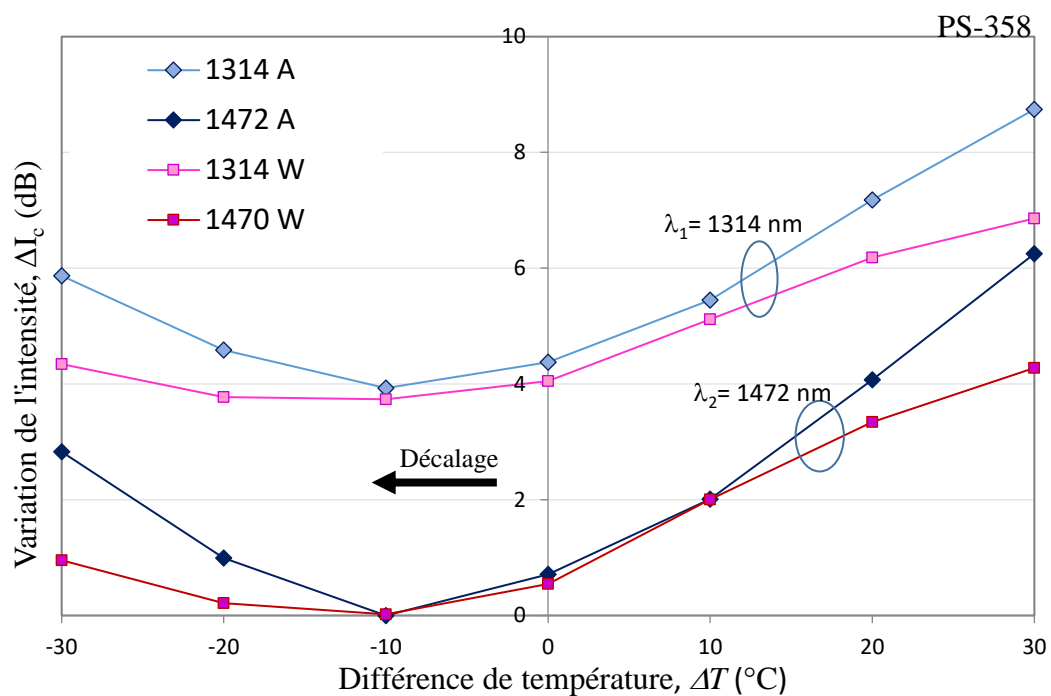


Figure 25: Réponse aux différences de température du PS-358 à deux longueurs d'onde différentes : $\lambda_1 = 1314 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 1472 \text{ nm}$ et pour deux SRI : dans l'air (A) et dans l'eau (W) : variations de ΔI_c en fonction de ΔT

La Figure 26 présente les résultats des réseaux LPG_PS (358) à la longueur d'onde de fonctionnement $\lambda_2 = 1472 \text{ nm}$. Cette courbe de la sensibilité est similaire à celle de la Figure 25. Il s'agit de la courbe de la variation de la différence de longueur d'onde de couplage en fonction de la différence de température moyenne.

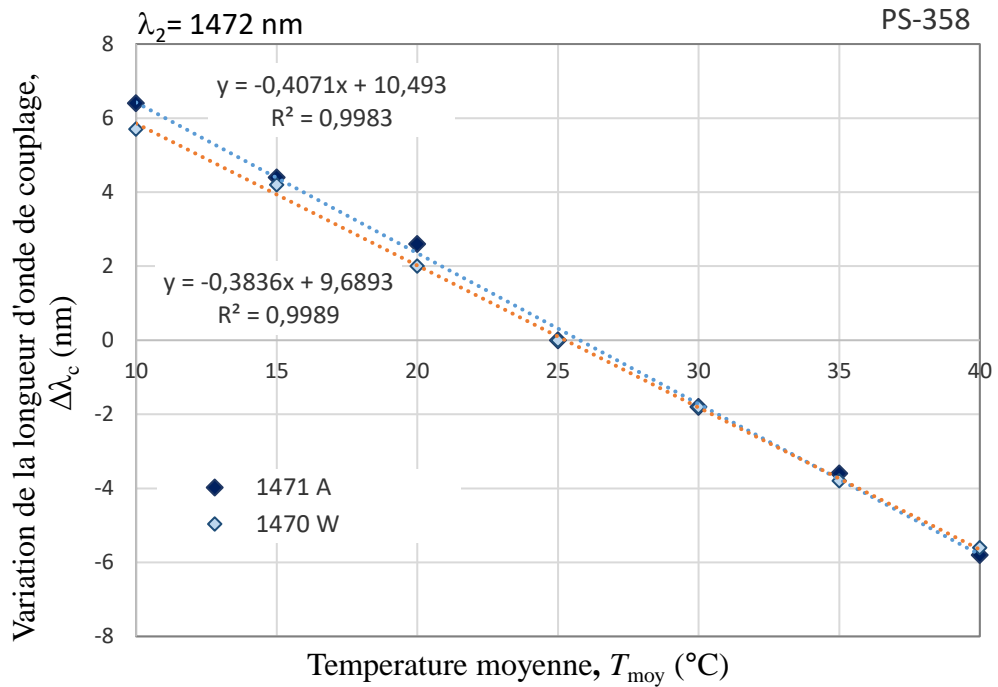


Figure 26 : Réponse aux différences de température du PS-358 à la longueur d'onde $\lambda_2 = 1472$ nm et pour deux SRI : dans l'air (A) et dans l'eau (W) : dépendance de $\Delta\lambda_c$ en fonction de T_{moy}

De manière similaire, nous répétons les étapes de l'expérience avec un autre type dans laquelle le réseau LPG est inscrit. Les Figure 27 et Figure 29 montrent les réponses du réseau SMF_28(368) aux grandeurs physiques externes. Les courbes des sensibilités présentées aux Figure 28 et Figure 30 démontrent une fois de plus la similarité avec les profils de réseaux présentés précédemment.

Les différentes sensibilités des réseaux aux différences de température ΔT et aux températures moyennes T_{moy} sont présentées dans le Tableau 6.

Les résultats montrent que les sensibilités aux différences de température ΔT et à la température moyenne T_{moy} sont réduites dans l'eau et dans la glycérine dissoute dans l'eau par rapport à l'air pour les trois différents réseaux LPG.

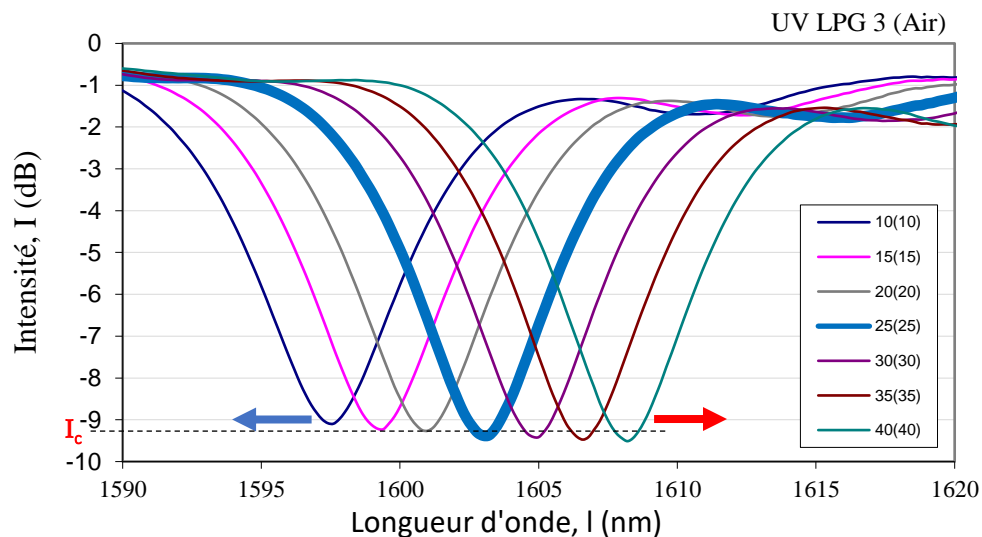


Figure 27 : Décalage de longueur d'onde de couplage λ_c aux différentes températures moyennes T_{moy} dans l'air

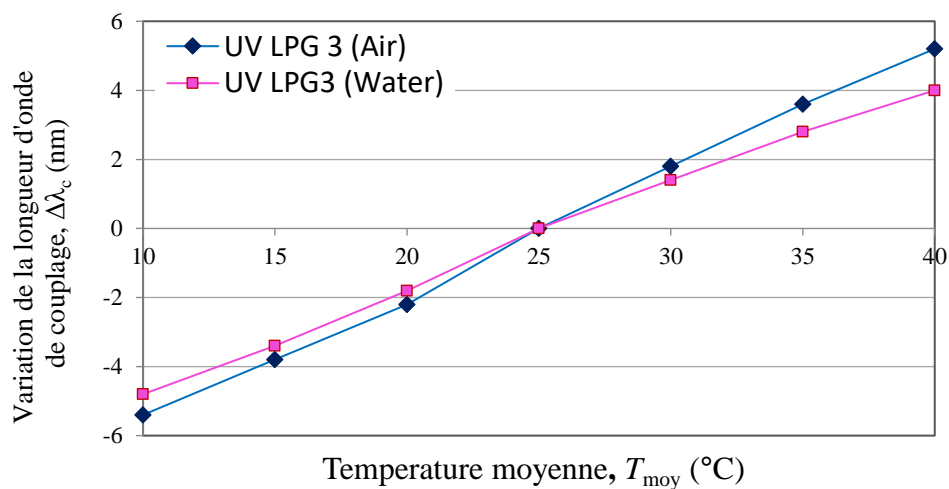


Figure 28: Dépendance de $\Delta\lambda_c$ en fonction de T_{moy}

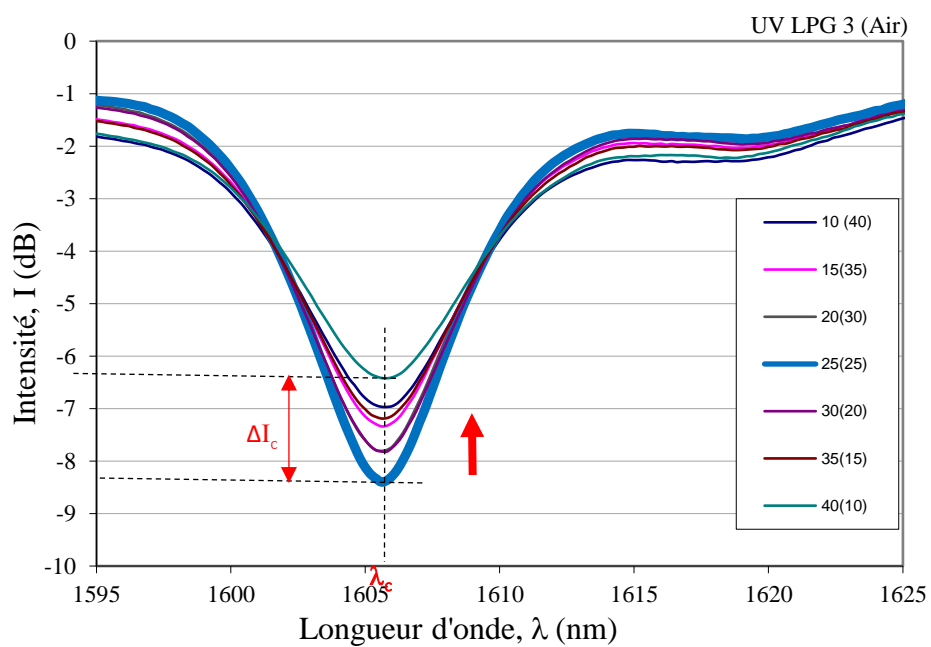


Figure 29: Réponses spectrales aux différences de température

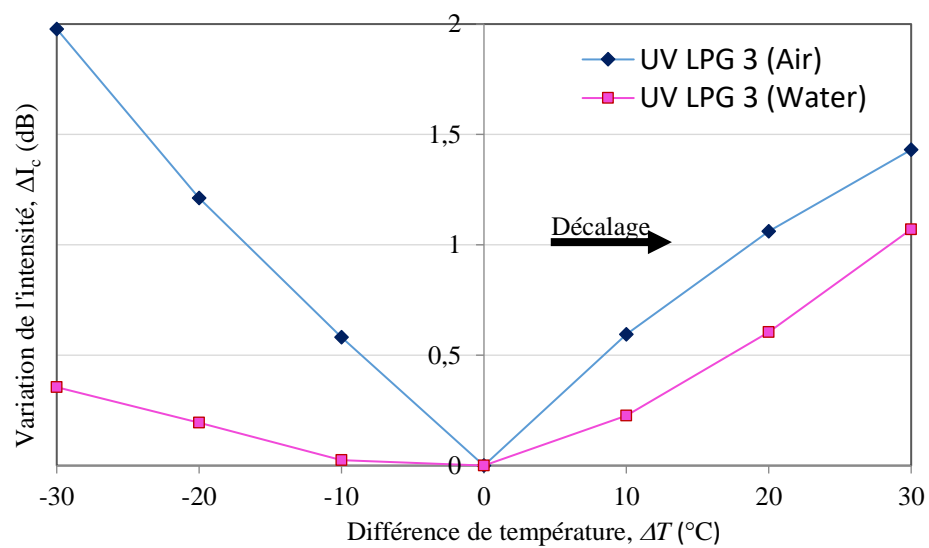


Figure 30: Dépendance de la profondeur ΔI en fonction de ΔT dans l'air (A) et dans l'eau (W)

Tableau 6: Comparaisons aux sensibilités : au gradient de température (dB/°C) et à la température (nm/°C) des trois LPG : PS-358, PS-368 et SMF-28 (368).

LPG	Milieux	ΔT		T _{moy}
		de -30°C à 0°C	de 0°C à 30°C	de 10°C à 40°C
PS (359) λ ₁ = 1315 nm	Air n = 1	-0,097 dB/°C	0,148 dB/°C	-0,271 nm/°C
	Eau n = 1,333	-0,003 dB/°C	0,095 dB/°C	-0,384 nm/°C
PS (359) λ ₂ = 1473 nm	Air	-0,178 dB/°C	0,188 dB/°C	-0,407 nm/°C
	Eau	-0,048 dB/°C	0,124 dB/°C	-0,384 nm/°C
PS (368) λ ₃	Air	-0,211 dB/°C	0,186 dB/°C	-0,431 nm/°C
	Eau	-0,194 dB/°C	0,134 dB/°C	-0,380 nm/°C
	Glycérine n = 1,375	-0,169 dB/°C	0,152 dB/°C	-0,378 nm/°C
SMF (368) λ ₅	Air	-0,211 dB/°C	0,186 dB/°C	+0,362 nm/°C
	Eau	-0,194 dB/°C	0,134 dB/°C	+0,300 nm/°C

Les données du Tableau 6 présente les sensibilités des différents réseaux dans trois milieux. Nous remarquons que le réseau le plus sensible dans l'air est le LPG_PS (368). En effet, pour le LPG_PS (368) dans l'air, la sensibilité aux différences de température $\frac{d\Delta I_C}{d\Delta T}$ est de -0,211 dB/°C et de 0,186 dB/°C respectivement pour les ΔT négatives et positives, la moyenne en valeur absolue est d'environ $\frac{|-0,211dB/°C|+|0,186dB/°C|}{2} = 0,2 dB/°C$. La sensibilité à la température moyenne dans l'air, $\frac{\Delta \lambda_C}{\Delta T} = -0,4nm/°C$, est mesurée par le décalage horizontal de la longueur d'onde de résonance.

Comme les grandeurs de puissance et de pertes peuvent être mesurées avec une précision de 0,02 dB, cela signifie que des gradients causés par des différences de température aussi faibles que 0,1 °C ($\Delta T < \frac{0,02 dB}{0,2 dB/°C} = 0,1°C$) sont mesurables. D'autre part, comme le décalage horizontal de la longueur d'onde de couplage est une conséquence des changements de températures moyennes et que ces décalages peuvent être mesurés

avec une précision de 0,05 nm, cela signifie que des décalages par rapport aux températures moyennes aussi faibles que 0,125 °C ($T_{moy} < \frac{0,05 \text{ nm}}{0,4 \text{ nm/}^\circ\text{C}} = 0,125^\circ\text{C}$) sont mesurables.

5.3 Discussion

Dans cette session, nous présentons une analyse plus approfondie des résultats obtenues de la Figure 22 jusqu' à la Figure 30. Aussi, les sensibilités inscrites dans le Tableau 6 définissent plusieurs points importants.

Premièrement, les réponses expérimentales sont en majorités semblables aux résultats des simulations théoriques simplifiées utilisant la matrice de transmission de données du réseau LPG. Les résultats montrent que les gradients de température le long du LPG provoquent des changements de la profondeur I_c , tandis que le changement de température moyenne le long du LPG provoque le déplacement horizontal de la longueur d'onde centrale λ_c .

Deuxièmement, on constate que les sensibilités à la température moyenne $\frac{\Delta I_c}{\Delta T}$ des fibres photosensibles (FS) dopées au bore sont négatives, tandis que celles du SMF-28 sont positives. Cependant, les sensibilités aux gradients thermiques $\frac{\Delta I_c}{\Delta T}$ présentent les mêmes signes et sont similaires.

Troisièmement, les courbes $\Delta I_c = f(\Delta T)$ présentent certaines asymétries par rapport à l'axe verticale. Pour les fibres photosensibles (PS), les réponses ΔI_c aux gradients

thermiques sont décalées vers une valeur positive de ΔT pour PS (368) et une valeur négative de ΔT pour PS (358). Aucun décalage n'est observé pour le LPG_SMF-28.

Finalement, quel que soit le milieu de test (air, eau), les réponses aux gradients de température pour les réseaux LPG_PS Figure 25 et Figure 25 sont symétriques par rapport à l'axe verticale comme prédit par la Figure 17. Cependant, la même réponse aux gradients pour le LPG_SMF-28 de la Figure 30 se comporte différemment et avec des tendances opposées dans l'air (symétrie) et dans l'eau (non-symétrie).

En comparant les résultats théoriques et expérimentaux, nous concluons que nos hypothèses initiales utilisées pour les simulations ont été trop simplifiées. Il a été supposé que les deux moitiés du LPG étaient identiques, c'est-à-dire $\Lambda_{0,1} = \Lambda_{0,2} = \Lambda_0$ et $\Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0,2} = \Delta n_{eff,0}$ et toutes les analyses de la simulation ont été limitées aux équations différentielles linéaires de Λ et Δn exprimées en séries de Fourier du premier ordre (voir équations (38) et (39)).

Tout décalage généré dans les courbes expérimentales $\Delta I_c = f(\Delta T)$, quelle que soit la direction de symétrie préservée autour de son axe (la verticale), signifie que nous devons appliquer un certain gradient ΔT pour obtenir de nouveau la courbe symétrique prédite dans la simulation théorique (Figure 17). Par conséquent, nous supposons que les décalages observés dans la Figure 23 et la Figure 25 sont valables pour des moitiés non identiques du réseau LPG étudié et testé. Ces moitiés non identiques sont donc provoquées par un facteur aléatoire quelconque à déterminer. Comme les LPG ont été écrits à l'aide de **masque de phase**, nous avons toutes les raisons de supposer que la période $\Lambda_{0,i}$ reste

constante le long du réseau, alors que la différence d'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,0,i}$, peut varier le long du réseau. Pour les réseaux écrits UV, un faisceau laser non symétrique éclairant les deux moitiés peut provoquer une différence d'indice de réfraction $\Delta n_{eff,0,i}$ ($\Delta n_{eff,0,1}$ et $\Delta n_{eff,0,2}$).

Les deux différentes tendances non symétriques, avec aucun décalage (Figure 30), indiquent que la réponse est sensible au signe de la différence de température ΔT et à l'existence de non-linéarités non prises en compte dans l'équation de $\Lambda_i(T)$ (38). Les remarques énumérées feront l'objet d'une étude approfondie dans notre deuxième article.

5.4 Conclusion

L'analyse effectuée dans le présent document nous permet de formuler les conclusions suivantes : d'abord, l'analyse matricielle montre que les gradients thermiques et la température moyenne dans un LPG ont des effets différents : le gradient provoque des modifications de la profondeur du réseau ΔI_c , tandis que la variation de la température moyenne engendre le déplacement horizontalement de la longueur d'onde centrale $\Delta \lambda_c$. Ensuite, les résultats des expériences confirment la dépendance $\Delta I_c = f(\Delta T)$ de la profondeur aux gradients thermiques imposés le long du LPG prédite théoriquement, mais elles montrent aussi certains écarts éventuellement dus à des asymétries et des non-linéarités. Enfin, avec un seul réseau LPG, il est possible de mesurer simultanément le gradient thermique et température moyenne dans un milieu où le réseau est installé. Comme il n'existe aucune littérature sur la mesure du gradient de thermique avec des capteurs à fibres optique, nous l'avons déterminé pour la première fois dans notre

laboratoire, cette découverte est novatrice. La sensibilité due à la température moyenne mesurée avec un réseau FBG jusqu'à ce jour est $0,013 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ et celle que nous avons mesuré avec le LPG est $0,431 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, soit une sensibilité du LPG qui est de 33 fois la sensibilité du FBG.

6 Détection de gradients thermiques à l'aide de LPG ayant une différence d'indice de réfraction effective variable

Ce chapitre est la continuité du précédent chapitre. Les résultats ont montré que le réseau le plus sensible de tous les réseaux testés est le LPG_PS (368) inscrit dans la fibre photosensible raison pour laquelle les fibres photosensibles seront utilisées dans la suite de notre recherche. Dans le chapitre précédent, il a été supposé que les deux moitiés du LPG étaient identiques, c'est-à-dire $\Lambda_{0,1} = \Lambda_{0,2} = \Lambda_0$ et $\Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0,2} = \Delta n_{eff,0}$. Cette hypothèse s'est avérée fautive puisque dans nos résultats théoriques les réponses $\Delta I_c = f(\Delta T)$ sont symétriques tandis que les réponses expérimentales sont asymétriques. Lors de l'exposition du réseau LPG à différents ΔT pendant l'expérience, les réponses aux gradients de température se déplaçaient vers une valeur positive du gradient. Cette présence de décalage (à gauche ou à droite) autour de son axe vertical de symétrie signifie que l'imposition d'un certain gradient dn au réseau LPG modifie les réponses asymétriques en réponses symétriques prédites dans la simulation théorique. Par conséquent, nous supposons que les décalages observés indiquent que les moitiés du réseau ne sont pas uniformes. D'après l'expression de la longueur d'onde centrale du réseau LPG (28), seule la différence d'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,0,i}$ varie tout le long du réseau tandis que la période Λ du réseau reste constante parce que les réseaux LPG sont écrits dans la fibre optique à l'aide de masques de phase. Un tel décalage de la réponse entraîne une dépendance monotone de la courbe $\Delta I = f(\Delta T)$ sur un intervalle bien

défini sur l'axe des ΔT , ce qui permettra de déterminer le signe et l'amplitude de la différence de température d'où la mesure de la grandeur et du signe du flux thermique.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation théorique et les résultats expérimentaux des mesures de gradient thermique utilisant des réseaux à longue période avec une différence d'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,0,1} \neq \Delta n_{eff,0,2}$ variant le long du réseau. Il a été démontré théoriquement et confirmé expérimentalement qu'en introduisant une dépendance spatiale de la différence d'indice de réfraction effective Δn_{eff} le long du LPG, le nouveau capteur est capable de mesurer l'amplitude du gradient de température, et même d'identifier le signe du sens de sa direction. Ce capteur à base des nouveaux LPG, inscrits dans les fibres photosensibles dopées au bore, a enregistré des sensibilités aux gradients de température aussi élevées que 0,33 dB/°C. Étant donné que les températures moyennes provoquent des décalages de longueur d'onde de résonance, les gradients thermiques et la température moyenne (sensibilité obtenue de 2,3 nm/°C) peuvent ainsi être mesurés simultanément par un seul réseau LPG.

6.1 Analyse théorique et expérimental pour un réseau LPG

6.1.1 Analyses théoriques des LPG avec $\Delta n_{eff, i}$ uniforme

Les différents critères de la représentation matricielle du réseau LPG et de sa simulation théorique sont semblables à ceux énoncés dans chapitre précédent et donc, les mêmes équations du précédent chapitre sont reconduites dans ce nouveau chapitre. Cependant, il est important de présenter certains détails qui concernent au moins 2 réseaux dans la même fibre. Ensuite, nous introduisons un gradient d'indice de réfraction dans nos simulations

pour les deux moitiés du réseau LPG qui ne sont pas uniformes. Dans le but de faire une analyse comparative avec ou sans gradient d'indice de réfraction, deux différentes simulations sont effectuées. Les équations ajustées et les grandeurs changées dans la théorie et la simulation sont :

Pour les deux moitiés du réseau LPG notés $i = \{1; 2\}$:

Les équations (29) ; (36) ;(32) ; (33) ;(36) et (38) deviennent respectivement :

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{A}_0 \quad (52)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} C_i + j\Delta_i S_i & jK_i S_i \\ jK_i S_i & C_i - j\Delta_i S_i \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$C_i = \cos(\delta\beta_i L_i) \text{ et } S_i = \sin(\delta\beta_i L_i)$$

$$\delta\beta_i = 2\sqrt{\delta_i^2 + \kappa_i^2}, \Delta_i = \frac{2\delta_i}{\delta\beta_i}, K_i = \frac{2\kappa_i}{\delta\beta_i}, \Delta_i^2 + K_i^2 = 1 \quad (54)$$

$$\delta_i(T) = \pi \left[\frac{\Delta n_{eff,i}(T)}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda_i(T)} \right] \text{ et } \kappa_i(T) = \frac{\Delta\lambda_{0c}}{\lambda_i^2} \Delta n_{eff,i}(T) \quad (55)$$

6.1.2 Simulations théoriques des LPG avec $\Delta n_{eff,i}$ uniforme

Le principe de la simulation est identique à celui du chapitre précédent. Les équations (39) à (50)(49) sont considérées dans ce chapitre et de nouvelles valeurs sont fixées :

$\lambda_c = 1500 \text{ nm}$; $\Lambda_0 = 250 \text{ nm}$ et donc $\Delta n_{eff,0} = 0,0062 \text{ riu}$ alors $\Delta\lambda = 39,6 \text{ nm}$;
 $N_1 = N_2 = 100$; $\sigma_{\Lambda,T} = 0,01 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$; $\sigma_{\Delta n,T}$ varie de $[-2.10^{-6}$ à $+2.10^{-6}] \text{ riu}/^\circ\text{C}$
 L'équation (50) permet de calculer la réponse spectrale du réseau LPG. La Figure 31 montre les réponses spectrales théoriques du modèle LPG pour le paramètre m (variant de

-10 à +10) à partir de laquelle on voit qu'en augmentant la différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$ entre les deux parties moitiés du LPG.

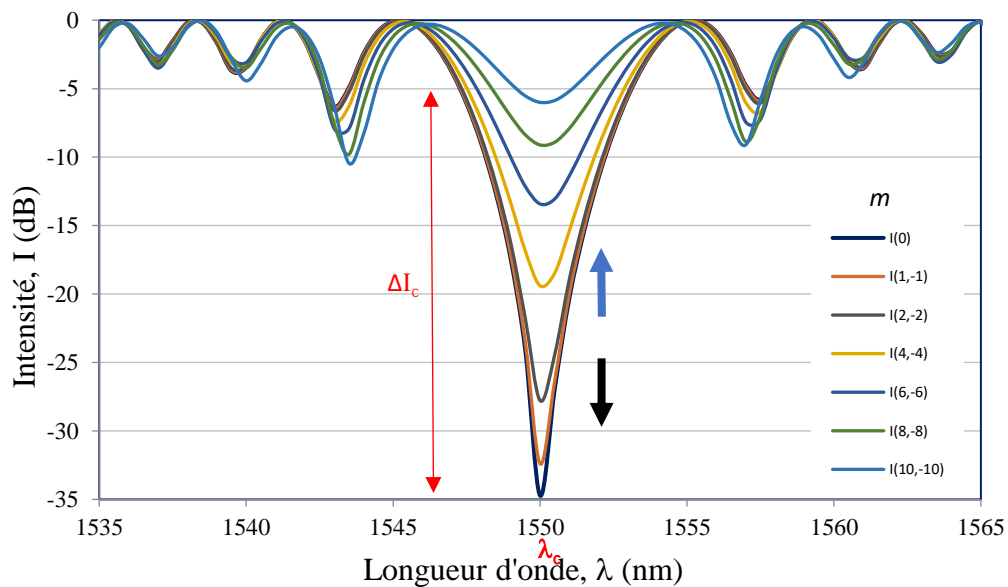


Figure 31: Simulations de la réponses spectrales aux différences de température : $\Delta n_{\text{eff},0,1} = \Delta n_{\text{eff},0,2} = \Delta n_{\text{eff},0}$ et $\sigma_{\Delta n,T} = 0,000001$ riu/ $^{\circ}\text{C}$.

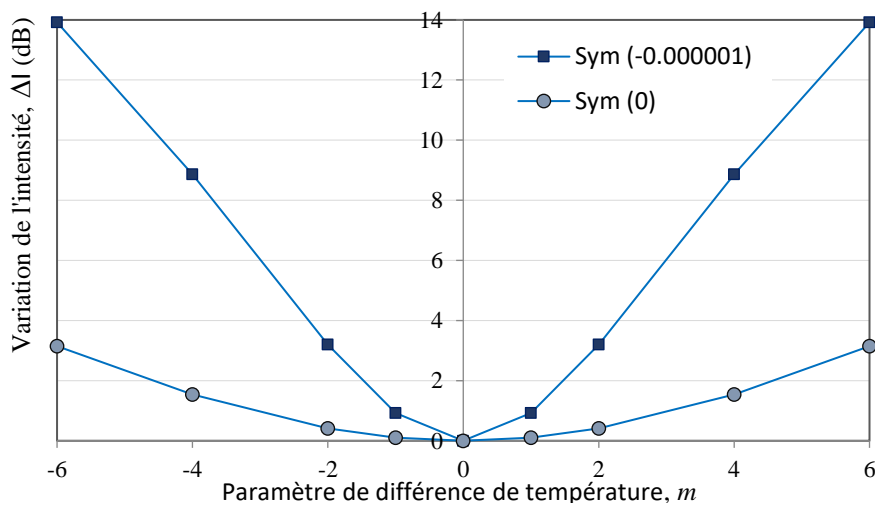


Figure 32: Simulations de la variation de la profondeur ΔI par rapport à ΔT : pour $\Delta n_{\text{eff},0,1} = \Delta n_{\text{eff},0,2} = \Delta n_{\text{eff},0}$ et $\sigma_{\Delta n,T} = 0,000001$ riu.

La profondeur de l'intensité minimale de couplage change et la dépendance est représentée à la Figure 32 .Le changement de profondeur $\Delta I_c = f(\Delta T)$ est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées et **le signe du gradient ne peut pas être déterminé.**

6.1.3 Expérience avec des LPG avec $\Delta n_{\text{eff}, i}$ uniforme

La montage expérimental (Figure 18 et Figure 20) et la procédure de test de la réponse spectrale aux différences de températures du chapitre précédent sont reconduites dans ce nouveau chapitre. Pour mener à bien l'analyse des résultats, de nouveaux réseaux LPG ont été fabriqués dans nos laboratoires en utilisant deux différentes techniques d'inscriptions. Tous les réseaux ont été écrits dans une fibre optique photosensible dopée au bore (B) 1250/1550. La longueur de chaque réseau est de 50 millimètres et la distance entre les deux modules Peltier est de $\Delta x = 2$ mm.

Le Tableau 7 présente les cinq échantillons de réseaux LPG fabriqués. La même procédure expérimentale que celle du chapitre précédent est reconduite dans ce chapitre à savoir l'imposition des profils de température, notés T_1 (T_2), aux deux moitiés des réseaux LPG.

Tableau 7: Réseaux LPG fabriqués et expérimentés

Désignations	Λ_0 (μm)	Longueur (mm)	Méthodes d'inscription du réseau
PS-252	252	50	Arc électrique
PS-220	220	50	
PS-194	194	50	
PS-368	368	50	Irradiation par laser UV
PS-358	358	50	

La Figure 33 montre les changements spectraux pour le PS-368 lorsque le réseau est exposé aux différences de températures.

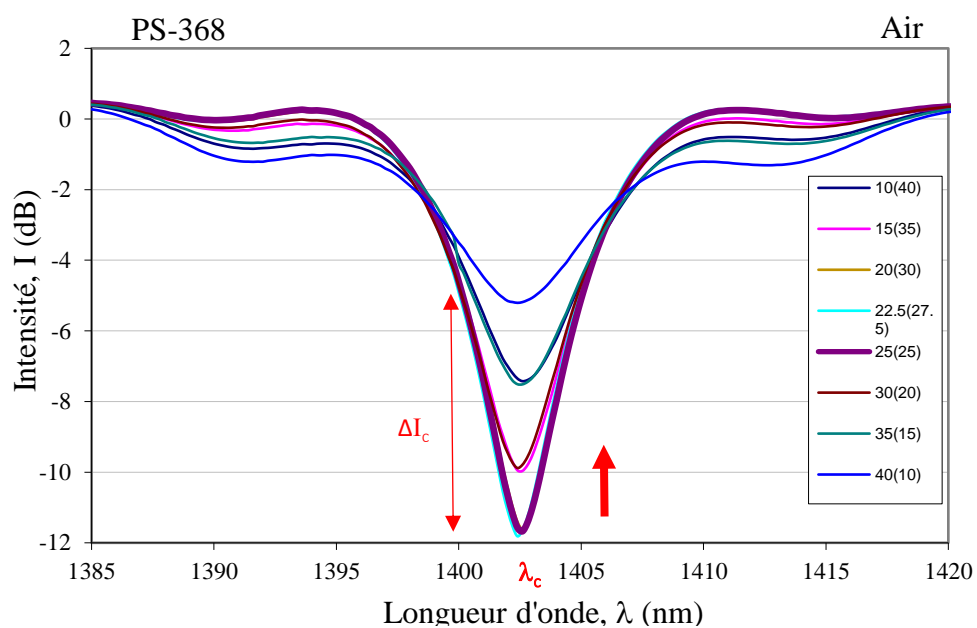


Figure 33: Réponses spectrales aux différences de température

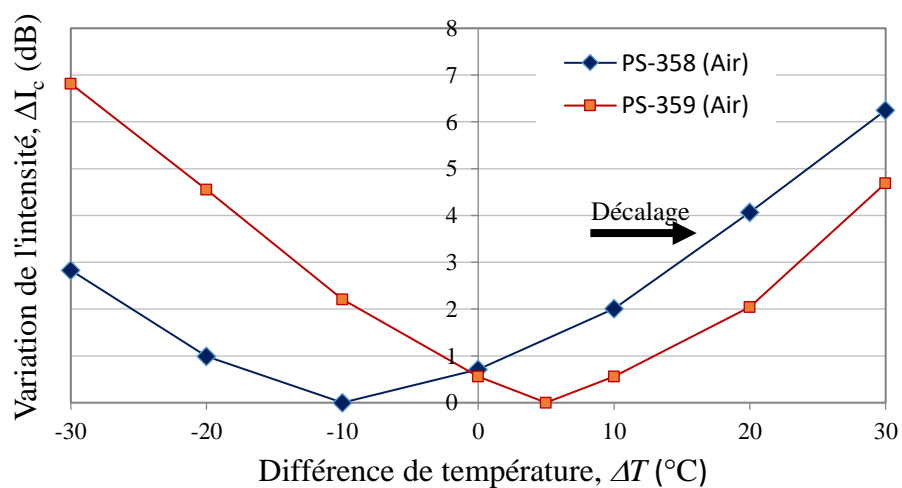


Figure 34: Dépendance de la profondeur ΔI en fonction de ΔT dans l'air (A).

La Figure 34 présente les changements de la variation de l'intensité de couplage ΔI_c par rapport à la différence de température ΔT des deux réseaux. Les réponses dans leur ensemble se comportent comme estimées par les résultats de la simulation théorique de la Figure 32, à l'exception des décalages vers les ΔT positifs pour le PS-368 et vers les négatifs pour le PS-358.

Comme indiqué dans notre première publication scientifique [54], ces décalages des spectres dans les expériences suggèrent que la différence d'indice de réfraction effective Δn_{eff} du LPG n'est pas uniforme le long du réseau.

6.1.4 Simulations théoriques des LPG avec $\Delta n_{eff, i}$ non uniforme

Nous supposons maintenant qu'il existe une petite variation locale (d) de l'indice de réfraction effectif le long du réseau, c'est-à-dire $\pm dn$. Dans un tel cas, les différences d'indice effectif des deux moitiés du réseau LPG sont différentes : $\Delta n_{eff,0,1} \neq \Delta n_{eff,0,2}$ contrairement aux conditions de simulation du chapitre précédent (publication scientifique [54]). Nous simulons donc les performances du LPG pour différentes valeurs d'indice de réfraction :

$$\Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0} + dn; \Delta n_{eff,0,2} = \Delta n_{eff,0} - dn \quad (56)$$

En affectant différentes valeurs, comprises entre -5.10^{-6} et 1.10^{-6} , à dn , nous simulons les changements des spectres du LPG ensuite nous traçons la courbe $\Delta I_m = f(\Delta T)$ présentée dans la Figure 35. Nous observons que le **décalage** des spectres est proportionnellement lié à la variation **d'indice de réfraction local** dn .

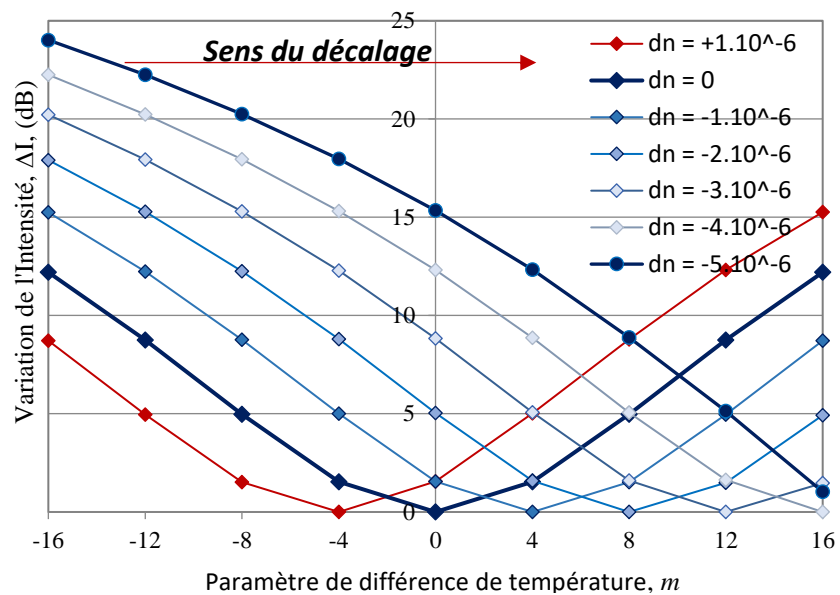


Figure 35: Réponses théoriques aux différences de température ΔT dans une fibre avec changement progressif de l'indice de réfraction effectif le long du réseau pour différentes valeurs de dn

La Figure 36 présente une apparition d'une symétrie de la réponse ΔI pour un $dn = \pm 5.10^{-6}$ imposé aux deux moitiés du LPG. Nous pouvons observer l'apparition d'une symétrie dans la réponse en fonction des valeurs de dn (voir Figure 36)

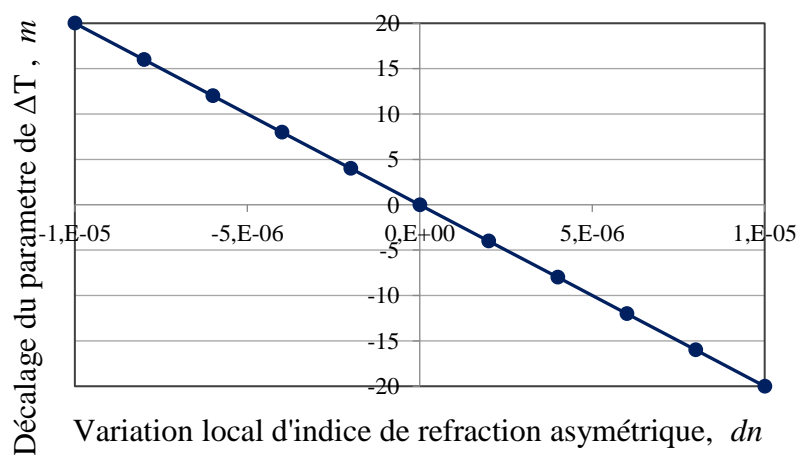


Figure 36: Apparition d'une symétrie dans la réponse en fonction de dn

Ces simulations expliquent les décalages observés dans les résultats du test expérimental de la Figure 34.

6.1.5 Test expérimental des réseaux LPG uniformes inscrits par arc électrique

➤ Cas du réseau LPG_PS-252 à double résonance (DR)

À cette étape de la recherche, les réponses d'un LPG à double résonance (DR) aux gradients de température ont été expérimentés et nous avons constaté que la sensibilité au gradient thermique est extrêmement élevée. Cependant, les courbes de dépendances $\Delta I = f(\Delta T)$ sont différentes et correspondent à une valeur élevée de dn (voir la Figure 31 de la simulation). La réponse présente un décalage plus important (Figure 38) de sorte que le réseau LPG puisse détecter la direction du gradient thermique.

Nous observons clairement que l'intensité de couplage minimale spectrale ΔI_c du réseau de la Figure 37 a presque disparu comme observée dans la simulation de la Figure 31 mais contrairement à la réponse $\Delta I = f(\Delta T)$ de la Figure 32 qui ne donne pas le signe du gradient thermique, le réseau LPG à double résonance présente une réponse décalée. Dans les limites de ΔT compris entre -30°C à $+30^\circ\text{C}$, le réseau (DR) détecte le signe du gradient thermique pour une puissance de couplage aux longueurs d'onde les plus élevées (*higher*).

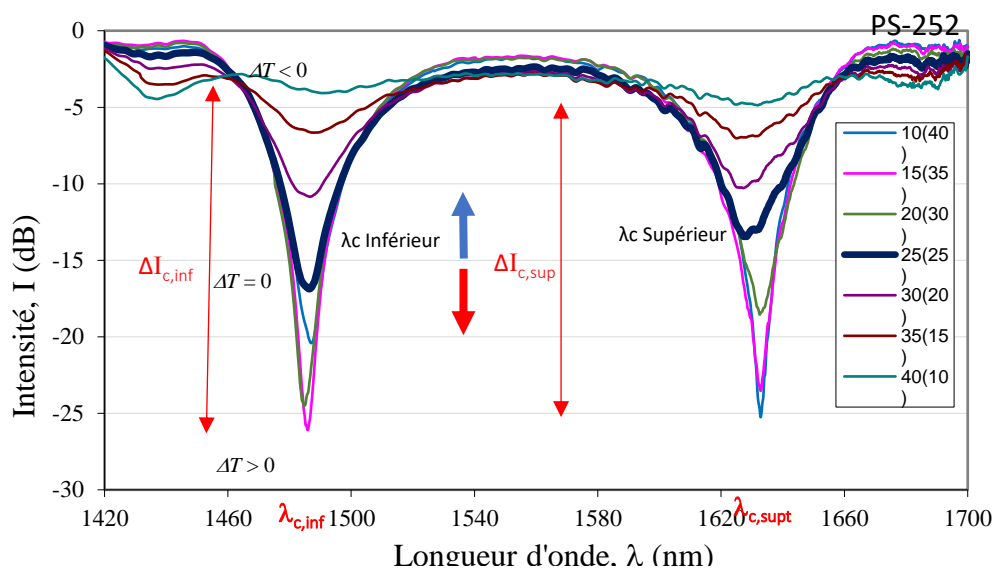


Figure 37: Réponses aux gradients thermiques d'un LPG à double résonance fusionné à base de fibres photosensibles : a) modifications de la profondeur du spectre en fonction de ΔT

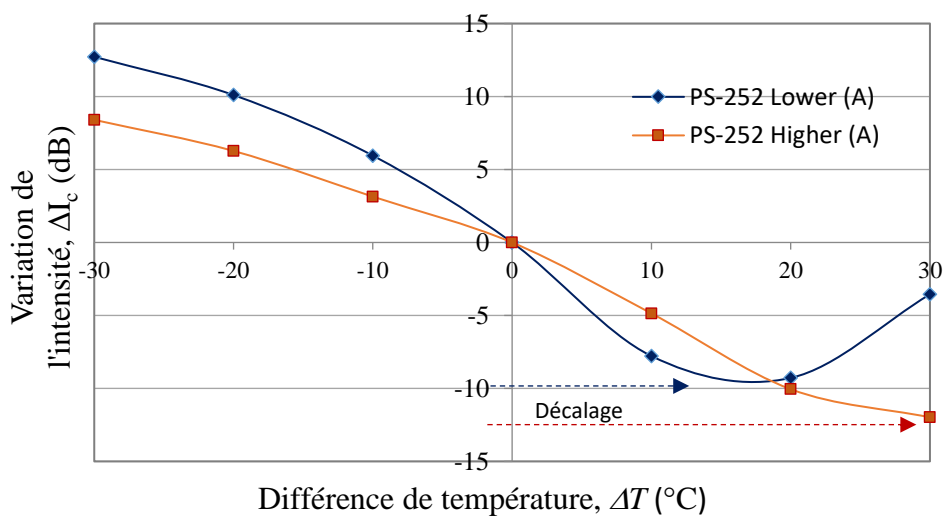


Figure 38: Intensité de couplage en fonction de ΔT .

➤ Cas du réseau LPG_PS-268 à double résonance (DR)

Dans notre première publication scientifique [54], présentée au chapitre précédent, nous avons montré qu'en immergeant le réseau LPG dans l'eau, les réponses $\Delta I = f(\Delta T)$

décalaient pour différentes valeurs de ΔT . Ces décalages observés nous ont inspiré à effectuer des mesures dans l'air et dans l'eau pour le réseau LPG_PS-268. La Figure 39 présente les variations spectrales dans l'air et la Figure 40 présente les courbes $\Delta I = f(\Delta T)$ de ce réseau dans l'air et l'eau.

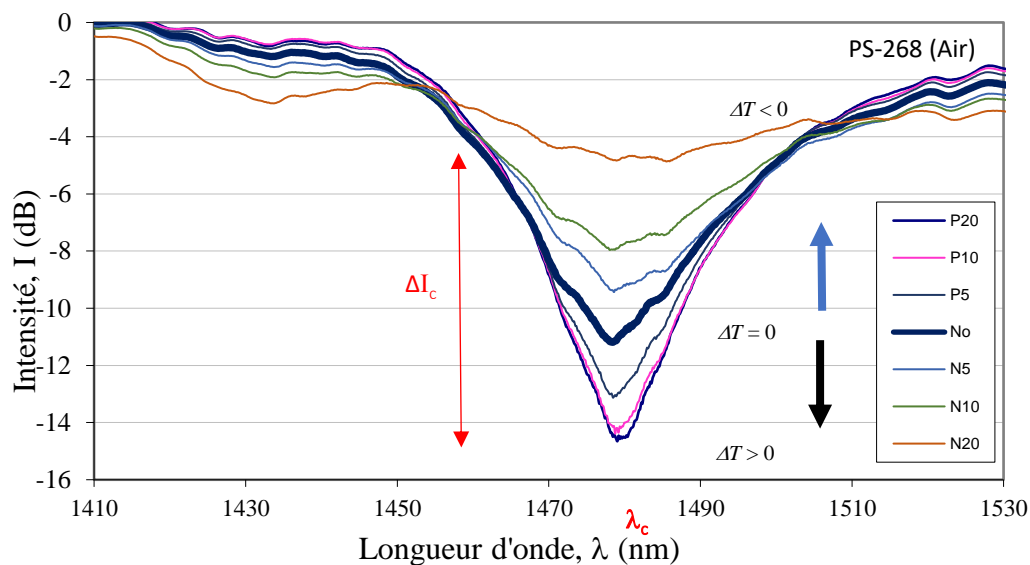


Figure 39: Changements de la profondeur du spectre en présence de ΔT

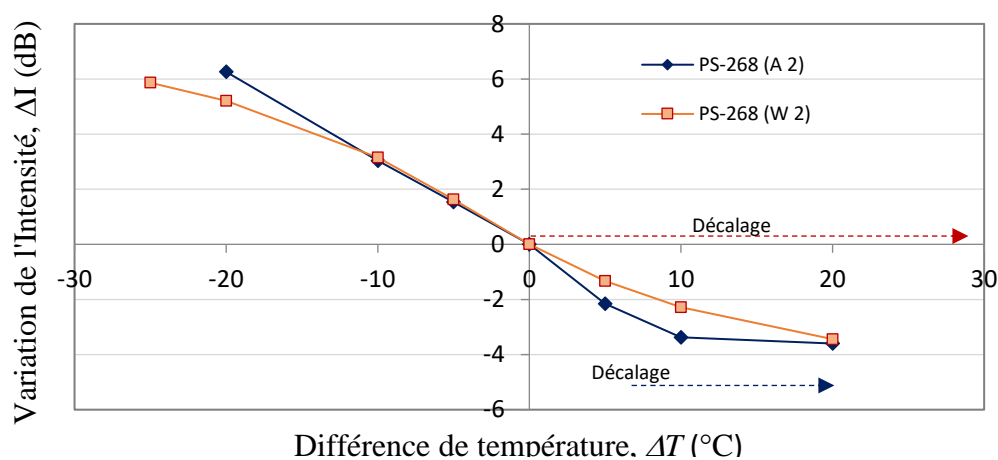


Figure 40: Courbes de ΔI en fonction de ΔT .

Une analyse détaillée des deux courbes révèle que l'effet de l'eau est de décaler la réponse spectrale vers la droite par rapport à celle dans l'air (Figure 40). La réponse dans l'eau est donc modifiée et son nouveau profil permet donc de déterminer la direction et le signe du gradient thermique. La courbe $\Delta I = f(\Delta T)$ dans l'**air** du réseau LPG_PS-268 de la Figure 40 est similaire à celle de la simulation avec la valeur de la variation locale $dn = -3.10^{-6} rui$ de la Figure 35 tandis que la courbe $\Delta I = f(\Delta T)$ du réseau dans l'**eau** est semblable à celle de la même Figure 35 pour $dn = -4.10^{-6} rui$, ce qui signifie que la réponse a bel et bien **décalé**. Il est donc possible de mesurer l'amplitude et d'identifier le signe du gradient de température.

6.2 LPG avec un gradient dn généré dans l'indice de réfraction effectif $\Delta n_{eff,0,i}$

Les expériences précédentes ont démontré qu'il est possible d'introduire une modification de la différence d'indice de réfraction effective dans chaque moitié du LPG en immergeant une moitié du réseau dans un liquide pour ainsi avoir $\Delta n_{eff,0,1} \neq \Delta n_{eff,0,2}$. Cette modification entraîne un décalage de la courbe de sensibilité au gradient thermique. Le schéma du montage expérimental (Figure 41) est semblable à celui de la Figure 20. Cependant dans ce montage, deux nouvelles composantes sont ajoutées. Il s'agit de deux tubes capillaires en plastique ayant une section de coupe en forme de U. Ces deux tubes peuvent être remplis indépendamment d'eau dans lequel une moitié du réseau LPG est immergé. Nous pouvons donc réaliser quatre combinaisons en fonction des tubes et des fluides : air/air (A/A), air/eau (A/W), eau/air (W/A) et eau/eau (W/W). Ces combinaisons

correspondent au profil de température $T_1(T_2)$ imposé aux deux moitiés dans son milieu (milieu1/milieu2).

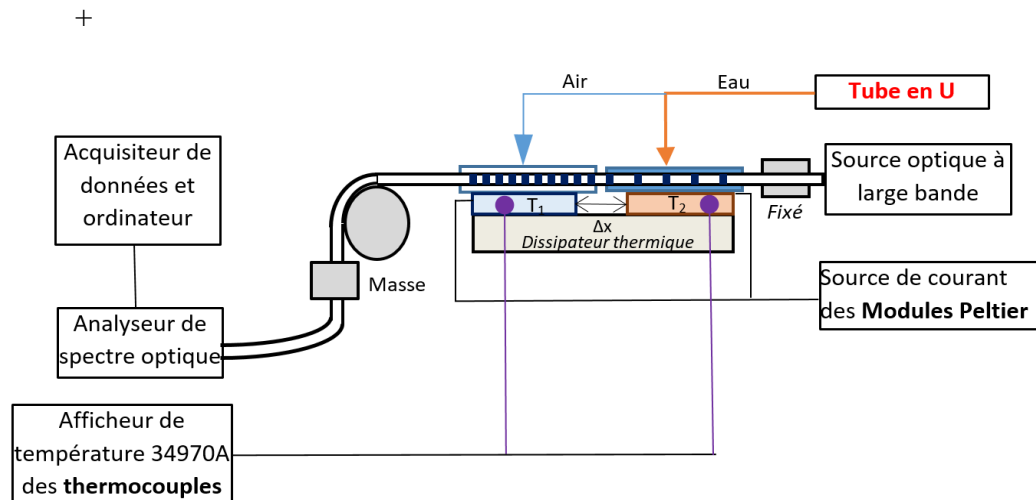


Figure 41 : Combinaison expérimentale pour introduire un gradient dn dans l'indice de réfraction effectif $\Delta n_{\text{eff},0,i}$ dans les deux moitiés du LPG.

Deux réseaux ont été testés dans cette section. Il s'agit du LPG_PS-220 et le LPG_PS-194 (DR). La Figure 42 présente les réponses du LPG_PS-220 à la différence de température ΔT . Dans la première combinaison (A/A), la réponse au gradient thermique $\Delta I = f(\Delta T)$ présente un certain décalage à $\Delta T = + 10$ °C comme l'indique la Figure 43. En insérant la moitié droite du réseau dans l'eau d'où la combinaison (A/W), le décalage est compensé et nous observons un décalage de la réponse vers la gauche, alors que dans le cas contraire (W/A), la réponse est décalée à droite et le décalage est augmenté d'environ $\Delta T = + 17$ °C. C'est exactement ce que nous attendions après l'analyse des résultats des simulations de la Figure 35.

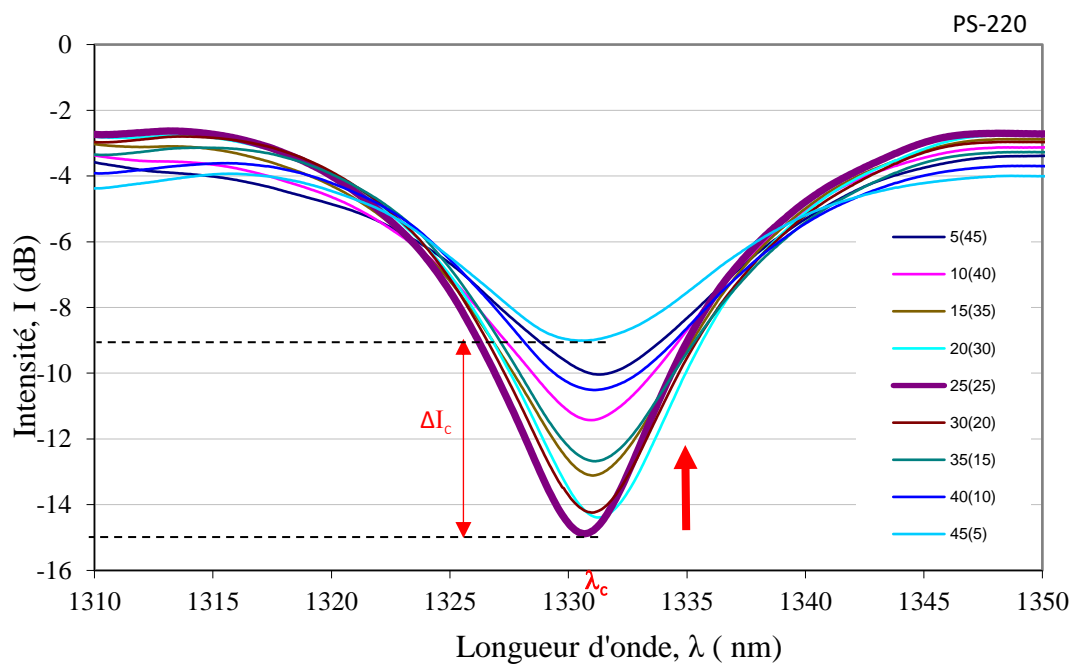
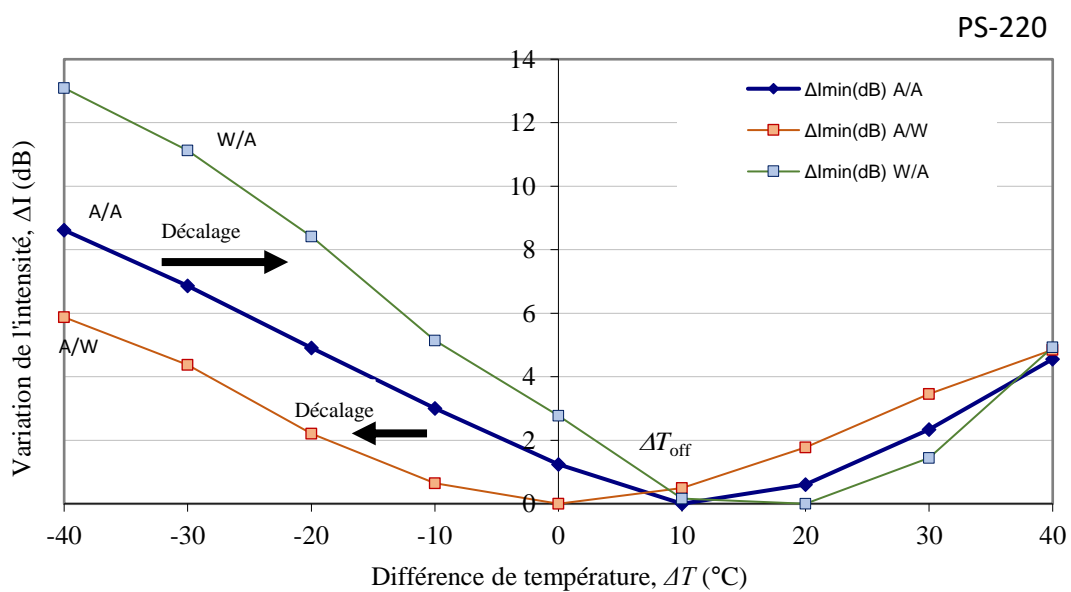


Figure 42: Changements de la profondeur spectrale

Figure 43 : Intensité de couplage en fonction de ΔT

Une analyse détaillée de la réponse $\Delta I = f(\Delta T)$ indique que, mis à part les changements (décalages) de sensibilités observées, les pentes des réponses changent également et que la réponse de la combinaison (W/A) est plus sensible que celle de la combinaison (A/A), qui à son tour est plus sensible que celle de la combinaison (A/W). Cela signifie que les sensibilités effectives $S'_{\Delta n,i}$ **changent** dans l'eau.

Nous avons ensuite étudié la réponse LPG_PS-194 à double résonance aux gradients de température. Les résultats pour la longueur d'onde de résonance inférieure (soit $\lambda_{inférieure} = 1422 \text{ nm}$) sont présentés à la Figure 44 et nous observons que la profondeur du spectre disparaît pratiquement à $\Delta T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ceci est également observé avec l'imposition de variation d'indice de réfraction dans $\Delta n_{eff0,i}$ en immergeant une moitié du réseau dans l'eau. À la Figure 45, nous observons que pour la combinaison (A/A), la pente de la différence de température est plus prononcée lorsque $\Delta T_{A/A} > 7^\circ\text{C}$ au point de symétrie. L'imposition d'eau sur le côté gauche, d'où la combinaison (W/A), décale la ligne de symétrie vers $\Delta T_{W/A} > -16^\circ\text{C}$ tandis qu'avec de l'eau sur le côté droit du réseau (A/W), la ligne de symétrie est déplacée à $\Delta T_{A/W} > +30^\circ\text{C}$.

Pour les gradients de température compris dans l'intervalle $\Delta T = [-30^\circ\text{C}, +30^\circ\text{C}]$, la réponse du LPG_PS-194 aux gradients thermiques est symétrique autour de $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ et permet donc de mesurer à la fois **la valeur et la direction de la sensibilité** (pente de la courbe) tel que vérifié par la relation $\Delta T_{A/A} = \frac{\Delta T_{A/W} + \Delta T_{W/A}}{2}$.

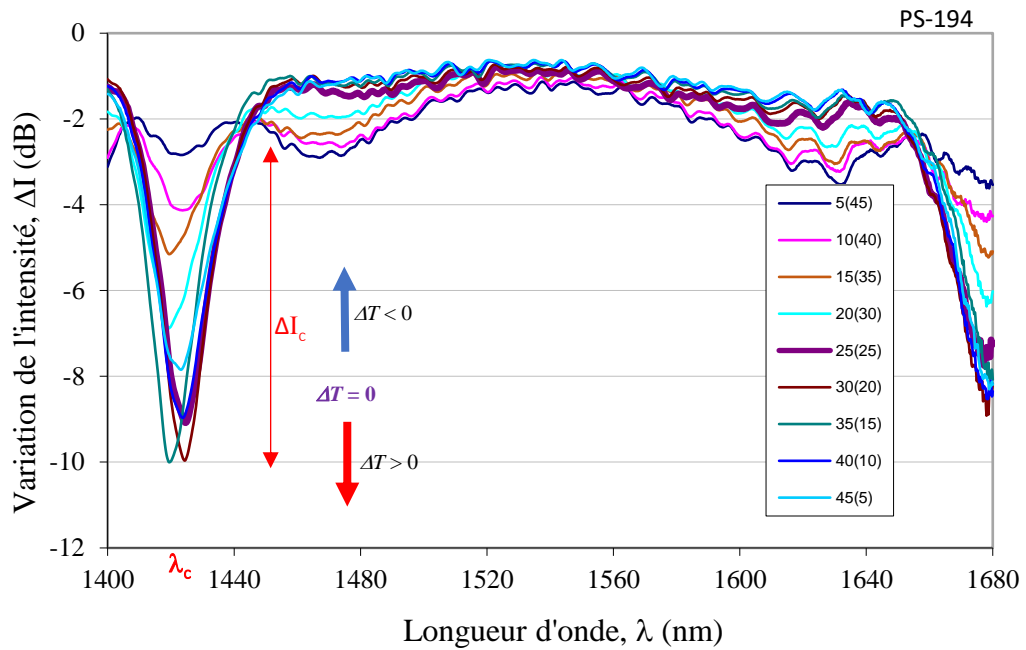


Figure 44: Réponses à la différence de température ΔT du LPG à résonance unique PS-194

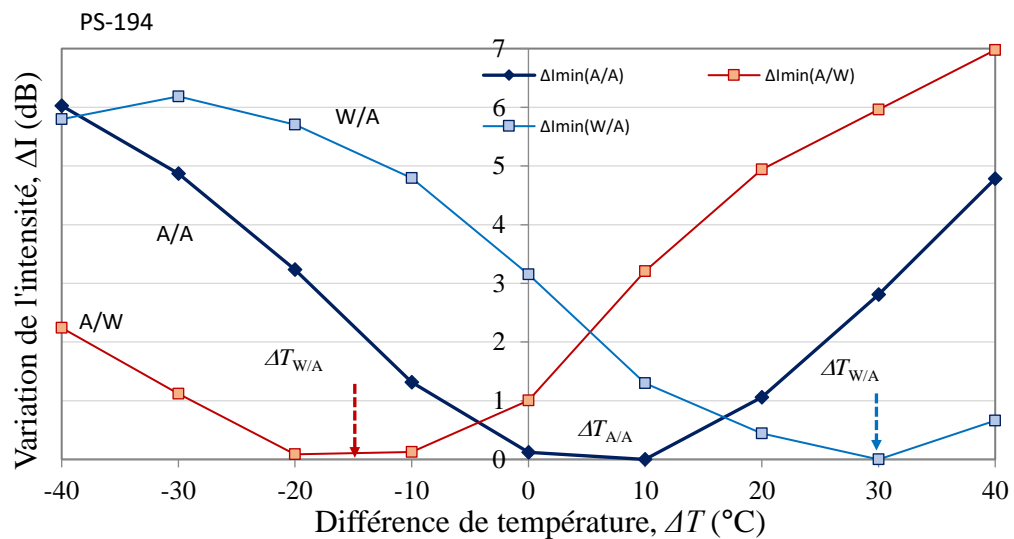


Figure 45: Réponses aux gradients thermiques avec des gradients d'indice imposés par la combinaison eau/air.

Ainsi, en observant la courbe de la combinaison (W/A) dans l'intervalle $\Delta T = [-30^\circ\text{C}, +30^\circ\text{C}]$ de la Figure 45, il est possible de calculer la sensibilité aux ΔT en

identifiant la différence de température pour une longueur de réseau LPG de 50 mm en déterminant la variation de l'intensité de couplage minimale ΔI_c du réseau qui varie de 0 dB à 6 dB. Cela donne la sensibilité moyenne de $\frac{d(\Delta I_m)}{d(\Delta T)} = \frac{6dB-0dB}{30^\circ C - (-30^\circ C)} = 0,1 \text{ dB}/^\circ C$ pour le LPG_PS-194 (DR). Comme les grandeurs de puissance et de pertes peuvent être mesurées avec une précision de 0,02 dB, cela signifie que des gradients causés par des différences de température aussi faibles que $0,2^\circ C$ ($\Delta T < \frac{0,02 \text{ dB}}{0,1 \text{ dB}/^\circ C} = 0,2^\circ C$) sont mesurables avec ce réseau LPG.

En outre, d'après les Figure 40, on peut estimer que le réseau PS-268 présente une variation d'intensité de $\Delta I = 6dB - (-3,3dB) = 9,3 \text{ dB}$ dans l'intervalle de variation de $\Delta T = (25^\circ C - (-25^\circ C)) = 50^\circ C$ ce qui donne une sensibilité moyenne de $\frac{d(\Delta I_m)}{d(\Delta T)} = \frac{6dB-3,3dB}{25^\circ C - (-25^\circ C)} = 0,186 \text{ dB}/^\circ C$. Tandis qu'à la Figure 38, le réseau PS-252 présente une variation d'intensité de $\Delta I = 7dB - (-13dB) = 20 \text{ dB}$ dans l'intervalle de variation de $\Delta T = (30^\circ C - (-30^\circ C)) = 60^\circ C$ ce qui donne une sensibilité moyenne de $\frac{d(\Delta I_m)}{d(\Delta T)} = \frac{7dB-13dB}{30^\circ C - (-30^\circ C)} = 0,33 \text{ dB}/^\circ C$. La sensibilité à la température de ce LPG_PS-252 était d'environ $\frac{\Delta l_c}{\Delta T} = 2,3 \text{ nm}/^\circ C$ (Annexe A). C'est la sensibilité à la température moyenne la plus élevée mesurée avec un réseau LPG à double résonance conique inscrits dans une fibre photosensible.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour introduire une variation locale spatiale permanente et délibérée dn qui affectera la différence d'indice de réfraction effective

$\Delta n_{eff,0,i}$ afin de permettre la mesure de l'amplitude et le signe du gradient thermique. La méthode choisie est expliquée dans les prochains chapitres du rapport de thèse.

Alors que dans la présente étude, nous avons utilisé des fibres PS hautement sensibles à la température pour les variations de température ΔT à des températures moyennes, pour certaines applications comme en médecine où il peut être indésirable d'introduire de la fibre de verre, les LPG de fibres polymères [100] [94] [135] [103] peuvent être plus appropriées puisque la température moyenne est d'environ 37°C et que le PMMA résiste à 100°C . De plus, la sensibilité à la température non seulement dépendra de la période particulière de Λ qui définit le mode d'ordre supérieur m mais aussi de la longueur d'onde de couplage λ_c .

6.3 Conclusion

L'analyse théorique et expérimentale réalisée dans ce chapitre permet de conclure que :
Premièrement, la création d'un gradient de l'indice de réfraction effectif $\Delta n_{eff,0,i}$ le long de la structure du réseau LPG permet de créer des décalages et en particulier à la position $\Delta T = 0$.

Deuxièmement, nous avons confirmé à travers plusieurs expériences ces décalages en utilisant des réseaux LPG à simple et à double résonance.

Troisièmement, nous avons montré qu'en introduisant délibérément une simple variation de d'indice dn dans $\Delta n_{eff,0,i}$ le long d'un LPG, nous pouvons décaler la réponse

du LPG aux gradients thermiques $\Delta I = f(\Delta T)$ de sorte que le réseau mesure simultanément à la fois l'amplitude du gradient et sa direction.

Cette étude démontre donc qu'un seul réseau LPG peut être utilisé comme un capteur de vecteur de flux thermique. C'est-à-dire, l'unique capteur optique fournit la grandeur, l'orientation et la direction d'un flux thermique avec une tolérance d'incertitude favorable aux procédés d'énergies thermiques.

7 Réponses aux gradients de température et à la température moyenne des réseaux LPG non identiques en cascade

Nos résultats du précédent chapitre [54] [136] ont montré qu'en introduisant une variation partielle locale d'indice de réfraction dn , l'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,0,i}$ est modifié tout le long du réseau et permet donc de générer puis de contrôler le décalage de la réponse $\Delta I_c = f(\Delta T)$. Le bon contrôle de ces décalages permet de mesurer l'amplitude et de déterminer la direction et le signe du gradient thermique. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour introduire une variation locale spatiale permanente et délibérée dn .

Quelle valeur donnée à dn durant la fabrication physique du réseau pour obtenir le décalage nécessaire de la réponse $\Delta I_c = f(\Delta T)$? Quelle méthode utilisée pour la correction de dn après inscription du LPG dans la fibre ?

Pour répondre à ces questions, il est donc nécessaire de présenter une étude générale théorique et expérimentale des sensibilités aux gradients de température puis d'évaluer dans quelle mesure le $\Delta n_{eff,0,i}$ doit être modifié d'une manière ou d'une autre pour obtenir le décalage nécessaire de la réponse.

Dans cet article, nous présentons une étude théorique et expérimentale détaillée des réponses de deux différents réseaux LPG (C-LPG) en cascades aux gradients thermiques qui provoquent des changements de la profondeur de l'intensité de couplage du mode cœur aux modes supérieurs gaines. Des simulations ont été effectuées pour des LPG en

cascades avec et sans dispersion de différences d'indices de réfraction effectifs identiques et non identiques. Il a été démontré que dans le cas de LPG non identiques, la réponse aux différences de température se déplace de manière à mesurer l'amplitude et de déterminer le signe du gradient thermique. En cas de dispersion, les minimums latéraux répondent aux gradients et permettent des mesures différentielles. Des sensibilités aux variations de différence de température de 0,13 dB/°C et à la température de 294 pm/°C ont été obtenues pour les LPG en cascade à partir de fibres optiques photosensibles.

7.1 Analyse théorique de réseaux LPG en cascade

7.1.1 Représentation matricielle des réseaux en cascade

Une cascade de deux LPG est un interféromètre intermodal (cœur-gaine) de Mach-Zehnder dans lequel les réseaux LPG jouent le rôle de séparateurs / combineurs des ondes électromagnétiques. Les réseaux LPG sont caractérisés par leur période Λ_i et sont distants de L_0 comme présenté à la Figure 46. La différence avec les interféromètres à gaine/cœur est que les séparateurs / combineurs sont des réseaux qui sont sensibles à un nombre limité de grandeurs physiques et chimiques externes.

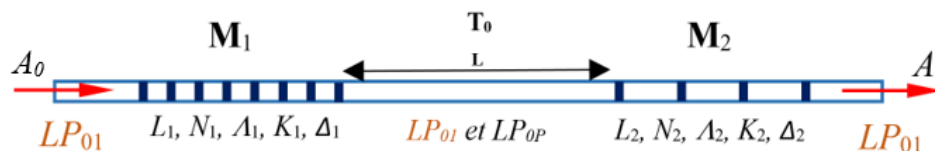


Figure 46: Représentation schématique d'une cascade de deux réseaux LPG

Dans la formulation matricielle, la structure entière est présentée comme [105] [133] [134]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_0 \mathbf{M}_1 \quad (57)$$

Avec

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} C_i + j\Delta_i S_i & jK_i S_i \\ jK_i S_i & C_i - j\Delta_i S_i \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} a_0 e^{-j\Delta\phi} + j\Delta S & 0 \\ 0 & a e^{j\Delta\phi} \end{bmatrix} \quad (58)$$

Avec a_0 et a qui sont respectivement les amplitudes du mode cœur et gaine dans la section intermédiaire (\mathbf{T}_0), aussi $\Delta\phi = \frac{\delta\beta_0 \cdot L_0}{2}$ est la différence de phase entre le mode cœur et le mode gaine. Les expressions de C , S , $\delta\beta$ et κ sont données par les équations vues dans le précédent chapitre (54) et (56) avec $i = \{1,2\}$ représentant les réseaux LPG.

Dans la section intermédiaire (\mathbf{T}_0), le coefficient de couplage est nul : $\kappa_0 = 0$, tandis que la période est très grande puisqu'il n'y a pas de perturbation d'où $\Lambda \rightarrow \infty$ ainsi donc :

$$\delta_0 = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n_{eff,0} \quad \text{et} \quad \delta\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff,0} \quad (59)$$

Ainsi en (58), la différence de phase entre le mode cœur et le mode gaine de la section intermédiaire s'écrit :

$$\Delta\phi = \frac{\delta\beta_0 \cdot L_0}{2} = \frac{\pi L_0}{\lambda} \Delta n_{eff,0} \quad (60)$$

La matrice résultante \mathbf{M} dans (57) transforme le mode de vecteur des champs électriques d'entrée de mode en un mode de vecteur des champs de sortie comme indiqué dans (29),

soit : $A = \mathbf{M} \cdot A_0$, avec A_0 et A qui sont respectivement les vecteurs du champ électrique d'entrée et de sortie.

L'expression de l'intensité de couplage est :

$$I = I_0 a_0^2 \left\{ [(R_- - \eta P)C_{\Delta\phi} + \eta R_+ S_{\Delta\phi}]^2 + [R_+ C_{\Delta\phi} - (R_- + \eta P)S_{\Delta\phi}]^2 \right\} \quad (61)$$

$$P = K_1 K_2 S_1 S_2; R_- = C_1 C_2 - \Delta_1 \Delta_2 \cdot S_1 S_2; R_+ = \Delta_1 S_1 C_2 + \Delta_2 \cdot C_1 S_2 \quad (62)$$

Et $\eta = \frac{a}{a_0}$ est le rapport de l'amplitude du mode cœur et de l'amplitude du mode gaine de la section intermédiaire. En cas d'absence de section intermédiaire, c'est à dire $a_0 = a = 1$ et $\Delta\phi = 0$ et donc nous retrouvons l'équation (50) décrite dans le précédent chapitre soit : $I = [C_1 C_2 - (\Delta_1 \Delta_2 + K_1 K_2) S_1 S_2]^2 + [\Delta_1 S_1 C_2 + \Delta_2 S_2 C_1]^2$

7.1.2 Simulations théoriques des LPG en cascade

Les caractéristiques de la fibre telles que sa période et son indice de réfraction changent en fonction de la variation de la température et cela, respectivement causé par son coefficient de dilatation thermique et son coefficient thermo-optique (paramètres physiques de la fibre). Ainsi les expressions équations différentielles linéaires de $\Lambda(T)$ et de $\Delta n_{eff}(T)$ sont respectivement données par (38) et (39) et elles nous permettent de catégoriser les deux réseaux LPG en cascade comme suit.

➤ Cas 1 : Pour $\Lambda_{0,1} = \Lambda_{0,2}$ et $\Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0,2}$

la cascade est **symétrique** et se compose de deux LPG **identiques** ;

➤ Cas 2 : Pour $\Lambda_{0,1} \neq \Lambda_{0,2}$ et $\Delta n_{eff,0,1} \neq \Delta n_{eff,0,2}$

la cascade est **asymétrique** et se compose de deux LPG **non identiques**. Dans ce cas, il existe une certaine variation totale local d'indice de réfraction $\pm dn$ qui affecte l'indice de réfraction effectif initial le long du réseau et son expression est donnée par : $\Delta n_{eff,0,i} = \Delta n_{eff,0} \pm dn$.

D'un autre côté, les différences d'indice de réfraction effectif $\Delta n_{eff,0,i}$ dépendent généralement de la longueur d'onde qui, en supposant une dépendance linéaire à la longueur d'onde, peut être représentée comme :

$$dn(\lambda) = dn_0 + \alpha_\lambda[\lambda - \lambda_0] \quad (63)$$

Ainsi dn sera positif pour $\lambda > \lambda_0$ et négatif pour $\lambda < \lambda_0$

7.1.2.1 Pas de dispersion de $\Delta n_{eff,i}$

$\Delta n_{eff,i}$ n'est pas dispersif puisqu'il n'existe pas de distance entre les LPG en cascade ($L_0 = 0$)

i) Cas 1 : cascade symétrique et réseaux LPG identiques :

Nous considérons d'abord un C-LPG symétrique avec $\eta = 1$, $\Lambda_{0,1} = \Lambda_{0,2} = 250 \mu\text{m}$, $\Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0,2}$ qui sont indépendants de la longueur d'onde. Les différentes données connues de la simulation sont : $\lambda_c = 1,55 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 107 \text{ nm}$, $\sigma_{\Lambda,T} = 0,01 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$; $\sigma_{\Delta n,T} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ riu}/^\circ\text{C}$ et $dn = 0$.

La Figure 47 présente les réponses spectrales théoriques pour le paramètre de la différence de température m variant de 0 à ± 10 . Plus m est élevée, faible devient la

profondeur du minimum I_C . Nous remarquons qu'en augmentant m entre les deux LPG, la profondeur du minimum change et la dépendance $\Delta I_C = f(\Delta T)$ est représentée dans la Figure 48. Nous notons que I_C est le même pour m et $-m$ et nous pouvons donc déterminer la valeur du gradient de température $\frac{\Delta T}{\Delta L}$ à partir de la profondeur I_C du réseau mais pas son signe. Le changement de profondeur $\Delta I_C = f(\Delta T)$ est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées et le signe du gradient ne peut pas être déterminé.

Un C-LPG symétrique peut ainsi mesurer la valeur absolue d'une différence de température $|\Delta T|$.

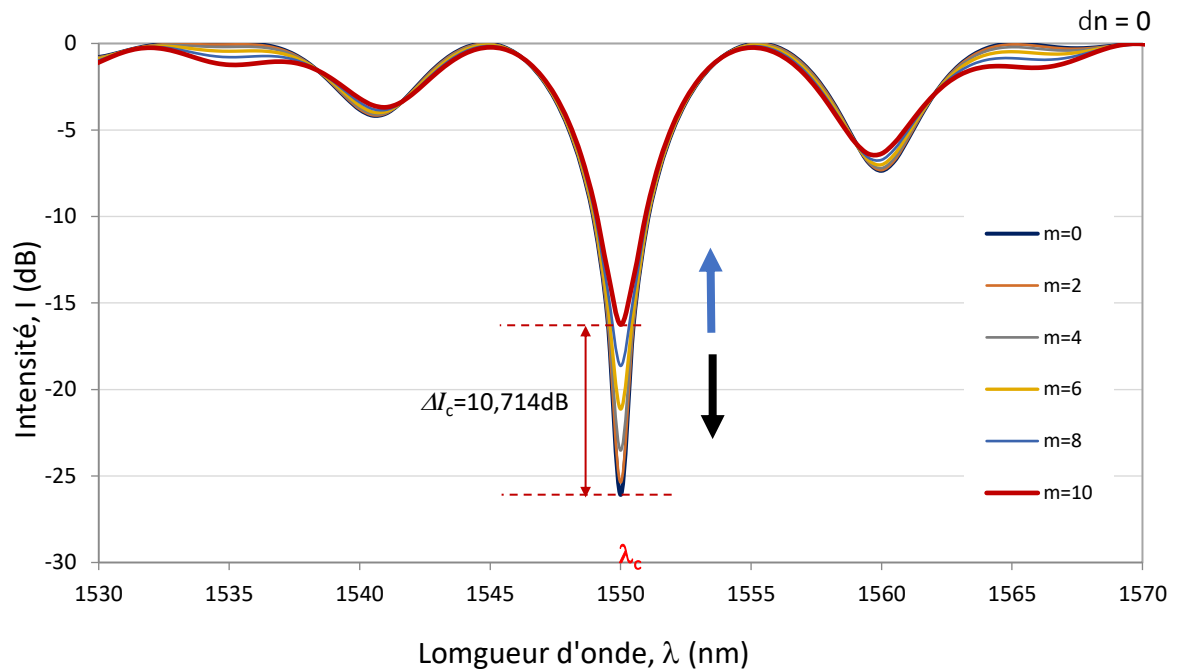


Figure 47: Réponse spectrale d'une cascade symétrique aux différences de température, m

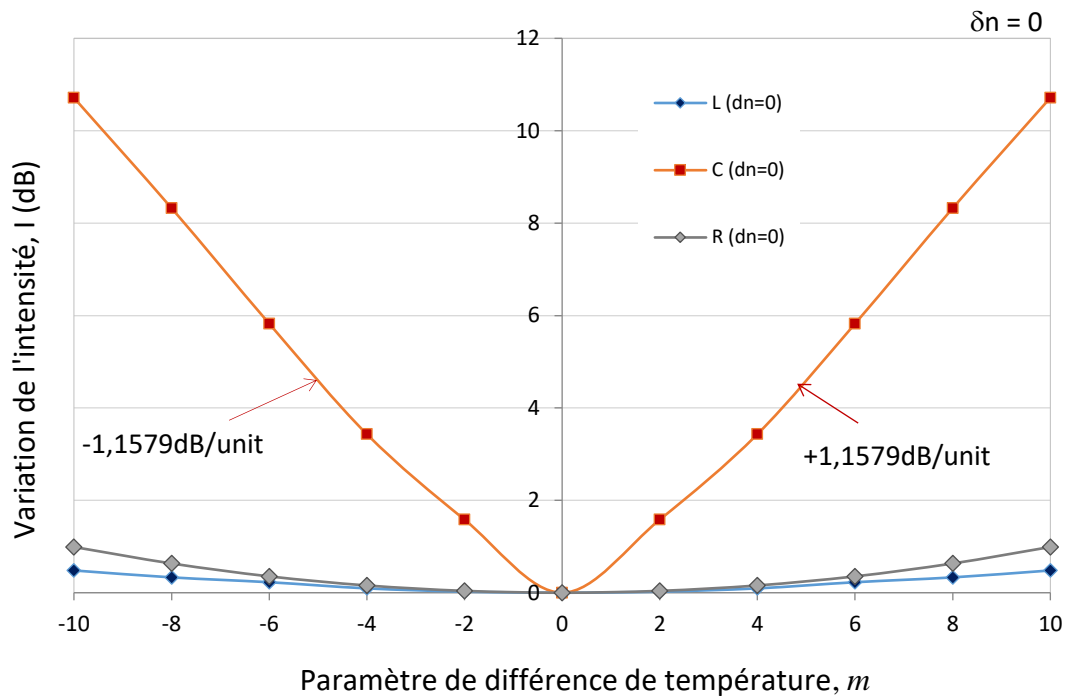


Figure 48: Variation de la profondeur ΔI par rapport à ΔT , m ($\sim \Delta T$).

Nous notons que chacune des variations de l'intensité minimale de couplage a une sensibilité différente de l'une de l'autre à $|\Delta T|$. Ainsi sur la Figure 48, les sensibilités de l'intensité de couplage de gauche (L), du centre (C) et de droite (R) sont respectivement proportionnellement à : $S_{\Delta T,L} = \pm 0,0578 \text{ dB}/^\circ \text{C}$, $S_{\Delta T,C} = \pm 1,1579 \text{ dB}/^\circ \text{C}$ et $S_{\Delta T,R} = \pm 0,1188 \text{ dB}/^\circ \text{C}$. La plage des variations des intensités de couplage est $\Delta I_c = 10,7 \text{ dB}$ et la plage de différence de température est $\Delta T_{\max} = |\Delta T| = 10$ unités. La sensibilité moyenne est donc : $S_{\Delta T,\text{moy}} = \frac{S_{\Delta T,L} + S_{\Delta T,C} + S_{\Delta T,R}}{3} = 0,45 \text{ dB/unité}$, mais la sensibilité maximale est $S_{\Delta T,\text{max}} = \pm 1,1579 \text{ dB/unité}$.

ii) Cas 2 : Cascade asymétrique et réseaux LPG non identiques

Nous considérons maintenant un C-LPG asymétrique avec $\eta = 1$. Dans ce cas, $\Delta n_{eff,0,1} \neq \Delta n_{eff,0,2}$ puisque nous introduisons une variation locale d'indice de réfraction $\pm dn$ qui affecte l'indice de réfraction effectif initial le long du réseau comme l'indique l'équation (56). Nous calculons ensuite les spectres pour m variant de 0 à ± 10 et $dn = 16 \cdot 10^{-6} riu$ puis $dn = 8 \cdot 10^{-6} riu$. Le graphique de la Figure 49 montre les changements spectraux lorsque le paramètre de différence de température de $m = \pm 10$.

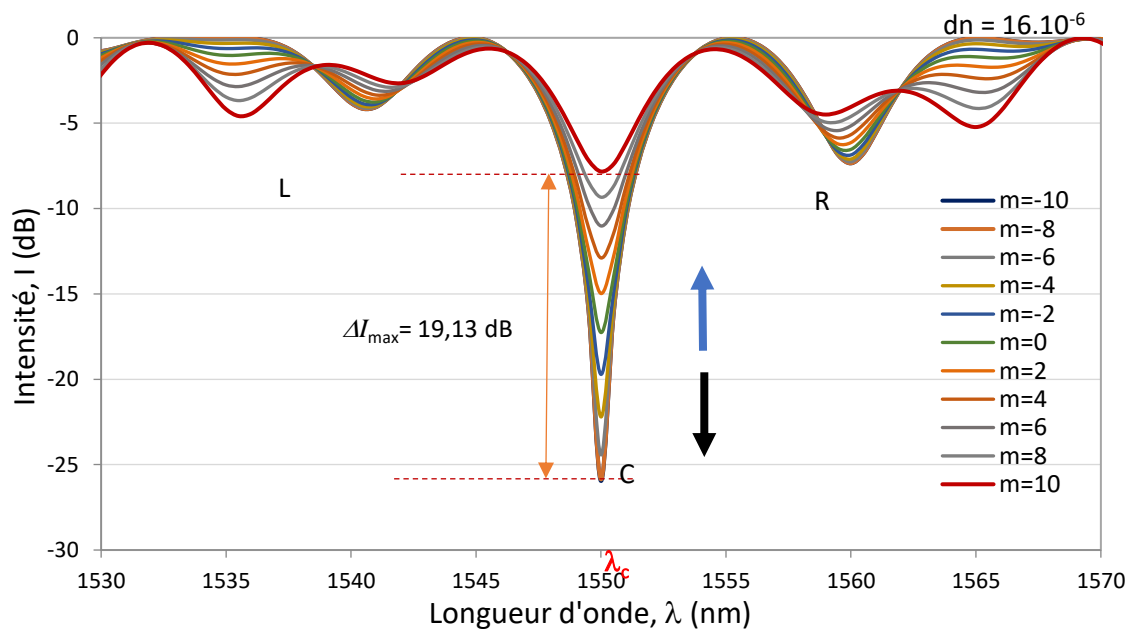


Figure 49: Réponses spectrales d'une cascade symétrique aux différences de température, m

La Figure 50 montre la réponse des changements de profondeur ΔI_c par rapport à m pour $dn = 16 \cdot 10^{-6} riu$.

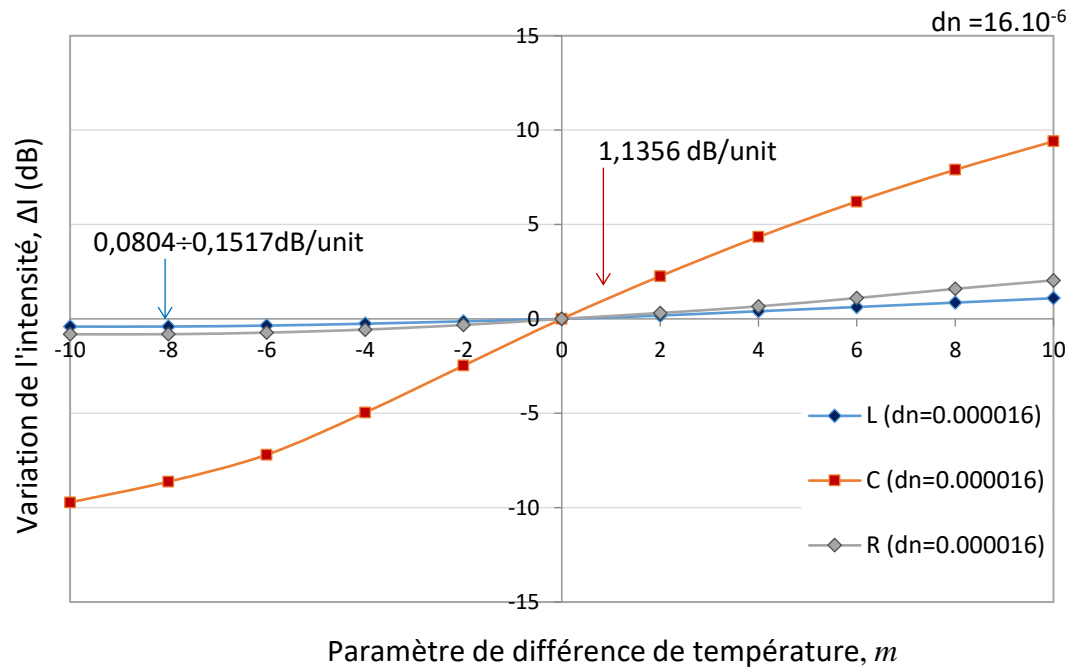


Figure 50: Pertes minimale ΔI_c en fonction de m ($\sim \Delta T$ pour $dn=16 \cdot 10^{-6}$ riu)

La Figure 51 et la Figure 52 résument les réponses pour différentes valeurs de dn et montrent que lorsque dn augmente, l'asymétrie est plus prononcée puisque les courbes $I_c = f(m)$ se décalent et la variation ΔI_c augmente. Selon la Figure 51, nous notons que pour $dn = 8 \cdot 10^{-6}$ riu, $\Delta I_{c,max} = 14,5$ dB pour le paramètre m compris entre ± 4 à ± 10 avec une sensibilité moyenne de $S_{\Delta T, moy} = 1,035$ dB/unité, mais le maximum est $S_{\Delta T, max} = \pm 1,1411$ dB/unité. Pour $dn = 16 \cdot 10^{-6}$ riu, $\Delta I_{c,max} = 19,125$ dB pour m variant de ± 0 à ± 10 avec une sensibilité moyenne de $S_{\Delta T, moy} = 0,956$ dB/unité, mais le maximum est $S_{\Delta T, max} = \pm 1,1356$ dB/unité comme indiqué.

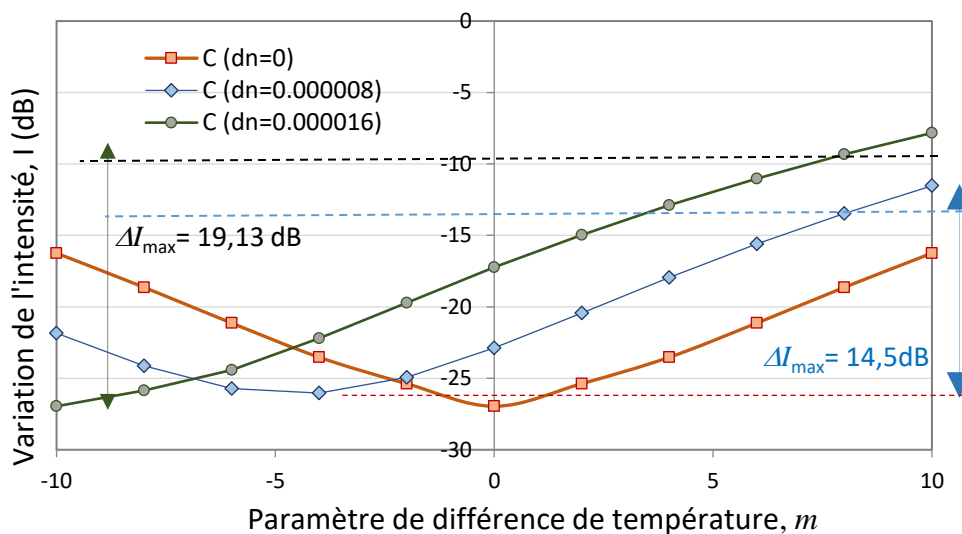


Figure 51: Comparaison des réponses au paramètre de différence de température, m pour les cascades symétriques et asymétriques pour l'intensité de couplage central

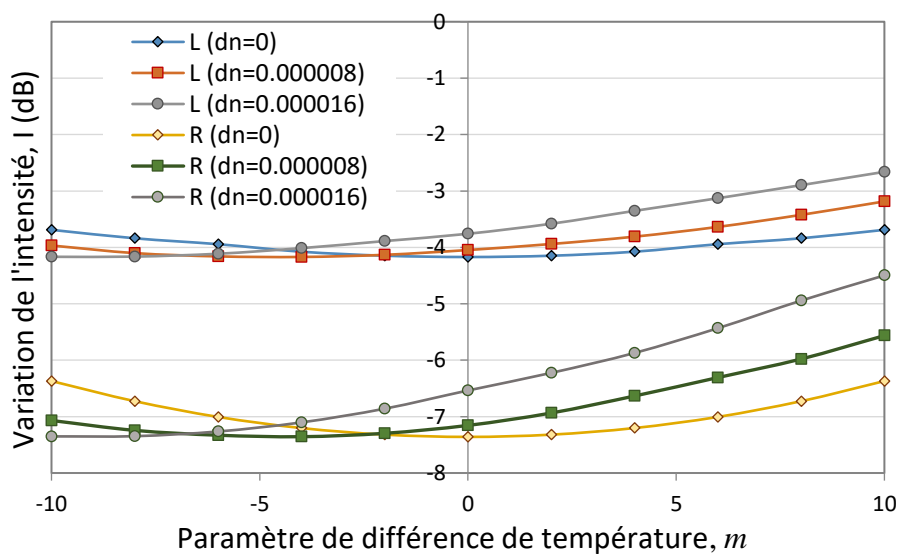


Figure 52: Comparaison des réponses au paramètre de différence de température, m pour les cascades symétriques et asymétriques pour l'intensité de couplage gauche et droit

En comparant la forme du graphe de la Figure 48 et celle de Figure 51, nous constatons qu'avec la cascade symétrique ($dn = 0$), il est impossible de connaître le signe du gradient

de température puisque pour le même m , on a la même valeur de I_c et donc seule la valeur absolue de la différence de température $|\Delta T|$ et une sensibilité moyenne de $S_{\Delta T, moy} = 1,07 \text{ dB/unité}$ sont détectées. Cependant, pour la cascade asymétrique, avec $dn = 16.10^{-6}$, il est possible de détecter le signe de la différence de température puis de mesurer la sensibilité moyenne à la différence de température de $S_{\Delta T, moy} > 0,956 \text{ dB/unité}$ entre $-\Delta T$ et $+\Delta T$. Comme pour une cascade symétrique, les puissances minimales latérales (gauche et droite) ont des sensibilités plus faibles par rapport à la puissance minimale du centre (C).

7.1.2.2 Avec dispersion de $\Delta n_{eff, i}$

$\Delta n_{eff, i}$ est dispersif puisqu'il existe une distance entre les LPG en cascade ($L_0 \neq 0$). Nous simulons maintenant une cascade de deux LPG ayant comme données : $N_1 = N_2 = 20$, $\Lambda_1 = \Lambda_2 = 250 \text{ }\mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 105 \text{ nm}$, $\lambda_c = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$, $\eta = 1$, $\sigma_{\Lambda, T} = 0,005 \text{ }\mu\text{m}/^\circ\text{C}$, $\sigma_{\Delta n, T} = 1,2.10^{-6} \text{ riu}/^\circ\text{C}$ et $dn = 6.10^{-6} \text{ riu}$. La dépendance $dn(\lambda)$ (63) à la longueur d'onde est prise en compte pour $\alpha_\lambda = 50 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$, $\lambda_0 = 1,61 \text{ }\mu\text{m}$. Les spectres résultants pour une distance intermédiaire de $L_0 = 22,12 \text{ mm}$ sont représentés à la Figure 53.

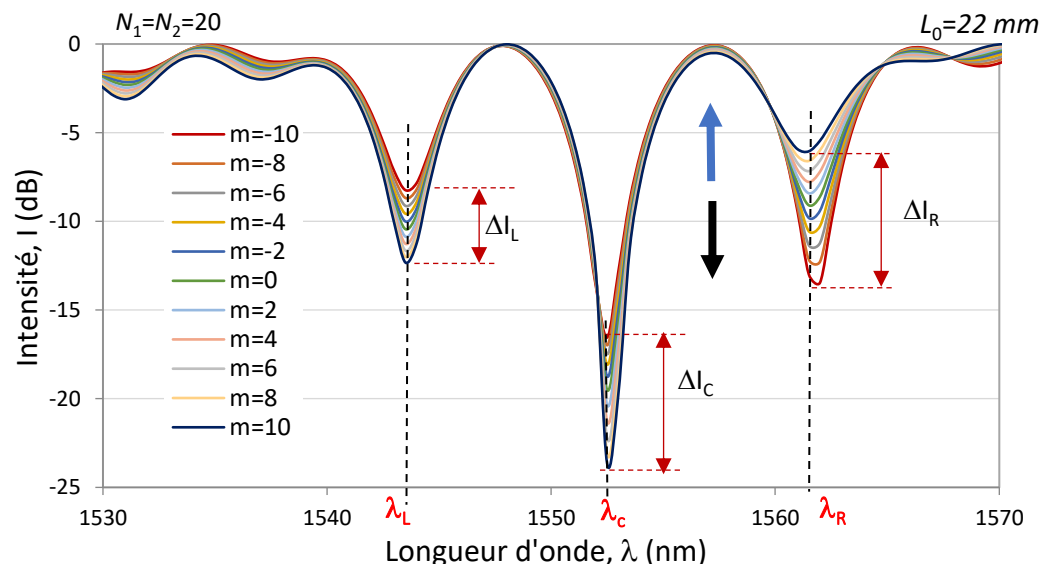


Figure 53: Réponses spectrales d'une cascade de deux LPG distants de $L_0=22,12$ mm avec un rapport de mode variable dans la section intermédiaire

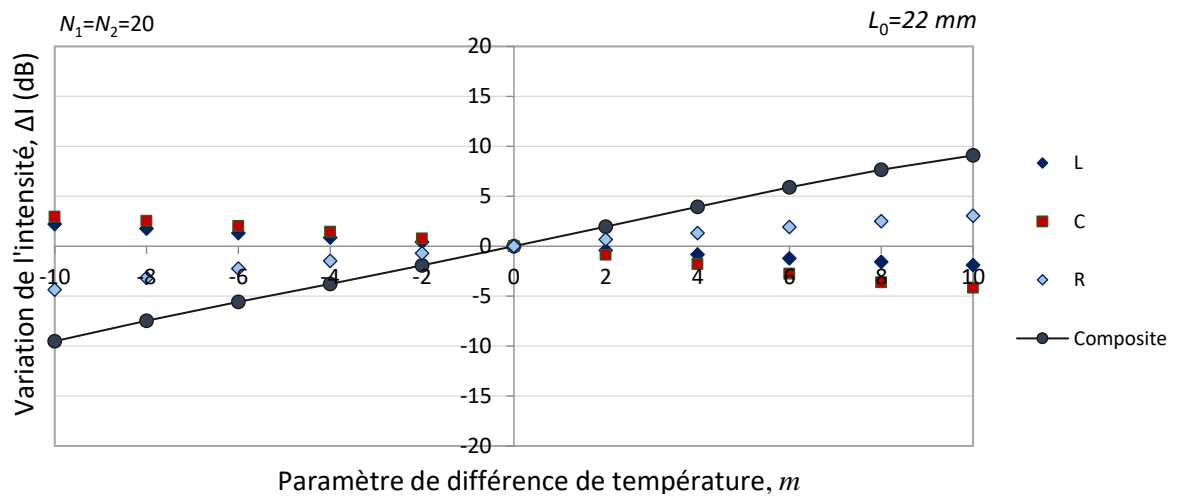


Figure 54: Variation de l'intensité par rapport à ΔT m pour $L_0=22,12$ mm montrant le retard de phase variable dans la section intermédiaire

Les courbes présentant la dépendance de la variation de l'intensité de couplage aux variations de la température sont représentées à la Figure 54. Les spectres résultants pour une distance intermédiaire de $L_0 = 42$ mm sont représentés à la Figure 55.

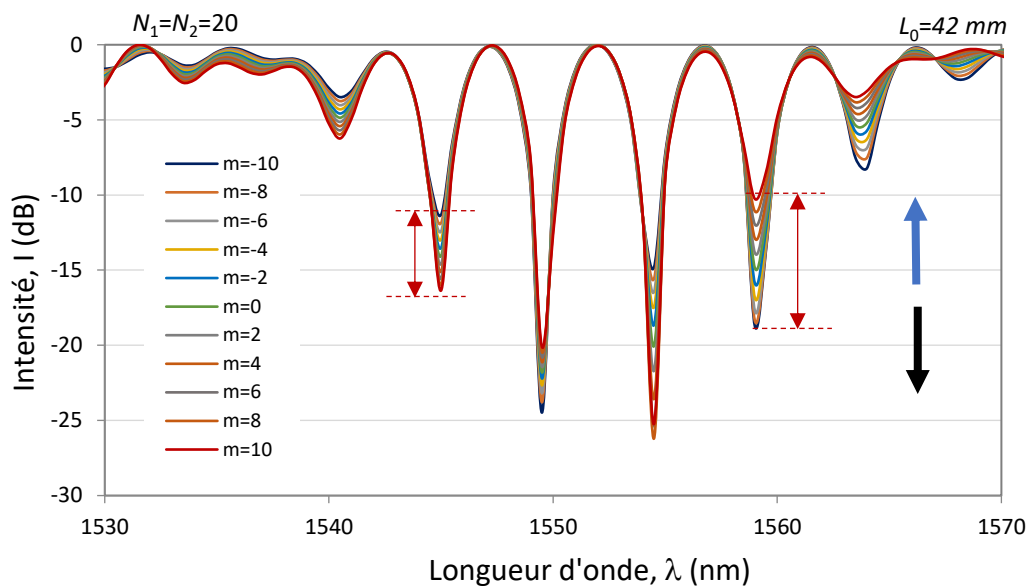


Figure 55: Réponses spectrales d'une cascade de deux LPG distants de $L_0=42$ mm avec un rapport de mode variable dans la section intermédiaire

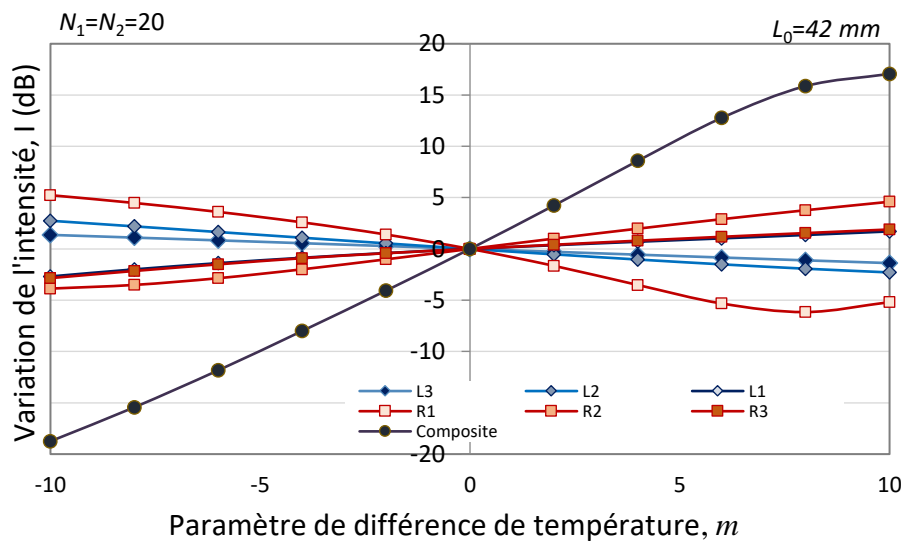


Figure 56: Variation de l'intensité par rapport à ΔT m pour $L_0=42$ mm montrant le retard de phase variable dans la section intermédiaire

Les courbes présentant la dépendance de la variation de l'intensité de couplage aux variations de la température sont représentées à la Figure 56. Nous constatons que les intensités de couplage latérales et centrales se déplacent dans la même direction mais de sens opposés (Figure 53 et Figure 55). Les dépendances $\Delta I_{c,i} = f(\Delta T)$ pour chaque intensité minimale de couplage sont présentées dans la Figure 54 et la Figure 56. Les intensités à gauche, à droite et au centre sont respectivement notées par un « L », « R » et « C ». Le fait d'avoir des intensités de couplages de sens contraires nous permet de définir un **signal composite** différentiel de intensités de couplage « ascendant » et « descendant » :

$$\Delta I = \sum \Delta I_{\uparrow} - \sum \Delta I_{\downarrow} \quad (64)$$

Les **signaux composites** résultants sont représentés par des cercles en noirs dans la Figure 54 et la Figure 56. Nous observons que les courbes des réponses composites sont **monotones** sur un intervalle par rapport au paramètre de différence de température m qui varie de -10 à 10. Cela signifie qu'en mesurant un tel signal composite, nous pouvons obtenir une réponse bien linéarisée ayant une sensibilité aux gradients de température bien plus élevée que les sensibilités individuelles de chaque puissance minimale (« L », « R » et « C »).

7.2 Expériences et résultats

7.2.1 Montage expérimental

Le même dispositif expérimental que celui de la Figure 41 est reconduit dans ce chapitre pour les mesures avec les nouveaux réseaux LPG en cascade fabriqués dans notre

laboratoire. La procédure expérimentale est semblable que celle du chapitre précédent. En effet, les deux réseaux en cascade de LPG inscrits par l'arc électrique ont été fabriqués à l'aide d'une machine à fusion de fibre. Les deux LPG d'une cascade ont été inscrits à partir de deux différentes fibres optiques fusionnées. L'une était dans une fibre SMF-28 et la seconde dans une fibre optique photosensible (PS) dopée au bore, car les LPG fabriqués à partir de ces deux fibres ont des sensibilités aux températures différentes. Le Tableau 8 présente les deux réseaux LPG distantes de $L_0 = 20 \text{ mm}$ puis de $L_0 = 25 \text{ mm}$.

Tableau 8: Réseaux LPG expérimentés

Désignations	Λ_0 (μm)	Méthodes
SMF-400-20-1	400	Arc électrique
PS-375-25-1	375	

Les LPG étant sensibles à la température, nous avons recouvert les réseaux avec une hotte pendant les mesures pour éviter les variations de température causées par les flux d'air environnant. Pour aussi éviter les problèmes de sensibilité croisée [137], une déformation constante a été maintenue par un matériel de masse m . Puisque l'indice de réfraction de la gaine n_{gaine} est directement affecté par l'indice de réfraction du milieu environnant où le réseau est installé automatiquement Δn_{eff} est aussi affecté. Par conséquent, pour tester la possibilité de changer artificiellement dn , chaque LPG est placé séparément et indépendamment dans une rainure en forme de U contenant de l'eau dans

le but d'introduire une différence entre $\Delta n_{eff,0,1}$ et $\Delta n_{eff,0,2}$. Les LPG en cascade sont symétriquement placés par rapport aux modules Peltier TEC.

Lorsque les deux LPG en cascade sont tous deux installés dans l'air (A/A), on a que $\Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0,2} = \Delta n_{eff,0}$ et la longueur d'onde centrale de résonance de chaque LPG s'exprime comme 71 :

$$\lambda_1 = \Delta n_{eff,0,1} \cdot \Lambda = \lambda_2 = \Delta n_{eff,0,2} \cdot \Lambda = \Delta n_{eff,0} \cdot \Lambda \quad (65)$$

Ainsi, la longueur d'onde centrale de l'enveloppe de la cascade correspondante est (66)

$$\lambda_{A/A} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2} = \lambda_2 = \Delta n_{eff,0} \cdot \Lambda \quad (66)$$

Lorsqu'un réseau LPG est immergé dans l'eau et l'autre exposé dans l'air, nous avons deux combinaisons possibles : (W / A) et (A / W).

Pour LPG_1 dans l'eau et LPG_2 dans l'air (W / A), la longueur d'onde centrale de l'enveloppe est (67)

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \Delta n_{eff,0,1} \cdot \Lambda = (\Delta n_{eff,0} - dn) \Lambda \quad \text{et} \quad \lambda_2 = \Delta n_{eff,0,2} \cdot \Lambda \\ &= \Delta n_{eff,0} \cdot \Lambda \end{aligned} \quad (67)$$

$$\lambda_{W/A} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2} = \left(\Delta n_{eff,0} - \frac{dn}{2} \right) \Lambda$$

Dans le cas contraire, c'est-à-dire LPG_1 dans l'air et LPG_2 dans l'eau (A / W), la longueur d'onde centrale de l'enveloppe est (68)

$$\lambda_1 = \Delta n_{eff,0,1} \cdot \Lambda = \Delta n_{eff,0} \cdot \Lambda \quad \text{et} \quad \lambda_2 = \Delta n_{eff,0,2} \cdot \Lambda = (\Delta n_{eff,0} - dn) \Lambda \quad (68)$$

$$\lambda_{A/W} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2} = \left(\Delta n_{eff0} - \frac{dn}{2} \right) \Lambda$$

Ainsi, en soustrayant (67) de (66) ou (68) de (66), nous obtenons tout le **spectre déplacé** (69) lorsque l'un des LPG est immergé dans l'eau :

$$\Delta\lambda = \lambda_{A/A} - \lambda_{W/A} = \lambda_{A/A} - \lambda_{A/W} = \frac{dn}{2} \Lambda \quad (69)$$

Ainsi en mesurant $\Delta\lambda$ nous pouvons donc trouver la bonne correction dn désirée.

7.2.2 Résultats et discussion

Pour tous les LPG en cascade, nous avons mesuré les réponses à la différence de température ΔT comprise entre -40°C à $+40^\circ\text{C}$ pour une température moyenne de $T_{moy} = 25^\circ\text{C}$ ensuite, nous avons mesurés la réponse à une température comprise entre 5°C à 45°C pour des ΔT constants (voir les combinaisons du Tableau 4 et du Tableau 5). Comme le montrent les simulations, des retards de phase supplémentaires sont induits par la température. Par exemple, la section intermédiaire provoque des décalages des puissances minimales. Pour éviter cela, nous avons pris soin de placer la cascade centrée par rapport aux deux modules Peltier. De cette manière, les différences de température provoquent des décalages négligeables des puissances minimales.

La Figure 57 présente les réponses aux changements de température moyenne T_{moy} du LPG_SMF-400-20-1 en cascade. Nous observons qu'un changement de la température moyenne entraîne un changement de longueur d'onde de couplage $\Delta\lambda_c$ (Figure 58).

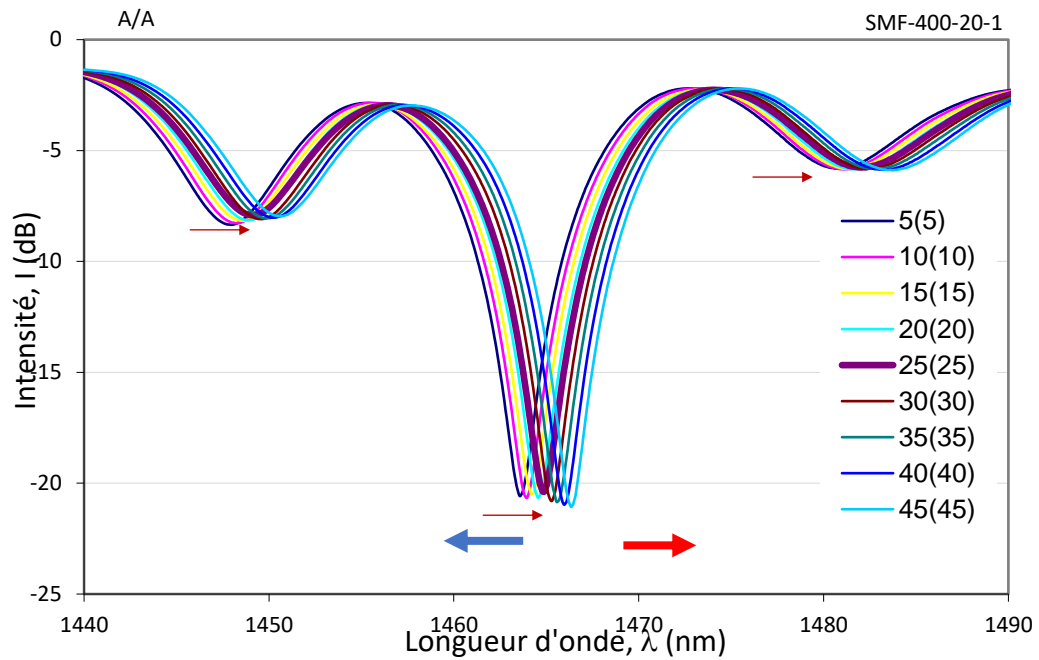


Figure 57: Réponses spectrales à la température du LPG SMF-400-20-1 en cascade

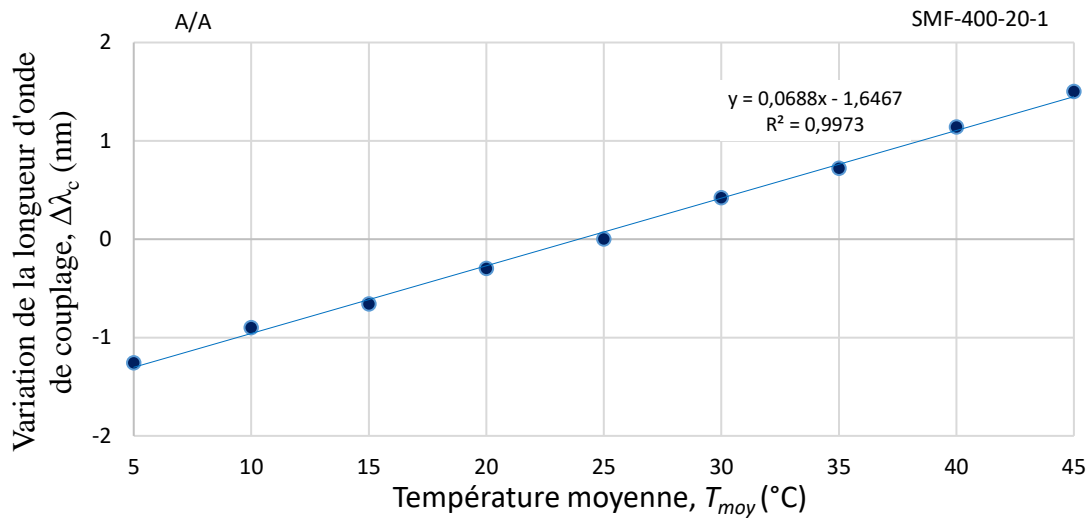


Figure 58: Décalage horizontal de l'intensité de couplage I_c par rapport à la température moyenne T_{moy} .

La Figure 59 présente les réponses aux changements de la différence de température ΔT du LPG_SMF-400-20-1 en cascade. Nous observons que les changements ΔT ne

provoquent que des changements de profondeur de l'intensité de couplage ΔI_c (Figure 60).

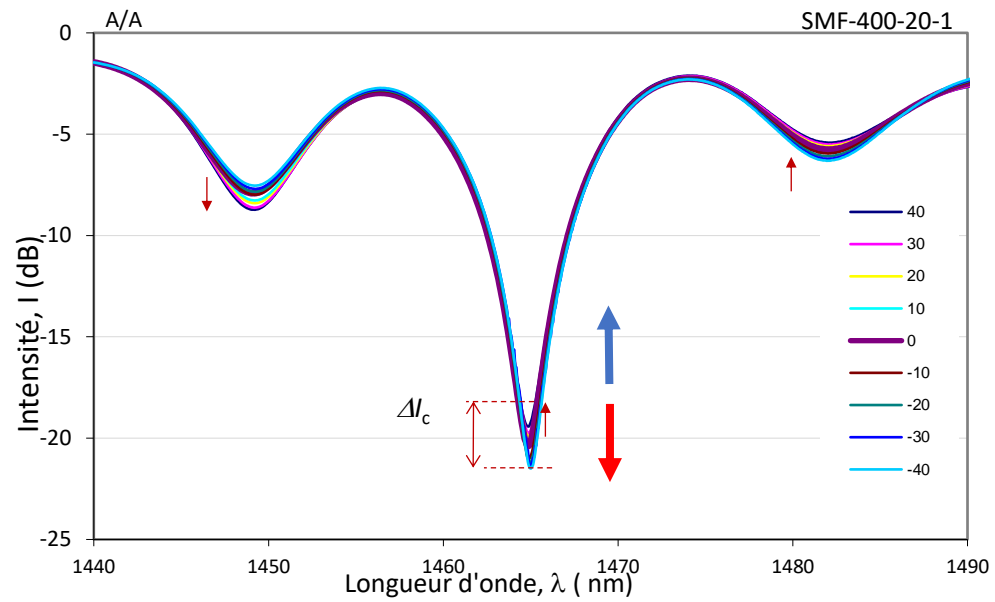


Figure 59: Réponses aux gradients de température du LPG SMF-400-20-1 en cascade

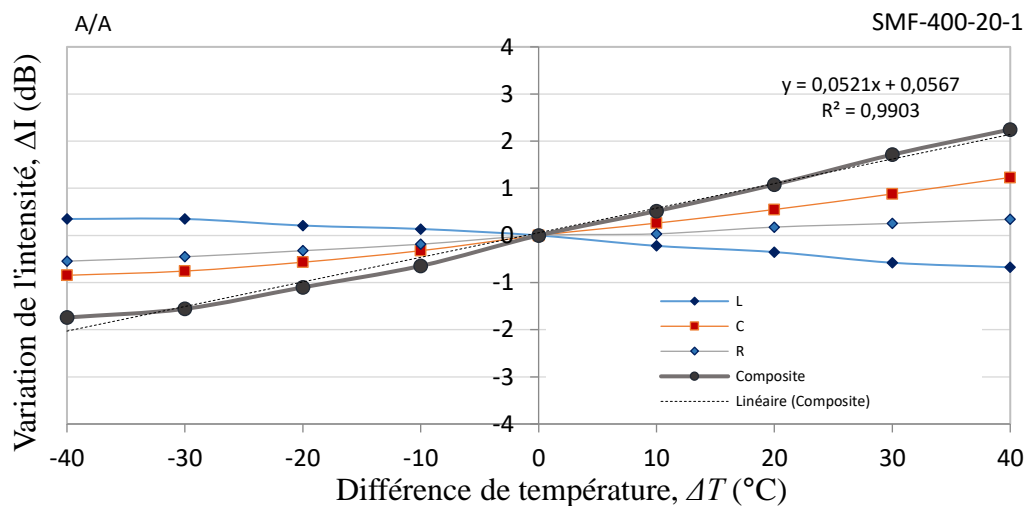


Figure 60: Variation de l'intensité de couplage minimale ΔI_c en fonction de ΔT

La sensibilité aux variations de température moyenne $S_{T_{\text{moy}}} = 68,8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ (Figure 58), tandis que la sensibilité aux différences de température ΔT est différente pour chacune des intensités de couplage minimales. L'intensité minimale de gauche diminue tandis que les intensités minimales du centre et de droite augmentent. La réponse composite selon (64) s'est avérée être $S_{\Delta T} = 0,052 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ (Figure 60). Pour tester les simulations de ce chapitre en lien avec l'introduction des gradients d'indice local dn qui fait que les LPG ne sont pas identiques, nous plaçons consécutivement le côté gauche ou droit de la cascade dans l'eau et l'autre moitié à l'air libre. Les résultats pour le spectre en cascade pour Air/Air (A/A), Air / Eau (A/W) et Eau / Air (W/A) à 25°C sont indiqués dans la Figure 61, tandis que les courbes de dépendance de la variation de l'intensité de couplage aux différences température ΔT pour les combinaisons (A / W) et (W / A) sont respectivement illustrées aux Figure 62 et Figure 63.

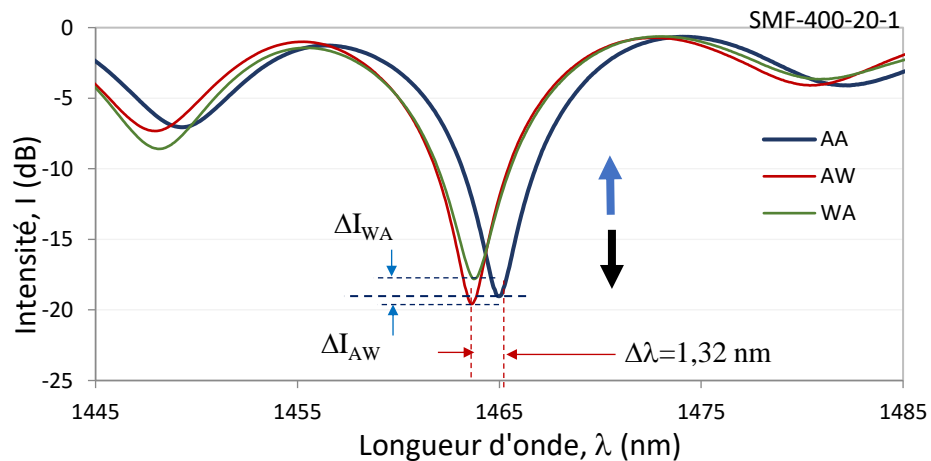


Figure 61: Changements de la profondeur de l'intensité minimale I_c par rapport à la différence de température ΔT du LPG en cascade SMF-400-20-1 : LPG gauche dans (A/A), (W/A) et (A/W)

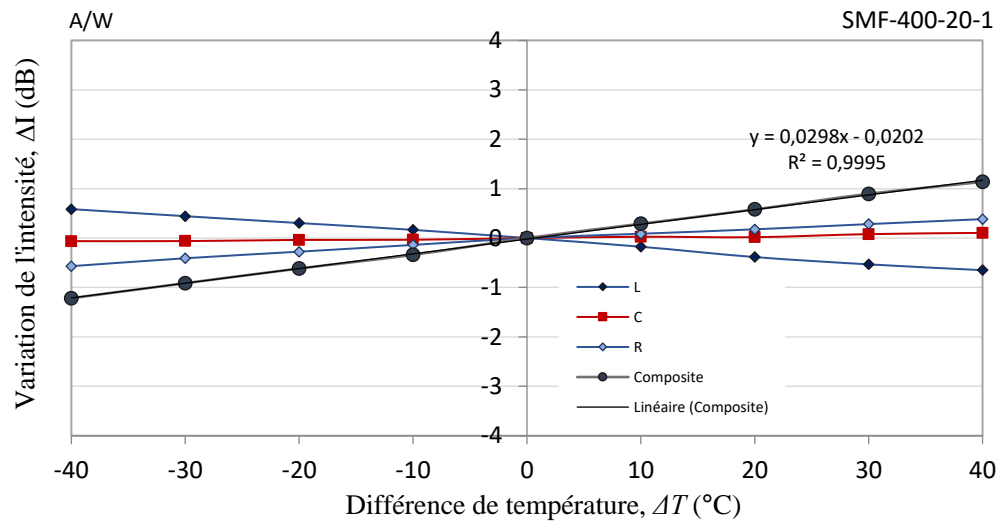


Figure 62: Variation de l'intensité de couplage I_c en fonction de ΔT pour (A/W)

Nous remarquons que les spectres à (A/W) et (W/A) sont décalés vers une longueur d'onde inférieure de $\Delta\lambda = 1,32$ nm (Figure 61). Ayant mesuré $\Delta\lambda$, il est possible de calculer la correction dn induite par l'immersion dans l'eau à partir de l'équation (69), ainsi pour $\Lambda = 400$ μm , nous avons $dn = 6,6 \cdot 10^{-6}$ **riu**.

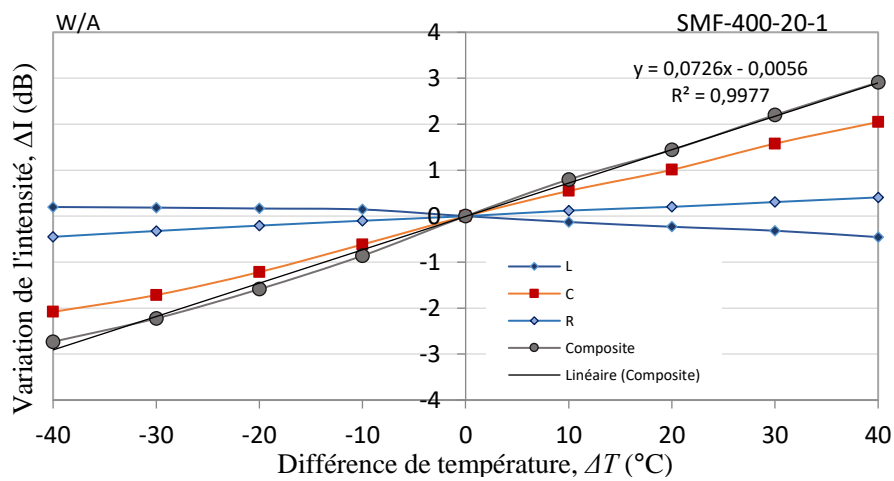


Figure 63: Variation de l'intensité de couplage I_c en fonction de ΔT pour (W/A)

Nous remarquons également que les changements de la profondeur $\Delta I_{W/A}$ et $\Delta I_{A/W}$ par rapport au spectre de (A/A) sont différents (Figure 61). Cela suggère que même dans l'air, les deux LPG sont différents, c'est-à-dire $\Delta n_{eff,0,1} \neq \Delta n_{eff,0,2}$. Nous supposons que cela est dû au changement progressif de la qualité de l'arc électrique pendant la fabrication des réseaux LPG. Cette affirmation est confirmée par les sensibilités composites à la différence de température ΔT calculées : $S_{\Delta T, A/W} = 0,0298 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ pour (A/W) et $S_{\Delta T, W/A} = 0,0726 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ pour (W/A) donnant une sensibilité moyenne de $S_{\Delta T, moy} = 0,0512 \text{ dB}/^\circ\text{C}$. Cette sensibilité moyenne est approximativement la même que la sensibilité de la cascade dans l'air (A/A) $S_{\Delta T, A/A} = 0,0521 \text{ dB}/^\circ\text{C}$.

Ces résultats montrent que dans le cas (A/W) l'asymétrie initiale dans (A/A) s'oppose à la correction dn introduite naturellement par l'eau, alors que dans le cas (W/A) elle amplifie cette asymétrie (plus prononcée). La Figure 64 présente les résultats d'une autre cascade de deux réseaux PS-375-25-1 qui présente les intensités de couplages minimales à gauche (L_1, L_2, L_3) et trois à droite (R_1, R_2, R_3). Les changements de profondeur de ces intensités de couplages minimales se placent dans la même direction mais de sens opposés comme on le voit à la Figure 64, ce qui donne une réponse différentielle linéaire pour chaque paire $L_i - R_i$ avec $i = \{1,2,3\}$ représentée à la Figure 66. Nous pouvons composer la réponse différentielle totale comme $L - R = \sum L_i - \sum R_i$ également présentée à la Figure 66. La sensibilité moyenne lorsque les deux extrémités sont dans l'air (A/A) est de $S_{\Delta T, A/A} = 0,1301 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ (en cercle rouge) et de $S_{\Delta T, A/W} = 0,1186 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ (cercle en rouge) lorsque la partie droite est immergée dans l'eau (A/W) (Figure 67). C'est environ

2,5 fois plus élevé que la fibre SMF-28. Comme le prédisent les simulations, les réponses $\Delta I = f(\Delta T)$ des intensités de couplages minimales de gauche sont symétriques à celles de droite. Les signaux différentiels ΔI pour chaque paire $L_i - R_i$ sont monotones et cela permet de déterminer à la fois la valeur et le signe de la différence de température ΔT introduite aux extrémités des LPG_ PS-375-25-1 en cascade.

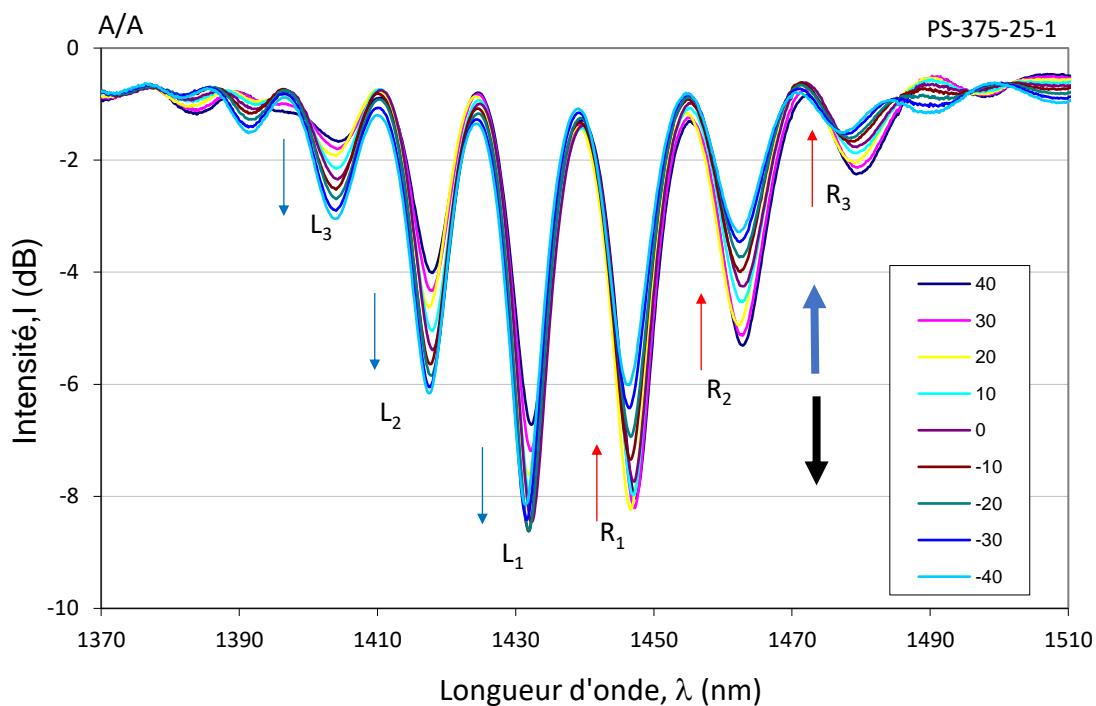


Figure 64: Réponses spectrales du LPG en cascade PS-375-25-1 aux différences de température ΔT

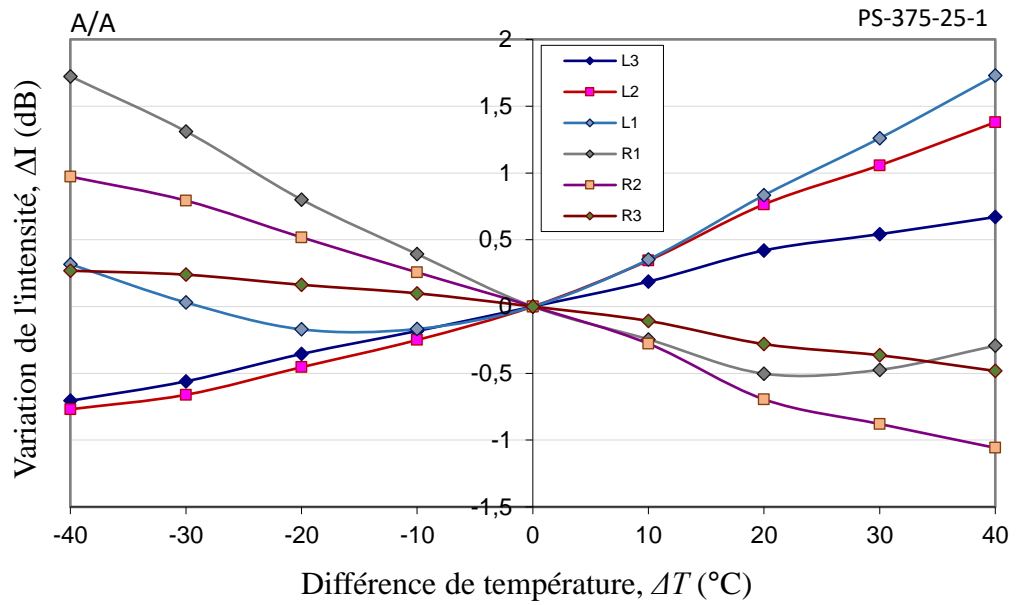


Figure 65: Changements de profondeur de toutes les intensités de couplage par rapport à ΔT

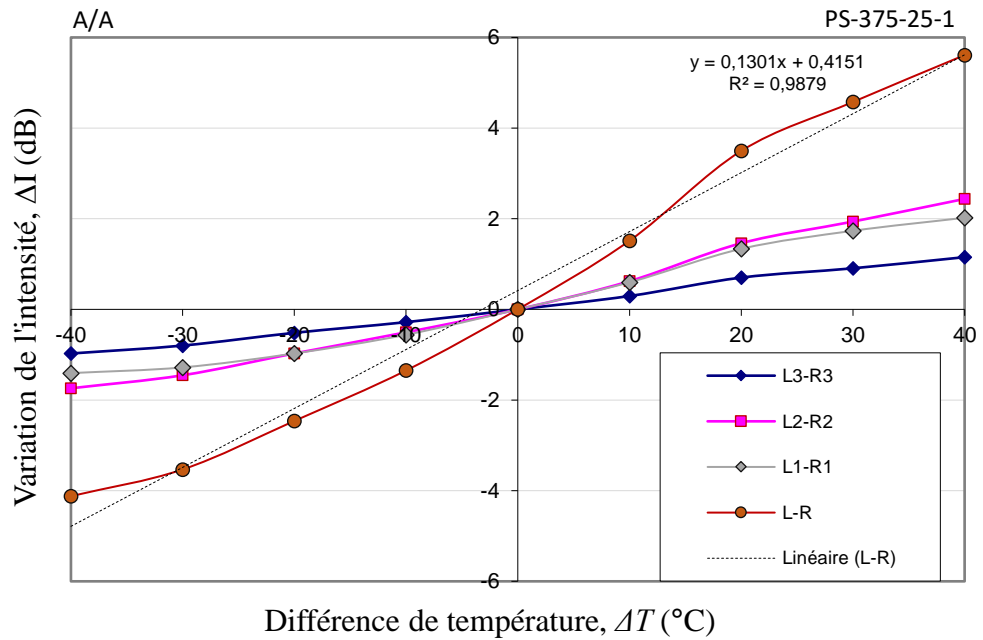


Figure 66: Réponses différentielles des paires et réponse différentielle totale

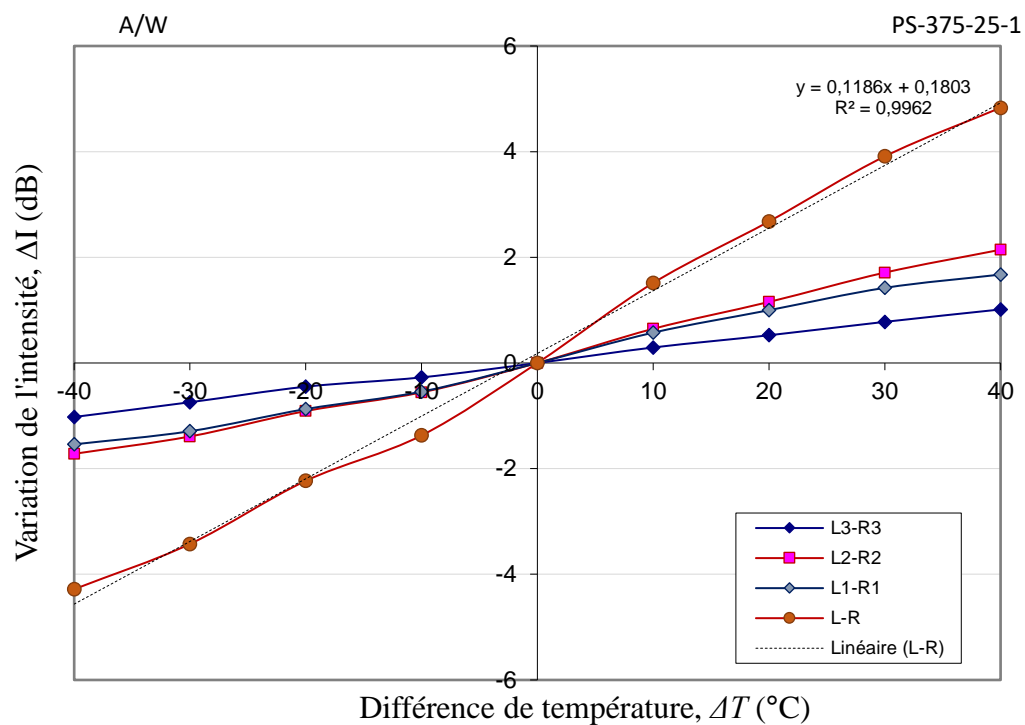


Figure 67: Réponses différentielles des paires et réponse différentielle totale avec la partie droite du LPG dans l'eau (A/W)

Les réponses des LPG aux de températures moyennes lorsque $T_1 = T_2 = T$ sont présentées à la Figure 68 et les décalages de la longueur d'onde centrale en fonction de la température $\Delta\lambda_c = f(T_{moy})$ sont présentés à la Figure 69. Pour ce réseau, la correction induite par l'eau s'est avérée être $dn = 6.10^{-6}riu$.

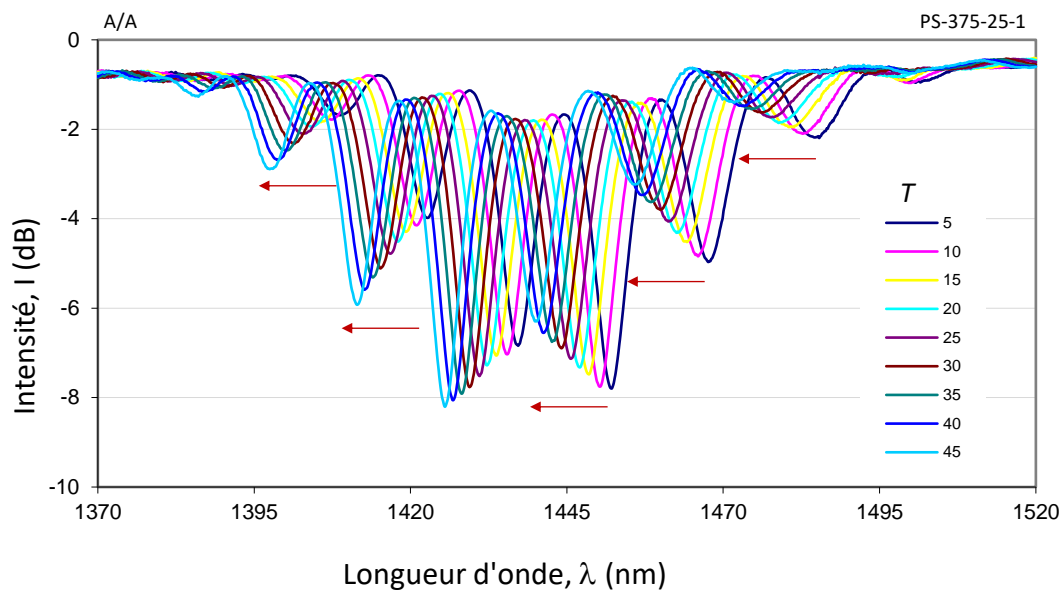


Figure 68: Décalage de longueur d'onde centrale λ_c en fonction des températures moyennes

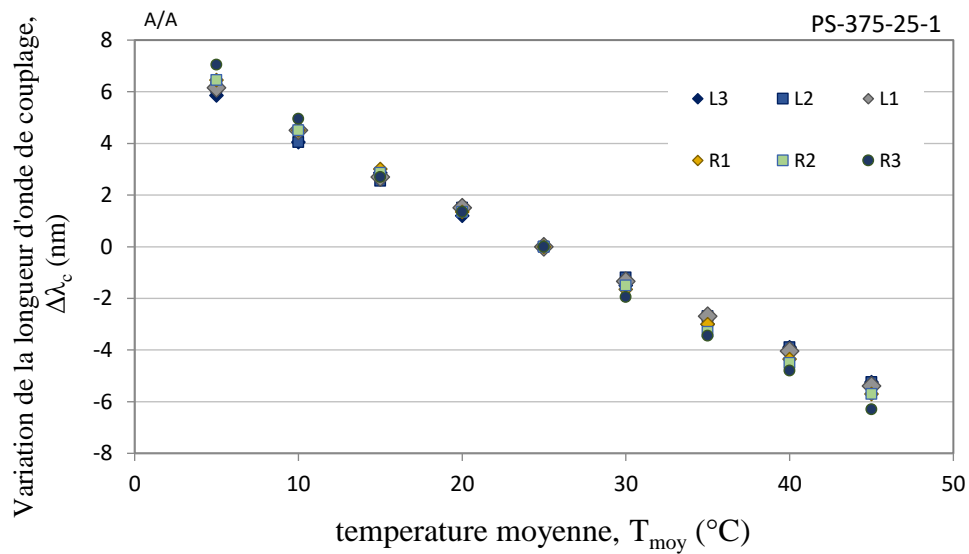


Figure 69: Courbe $\Delta\lambda_c = f(T_{moy})$

Les sensibilités aux différences de température pour chaque paire de signaux différentiels et pour le signal différentiel global sont énumérées dans le Tableau 9. La sensibilité individuelle à la température de chaque puissance minimum est aussi présentée dans la première ligne du Tableau 9 et celles-ci augmentent de $-0,276 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ pour L_3 à $-0,328 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ pour R_3 , la sensibilité moyenne étant de $-0,294 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, soit environ 4,2 fois plus élevée que celle des LPG en cascade SMF-400-20-1 et 22 fois plus élevée que la sensibilité des FBG standard. La sensibilité composite pour les LPG en cascade PS est de $0,1301 \text{ dB}/^\circ\text{C}$, ce qui est environ 2,5 fois plus élevée que la sensibilité composite des LPG en cascade SMF-400-20-1.

Tableau 9: Sensibilités à T_{moy} et aux ΔT pour les réseaux en cascade PS-375-25-1.

	$S_{T_{\text{moy}}} \text{ (nm}/^\circ\text{C)}$		$S_{\Delta T} \text{ (dB}/^\circ\text{C)}$
L_1	-0,285	$\Delta I_1 = L_1 - R_1$	0,0277
R_1	-0,301		
L_2	-0,276	$\Delta I_2 = L_2 - R_2$	0,0548
R_2	-0,303		
L_3	-0,276	$\Delta I_3 = L_3 - R_3$	0,0475
R_3	-0,328		
Final	-0,294	$\Delta I_1 = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3$	0,1301

Nous observons que les courbes $\Delta I = f(\Delta T)$ augmentent de façon monotone cela signifie que $\Delta n_{\text{eff},0,1} \neq \Delta n_{\text{eff},0,2}$ comme le prédisaient les simulations dans ce chapitre. D'autre part, puisque pour les deux LPG, les puissances minimales de chaque côté du centre se déplacent dans la même direction mais de sens opposés, cela signifie que pour les deux réseaux, la différence d'indice de réfraction effective dépend de la longueur

d'onde et dn change de signe sur le spectre du réseau selon (63). Il est à noter que cet effet de dispersion est observé pour les LPG avec une période particulière $375 \mu\text{m}$.

En plus de la comparaison faite dans le Tableau 1 entre le réseau FBG et le réseau LPG, il vaut la peine de comparer la capacité de mesure d'un capteur à fibre optique basé sur un LPG_PS en cascade et d'un capteur à fibre optique basé sur un FBG. Jusqu'à présent, sur une plage de température de $[-50 \text{ }^\circ\text{C}; +50 \text{ }^\circ\text{C}]$, nous dénotons une sensibilité à la température moyenne mesurée par un capteur à base de FBG en cascade de $S_{T_{\text{moy}}} = 13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Les réseaux FBG, d'une longueur de 1 mm, sont espacés de 1 mm pour former une cascade. Cette sensibilité mesurée par la cascade FBG reste largement inférieure aux sensibilités à la température moyenne mesurée par nos réseaux LPG développés et fabriqués dans nos laboratoires. De plus, avec la longueur de la cascade LPG qui est de $L = 65 \text{ mm}$, il est possible d'obtenir des mesures pour une grande surface. Il va falloir concaténer beaucoup plus de réseaux FBG pour avoisiner les mêmes mesures de deux LPG. Aussi, la bande passante des LPG est largement supérieure à celle des FBG donc le LPG possède une grande capacité de mesures. Alors pour une longueur de deux cascades de LPG $L = 65 \text{ mm}$ nous pouvons avoir un agencement de jusqu'à 32 FBG pour une similitude de mesures. Avec une précision de mesure de 1 pm, un agencement de FBG est un capteur à fibre optique quasi-distribué qui peut mesurer une température moyenne T_{moy} , un profil de température et des différences de température ΔT avec une précision de $0,1^\circ\text{C}$. La cascade de deux réseaux LPG_PS avec une sensibilité de $294 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ peut mesurer la température moyenne avec une précision jusqu'à 20 fois supérieure à celui de

l'agencement de FBG, c'est-à-dire avec une précision d'au moins $0,01^{\circ}\text{C}$. Pour une sensibilité au gradient thermique de $0,13 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ et une précision de mesure de la profondeur de la puissance minimale ΔI de $0,01\text{dB}$, les variations de différence de température ΔT peuvent être mesurées avec une précision meilleure que $0,1^{\circ}\text{C}$.

Dans le cadre de la mesure simultanée satisfaisante du gradient de température et de la température moyenne avec une meilleure précision et à coût potentiellement très bas, les capteurs à fibre optique à base de réseaux LPG en cascade sont donc les meilleurs choix. C'est le cas lorsque les flux thermiques et la température moyenne sont nécessaires pour surveiller les processus de chauffage / refroidissement ou encore pour la surveillance le transfert de chaleurs dans les structures du génie civil. De plus, des LPG en cascade avec des sensibilités encore plus élevées peuvent être développés et fabriqués en choisissant correctement le mode excité de gaine m , la meilleure période Λ et en introduisant de manière appropriée la correction délibérée dn à l'indice de réfraction effectif $\Delta n_{eff,0}$ du LPG.

7.3 Conclusion

Le résultat obtenu dans cette étude nous permet de formuler les conclusions suivantes.

1. Selon nos résultats théoriques et expérimentaux, l'introduction d'un gradient d'indice de réfraction local dans le réseau LPG modifie considérablement les réponses $\Delta I = f(\Delta T)$ de manière monotone et donc permet de mesurer ΔT et de connaître en même temps son signe. Ce facteur de correction dn est déterminé par des calculs comme nous l'avons fait dans ce chapitre.

2. Des simulations théoriques et des expériences montrent qu'en présence de dn , le signe de la différence d'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,0}$ est connu ce qui impose le sens du déplacement de la profondeur de l'intensité de couplage. Dans ce chapitre, nous avons observé un déplacement dans le sens opposé des intensités de couplage situées de part et d'autre du spectre centrale (C). La résultante du signal composite $\Delta I = \sum \Delta I_{\uparrow} - \sum \Delta I_{\downarrow}$ des changements d'intensité différentielle $\Delta I = f(\Delta T)$ présente également une augmentation monotone et permet de mesurer ΔT et son signe.

3. Nous avons montré qu'en introduisant délibérément une simple variation de dn dans $\Delta n_{eff,0,i}$ le long d'un LPG, nous pouvons décaler la réponse du LPG aux gradients thermiques $\Delta I = f(\Delta T)$ de sorte que le réseau mesure simultanément l'amplitude du gradient et sa direction.

4. Alors que les différences de température ΔT aux extrémités de la cascade provoquent des changements dans les profondeurs des puissances minimales, les changements de température des deux LPG provoquent des décalages de la longueur d'onde centrale $\Delta \lambda_C$ qui génèrent des sensibilités à la température moyenne de $S_{T_{moy}} = 68,8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ pour la fibre SMF et $S_{T_{moy}} = -294 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ pour la fibre PS.

8 Mesure simultanée du flux thermique et de la température moyenne dans un bloc de béton à l'aide de réseaux de fibres optiques à longue période non uniformes

Les résultats du précédent chapitre ont montré qu'en introduisant un gradient d'indice de réfraction local dans le réseau LPG, la profondeur de l'intensité minimale de couplage $\Delta I = f(\Delta T)$ augmente considérablement de manière monotone et donc nous sommes capables de calculer l'amplitude du gradient de température et même de déterminer sa direction et son signe.

Ce **facteur de correction** dn a été introduit dans des réseaux LPG inscrits dans des fibres photosensibles par la méthode d'irradiation aux lasers à CO_2 . La fabrication par laser CO_2 a été optimisée par le choix des paramètres de réseau (période Λ , nombre des périodes N). La modification de la différence des indices de réfractives effectives Δn_{eff} est produite en variant la puissance optique relative du laser (en %) et vitesse de balayage du faisceau. Δn_{eff} varie avec la puissance du laser et le temps d'exposition de la fibre au rayonnement.

Dans le domaine de la construction, les structures civiles et industrielles sont soumises à des modifications très dommageables induites par l'usure, les erreurs de conception et de construction, les exploitations abusives, les surcharges et certains événements naturels inattendus tels que les tremblements de terre, les glissements de terre, le réchauffement climatique, gel et dégel [10]. Les infrastructures et ouvrages civils nécessitent donc

plusieurs capteurs pour constamment surveiller et contrôler certains paramètres physiques et chimiques tels que l'humidité, la température, les contraintes mécaniques, la croissance des fissures. Les capteurs à fibre optique basés sur les réseaux LPG sont de meilleurs candidats pour répondre à ces besoins puisqu'ils sont sensibles à de nombreux paramètres physiques et chimiques mesurables. Ces nouveaux fluxmètres optiques permettront une lecture précise du flux de chaleur et de la température des substrats de matériaux de construction. Dans ce chapitre, des mesures simultanées de la température moyenne T_{moy} et de la différence de température ΔT dans des blocs de béton sont rapportées. À cette fin, des réseaux à longue période (LPG) ont été mis en service dans une fibre optique photosensible dopée au bore à l'aide d'un laser CO_2 pulsé. Comme déjà présenté dans les chapitres précédents, la température moyenne T_{moy} et les différences de température ΔT se sont avérées être une combinaison linéaire du décalage spectral horizontal de la longueur d'onde de couplage λ_c et du décalage spectral vertical de l'intensité minimale de couplage I_c . Nous avons récemment montré théoriquement et démontré expérimentalement que les LPG simples ou en cascade avec une non-uniformité longitudinale sont sensibles à la fois au gradient de température et à la température moyenne [54] [136] [138].

Dans ce chapitre issu de notre quatrième article [139], les réseaux LPG ont été installés dans un bloc de béton. Les résultats expérimentaux montrent que des LPG non uniformes peuvent être utilisés pour déterminer simultanément l'amplitude et le signe du gradient de température aux extrémités d'un LPG ainsi que la température moyenne.

8.1 Analyse théorique et expérimental pour un réseau LPG

8.1.1 Réseaux LPG en cascade non uniformes pour les mesures thermiques

Il est bien de rappeler que le réseau à longue période (LPG) est une structure périodique le long d'une fibre optique monomode qui provoque un couplage de modes entre le mode fondamental du cœur LP_{01} et les modes d'ordre supérieurs de la gaine LP_{0m} . Ces modes sont caractérisés par leurs constantes de propagation β_{01} , β_{0m} et $k = 2\pi/\lambda$ lorsque la période Λ des perturbations de la fibre est :

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\beta_{01} - \beta_{0m}} \quad (70)$$

Dans le cas général Λ et Δn_{eff} dépendent de la température ambiante et de la déformation. Plus précisément, la dépendance à la température peut être écrite comme présentée par l'équation (28). Comme mentionné au chapitre précédent, les caractéristiques de la fibre telles que sa période et son indice de réfraction changent en fonction de la variation de la température et cela, respectivement causé par son coefficient de dilatation thermique et son coefficient thermo-optique (paramètres physiques de la fibre). Alors que la période Λ augmente avec la température, la différence d'indice de réfraction effective Δn_{eff} peut augmenter ou diminuer avec la température en fonction du type de fibre optique :

- augmente pour une fibre de communication SMF28 classique
- diminue pour une fibre photosensible dopée au bore.

Dans les chapitres précédents, nous avons montré que si un réseau LPG est constitué de deux parties non identiques avec $\Lambda_1 \neq \Lambda_2$ et $\Delta n_{eff,1} \neq \Delta n_{eff,2}$ comme le montre la Figure 46, le réseau devient sensible aux gradients de températures et aux températures moyennes. Pour expliquer les effets de la température et des gradients de température le long du réseau, nous nous référons aux Figure 46 et Figure 70. Un réseau non uniforme peut être considéré comme constitué de deux sous-réseaux dont les longueurs d'onde de couplages $\lambda_{c,1}$ et $\lambda_{c,2}$ s'expriment comme l'équation (28).

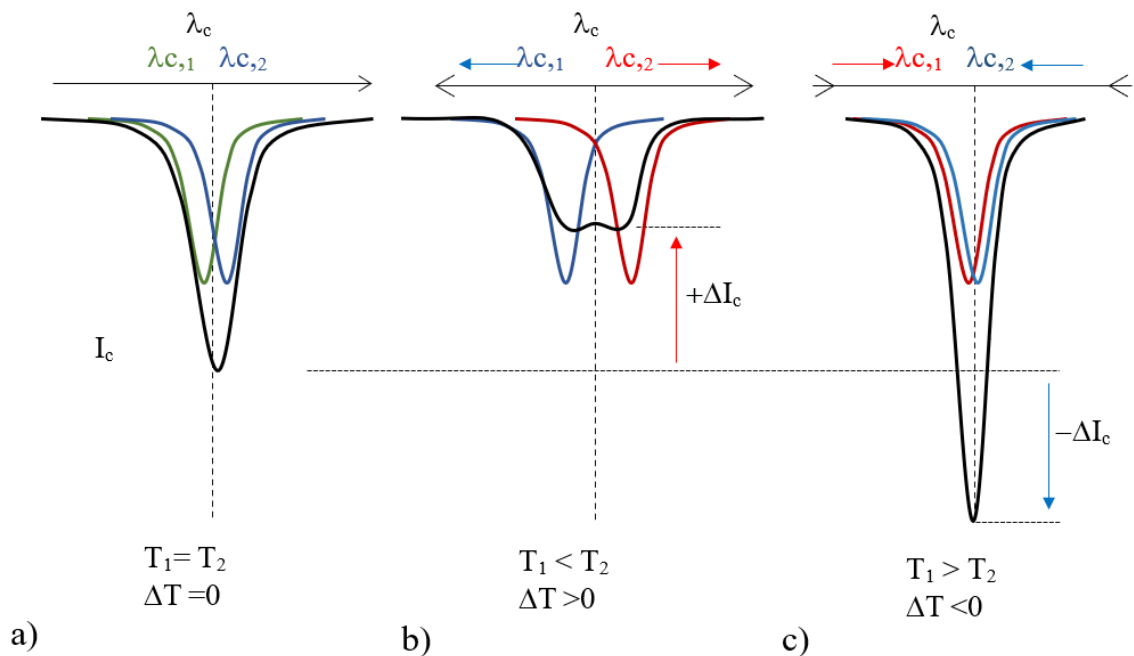


Figure 70: Réponse au gradient de température d'un LPG non uniforme

Les spectres de ces réseaux sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres lorsqu'ils sont à la même température ambiante T_0 . Plus précisément, lorsque les températures T_1 et T_2 des sections du réseaux sont égales ($T_0 = T_1 = T_2$), et donc nous

observons une superposition de leurs réponses spectrales à une longueur d'onde de couplage résultante λ_C (71) et à une intensité de couplage I_C (Figure 70).

$$\lambda_C = \frac{\lambda_{C,1} + \lambda_{C,2}}{2} \quad (71)$$

En raison de la dépendance linéaire de la dilatation thermique, les périodes individuelles Λ_i et la différence d'indice de réfraction effectif $\Delta n_{eff,i}$ sont modélisées en supposant que $\Delta T_i = T_i - T_0$ comme (38) et (39) soient : $\Lambda_i = \Lambda_{0,i} + S'_{\Lambda,i} \Delta T_i$ et $\Delta n_{eff,i} = \Delta n_{0,i} + S'_{\Delta n,i} \Delta T_i$

De la Figure 46, lorsque les deux moitiés sont à des températures différentes $T_1 \neq T_2 \neq T_0$, alors les longueurs d'onde centrales des sous-réseaux $\lambda_{C,1}$ et $\lambda_{C,2}$ se déplaceront dans des directions opposées. Si les deux longueurs d'onde de couplages divergent alors, la longueur d'onde de couplage résultante λ_C devient moins profond et finit par se diviser comme le montre la Figure 70b) pour $\Delta T > 0$. Si la différence de température est inversée $\Delta T < 0$, les deux les deux longueurs d'onde de couplages convergent alors, la longueur d'onde de couplage résultante λ_C devient plus profond. spectre comme illustré sur la Figure 70c).

Le raisonnement illustré à la Figure 70 est valable pour $S'_{\Delta n,i} > 0$ (voir (39)). Pour un coefficient négatif $S'_{\Delta n,i} < 0$, c'est l'inverse qui se produit. Si $\Delta T_1 = -\Delta T_2$, la température moyenne T_{moy} restera constante et la longueur d'onde centrale résultante λ_C ne se déplacera pas. Si $\Delta T_1 \neq -\Delta T_2$, T_{moy} changera et la longueur d'onde centrale λ_C se

déplacera. Dans tous les cas, la longueur d'onde centrale λ_C se déplacera en fonction de la température moyenne T_{moy} selon :

$$\lambda_C = f(T_{moy}), \quad T_{moy} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad \Delta T_i = T_i - T_0 \quad (72)$$

Ainsi, La variation de température ΔT entraînera un changement de la profondeur I_C du réseau LPG tandis que la température moyenne T_{moy} provoquera un décalage de longueur d'onde centrale λ_C .

8.1.2 Mesure simultanée Du gradient de température et de la température moyenne

Le raisonnement ci-dessus signifie qu'avec un seul LPG non uniforme, nous pouvons mesurer simultanément l'amplitude et le signe d'un gradient ainsi que la température moyenne sur une distance déterminée par la longueur du réseau.

Dans le cas général, en raison de non-linéarités, la profondeur de l'intensité minimale de couplage du réseau I_C et la longueur d'onde centrale λ_C dépendent **à la fois** de la température moyenne T_{moy} et des différences de température ΔT aux extrémités du réseau qui, **dans une certaine plage**, peuvent être représentées comme combinaisons linéaires, à savoir :

$$I_C = I_C(\Delta T) = I_{C,0} + \beta_T T_{moy} + \beta_{\Delta T} \Delta T \quad (73)$$

$$\lambda_C = \lambda_C(T_{moy}) = \lambda_{C,0} + \gamma_T T_{moy} + \gamma_{\Delta T} \Delta T \quad (74)$$

Ainsi, la variation de la profondeur de l'intensité de couplage ΔI_C et la variation de longueur d'onde de couplage $\Delta \lambda_C$ peuvent être écrits comme :

$$\Delta I_C = I_C(\Delta T) - I_{C,0} = \beta_T T_{moy} + \beta_{\Delta T} \Delta T \quad (75)$$

$$\Delta \lambda_C = \lambda_C(T_{moy}) - \lambda_{C,0} = \gamma_T T_{moy} + \gamma_{\Delta T} \Delta T \quad (76)$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} \Delta I_C \\ \Delta \lambda_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_T & \beta_{\Delta T} \\ \gamma_T & \gamma_{\Delta T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{moy} \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad \text{Avec} \quad T = \begin{bmatrix} \beta_T & \beta_{\Delta T} \\ \gamma_T & \gamma_{\Delta T} \end{bmatrix} \quad (77)$$

T est la matrice de la sensibilité. Dans certains cas le changement de la profondeur ΔI_C ne dépend que de la différence de température ΔT tandis que le décalage de longueur d'onde λ_C dépend uniquement de la température moyenne T_{moy} . Dans ce cas (77) devient :

$$\Delta I_C = \beta_{\Delta T} \Delta T \quad (78)$$

$$\Delta \lambda_C = \gamma_T T_{moy} \quad (79)$$

8.2 Expériences

8.2.1 Fabrication de LPG non identique

Les LPG non uniformes ont été fabriqués au moyen d'un laser CO₂ pulsé (SYNRAD FHFL30-U) en utilisant le schéma du montage présenté à la Figure 10. Nous avons utilisé une fibre photosensible PS1250/1500 de diamètre de cœur de 9,6 μm . Les réseaux LPG se composent de deux parties ayant la même de période $N_1 = N_2 = 100$. Plusieurs réseaux avec des périodes différentes Λ_i et des indices de réfraction effectifs $\Delta n_{eff,i}$ ($i = 1,2$) ont été fabriqués et les résultats de deux d'entre eux ont été étiquetés ici comme PS36 et PS18. Pour introduire des différences d'indice de réfraction dn dans le $\Delta n_{eff,i}$, les moitiés ont été fabriquées avec une puissance relative de laser différente. Le Tableau 10 résume les

paramètres des réseaux fabriqués. La longueur totale du réseau est de $L \approx 67$ millimètres. Théoriquement, l'incertitude sur la longueur totale est d'environ $10 \mu\text{m}$, déterminée par le logiciel de marquage laser. Ceci assure une meilleure précision de $0,1 \mu\text{m}$ dans la période des réseaux.

Tableau 10: Paramètres de fabrication des réseaux LPG

LPG #	P ₁ (%)	P ₂ (%)	N ₁	N ₂	Λ_1 (μm)	Λ_2 (μm)	L (mm)
PS36	12	11	100	100	337	336	66,964
PS18	12	12	100	100	330	330.5	65,72

8.2.2 Résultats des tests de LPG non uniformes

Les réponses aux changements de température des LPG fabriqués ont ensuite été mesurées à l'aide de la configuration de la Figure 41. Chaque moitié du LPG a été placée à environ $0,5 \text{ mm}$ au-dessus de la surface d'un module Peltier (TEC). Les deux TEC ont été placés sur un dissipateur thermique recouvert d'une pâte conductrice de chaleur. Sur la surface supérieure des TEC ont été placées des thermocouples individuels. Un couvercle d'isolation thermique a été placé sur les TEC, le LPG et les thermistances pour empêcher les flux d'air environnant, réduisant ainsi les incohérences des résultats.

Nous mesurons d'abord les réponses du LPG aux variations de température de $\Delta T = -40^\circ\text{C}$ ($T_1 = 45^\circ\text{C}$, $T_2 = 5^\circ\text{C}$) à $+40^\circ\text{C}$ ($T_1 = 5^\circ\text{C}$, $T_2 = 45^\circ\text{C}$) d'une manière à conserver une température moyenne de $T_{moy} = 25^\circ\text{C}$.

Le changement de spectre sur la Figure 71 révèle que la longueur d'onde centrale reste dans la même position, et seule la profondeur de l'intensité de couplage varie.

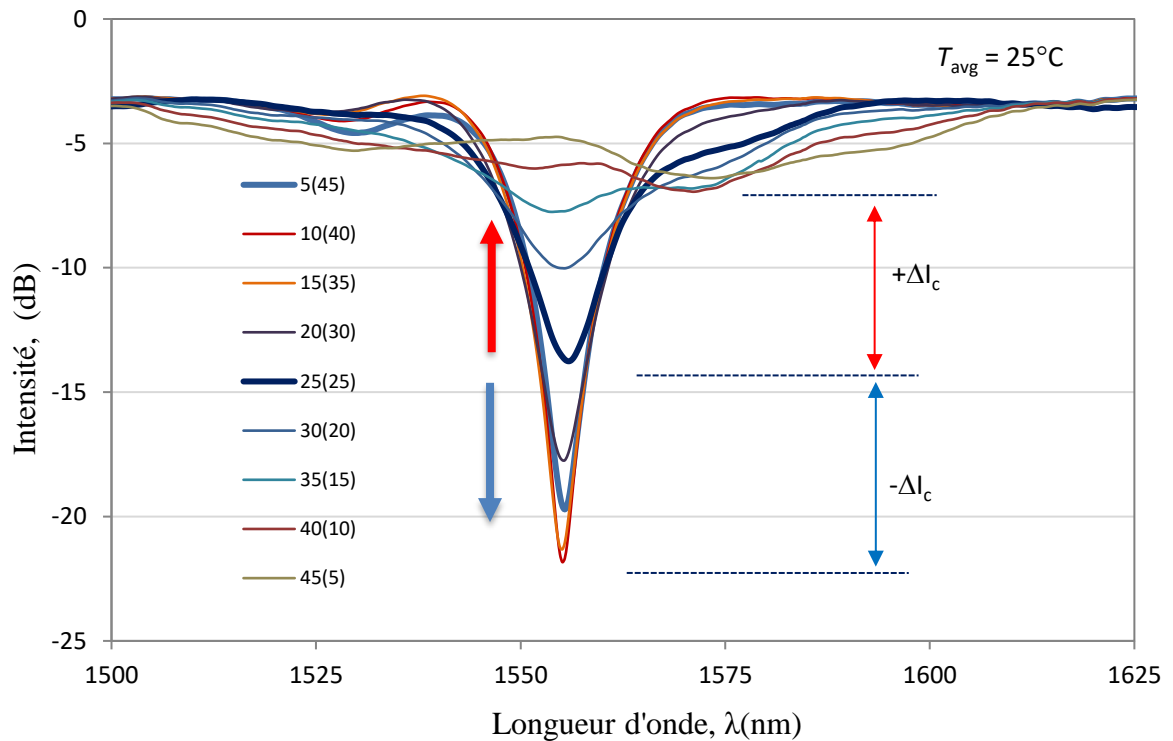


Figure 71: Réponses spectrales des réseaux LPG non uniformes aux différences de température

Dans la Figure 72, nous traçons la profondeur du LPG en fonction de la différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$. La fine ligne continue est un polynôme cubique ajusté aux données dans la plage $-40^{\circ}C \leq \Delta T \leq 40^{\circ}C$. Dans la plage de la différence de température comprise dans l'intervalle : $-20^{\circ}C \leq \Delta T \leq 20^{\circ}C$, la réponse est pratiquement linéaire avec une sensibilité de $\beta_{\Delta T} = -0,3045 \text{ dB}/^{\circ}C$.

$$\Delta I_C(\Delta T) = I_C - I_{C,0} \approx -0,0972 - 0,3281\Delta T + 0,0004(\Delta T)^2 + 0,0001(\Delta T)^3 \quad (80)$$

Pour $-40^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 40^\circ\text{C}$

$$\Delta I_C(\Delta T) = I_C - I_{C,0} \approx -0,0002 - 0,3045\Delta T \text{ et donc } \beta_{\Delta T} = -0,3045 \frac{\text{dB}}{^\circ\text{C}} \quad (81)$$

pour $-20^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 20^\circ\text{C}$

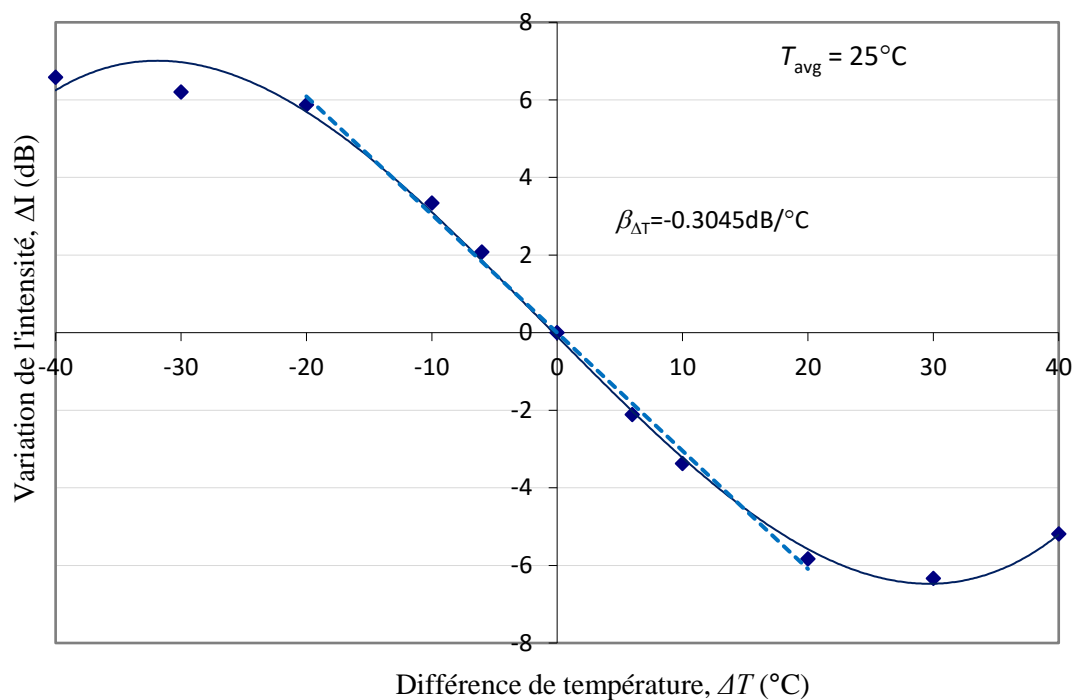


Figure 72: Changements de la profondeur de l'intensité de couplage en fonction de ΔT

Ensuite, nous mesurons les réponses spectrales des réseaux exposés à différentes températures moyennes T_{moy} et à des différences de températures constantes soient : $\Delta T = 0^\circ\text{C}$, $\Delta T = \pm 10^\circ\text{C}$, $\Delta T = \pm 15^\circ\text{C}$, et $\Delta T = \pm 20^\circ\text{C}$.

La Figure 73 montre les décalages de longueur d'onde pour $T_{moy} = 5^{\circ}\text{C}$ à $T_{moy} = 45^{\circ}\text{C}$ pour $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$, tandis que la Figure 74 montre les décalages pour $\Delta T = \pm 15^{\circ}\text{C}$. On voit que le changement prédominant est les décalages de longueur d'onde couplage λ_C alors que les profondeurs des intensités minimales I_C de couplage varient faiblement.

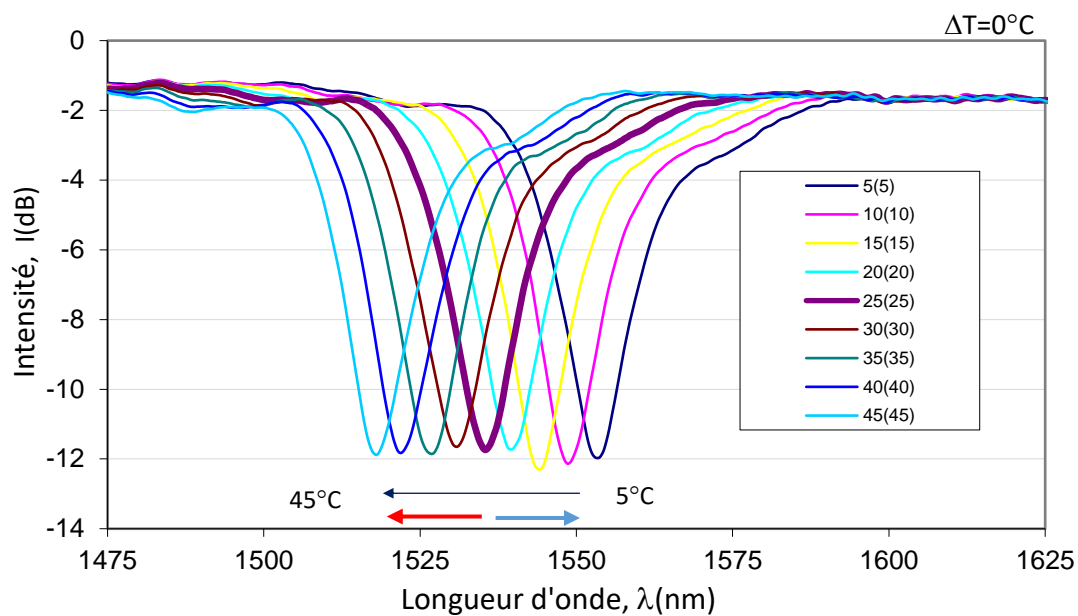


Figure 73: Décalage de λ_C en fonction des T_{moy} pour $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$

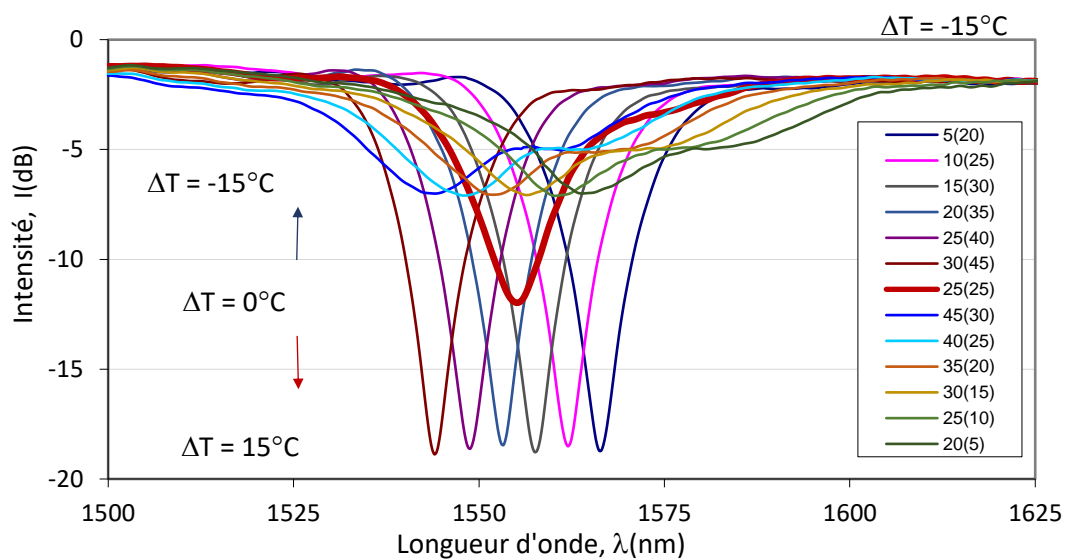


Figure 74: Décalage de λ_c en fonction des T_{moy} pour $\Delta T = -15^\circ\text{C}$ et $\Delta T = -15^\circ\text{C}$

La Figure 75 résume les intensités minimales de couplages (pertes au minimum) des réponses spectrales par rapport à T_{moy} pour les valeurs fixées de ΔT . Les résultats confirment la suggestion que les changements de T_{moy} provoquent des décalages de longueur d'onde centrale λ_c tandis que les changements de ΔT entraînent des variations de la profondeur ΔI_c .

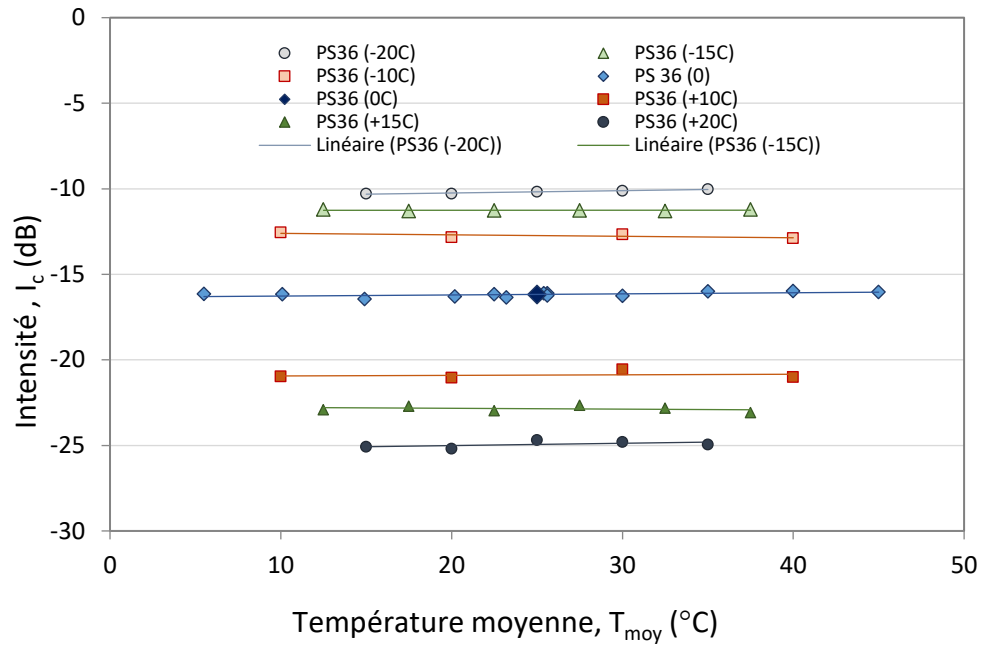


Figure 75: Courbes $I_c = f(T_{moy})$ pour $\Delta T=0^\circ\text{C}$ et $\Delta T=\pm 10^\circ\text{C}$; $\Delta T=\pm 15^\circ\text{C}$ et $\Delta T=\pm 20^\circ\text{C}$ fixes.

La Figure 76 montre un graphique maître de tous les décalages de longueur d'onde centrale λ_C par rapport à T_{moy} avec des données pour toutes les différences de température ΔT .

Les points sont tous regroupés le long d'une droite (82) de pente $\gamma_T = -0,9141 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.

$$\Delta\lambda_C = \lambda_C(T_{moy}) - \lambda_{C,0} = 23,328 - 0,9151T_{moy} \quad \gamma_T = -0,9141 \text{ nm}/^\circ\text{C} \quad (82)$$

Les petits écarts par rapport à la droite parfaite de la Figure 76 prévoient une certaine dépendance de $\Delta\lambda_C$ par rapport à ΔT , ce qui signifie qu'il existe un $\gamma_{\Delta T}$ non nul dans l'équation (76). Des résultats similaires ont été obtenus pour le deuxième LPG.

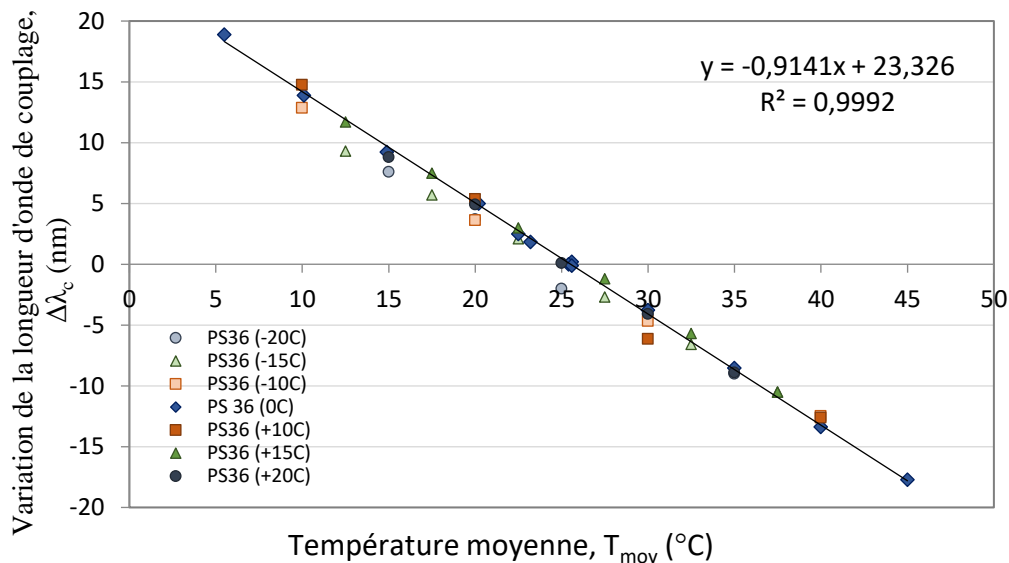


Figure 76: Graphique composite du décalage de longueur d'onde par rapport aux changements de température moyenne pour toutes les différences de température.

8.2.3 Mesures de gradient thermique et de température moyenne dans bloc de béton

Après avoir caractérisé et fabriqué les LPG en cascades non uniformes, nous procédons au montage d'un réseau dans un tube en laiton de 1,4 mm de diamètre interne. La fibre a été collée aux bras externes d'un léger ressort en forme de V pour maintenir le réseau à l'intérieur du tube. Le tube est ensuite inséré dans un bloc de béton de dimensions 80mm x 80mm x 50mm. Deux modules Peltier (TEC) sont montés de chaque côté du bloc pour créer un gradient thermique variable le long du réseau. Sur les côtés externes des modules Peltier se trouvent des dissipateurs thermiques collés sur des supports en aluminium.

L'ensemble de la construction est représenté schématiquement sur la Figure 77. La température moyenne variait de 6°C à 49°C et les différences de température variaient de -25°C à +23°C. Pour une longueur de réseau de $\Delta x = L \approx 67\text{mm}$ cela correspond à des

gradients $\Delta T/\Delta x = -373^\circ\text{C}/\text{m}$ à $+343^\circ\text{C}/\text{m}$ le long du LPG de longueur d'onde centrale $\Delta\lambda_C$ et des changements de profondeur d'intensité ΔI_C lorsque T_{moy} varie. Cela implique que β_T et γ_T sont tous deux non nuls. Nous avons d'abord mesuré la réponse à la température moyenne T_{moy} et l'évolution des changements spectraux.

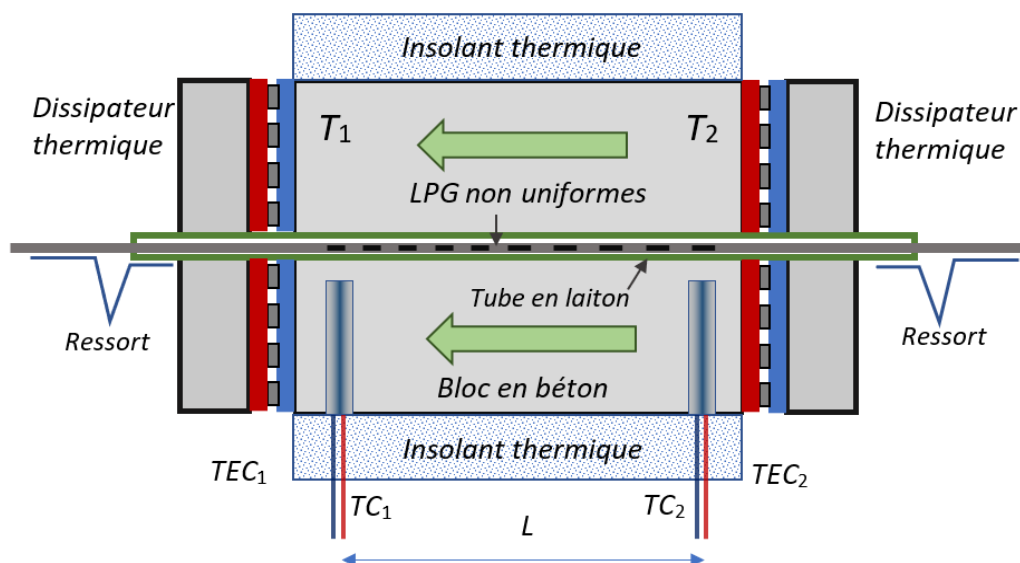


Figure 77: Montage schématique du LPG à l'intérieur d'un bloc de béton pour les mesures

La Figure 78 montre qu'il y a à la fois des changements de longueur d'onde centrale $\Delta\lambda_C$ et des changements de profondeur d'intensité ΔI_C lorsque T_{moy} varie. Cela implique que β_T et γ_T sont tous deux non nuls.

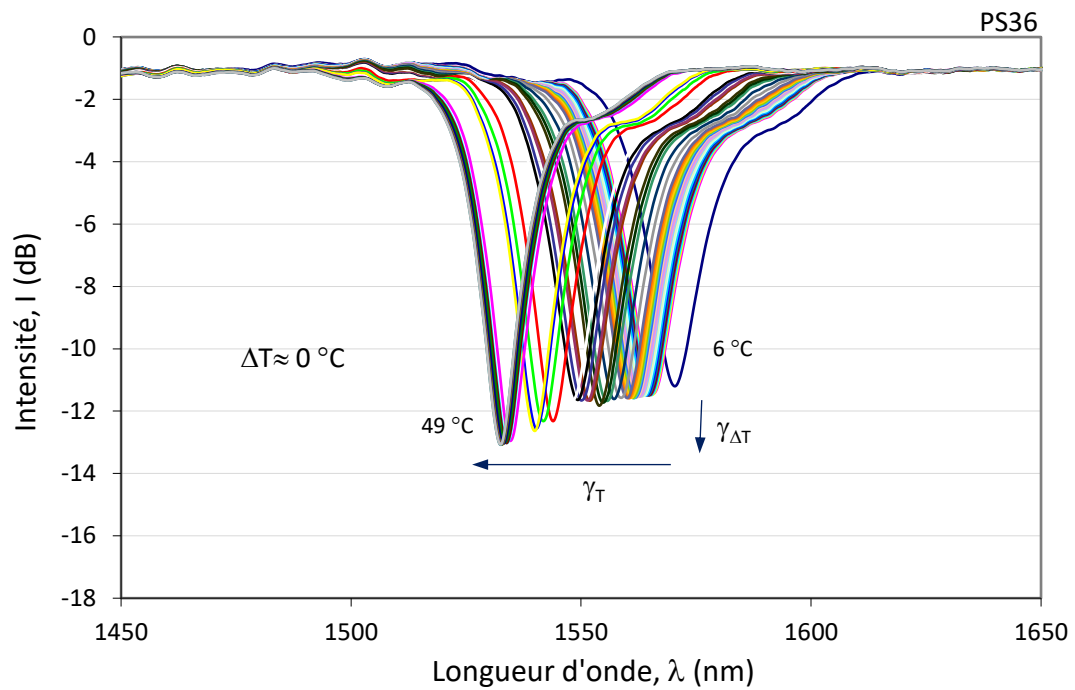


Figure 78: Réponse spectrale du LPG aux changements de température moyens cas $\Delta T = 0$

Nous étudions ensuite l'effet des différences de température générées sur le bloc de béton en créant une variété de valeurs positives et négatives de ΔT pour différentes combinaisons de T_{moy} . La Figure 79 présente des tracés des spectres pour une variété de $\Delta T < 0$ et la Figure 80 pour des $\Delta T > 0$.

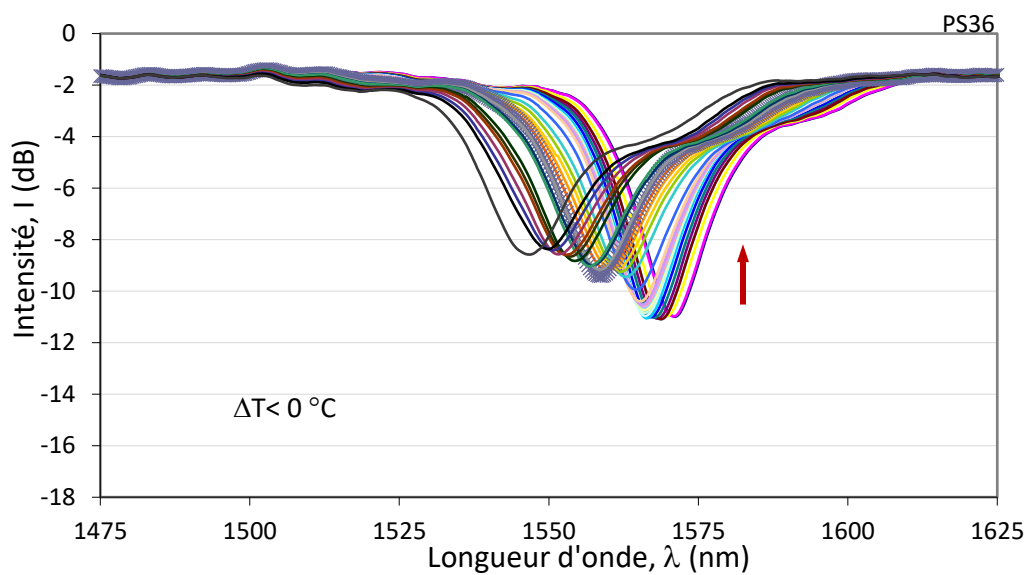


Figure 79: Réponse spectrale du LPG aux changements de température moyens, cas $\Delta T < 0$

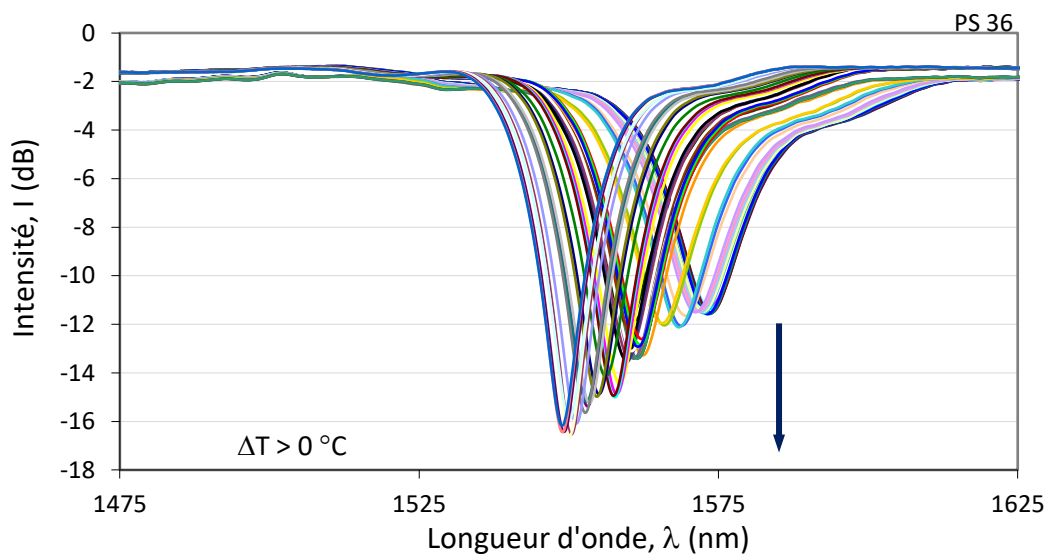


Figure 80: Réponse spectrale du LPG aux changements de température moyens cas $\Delta T > 0$

Le réseau est soumis à différentes températures moyennes T_{moy} , nous observons des variations de la longueur d'onde de couplage $\Delta\lambda_C$ et des changements de profondeur de l'intensité de couplage ΔI_C sont aussi observés. À partir de ces spectres, nous traçons les

courbes $\Delta\lambda_c = f(T_{moy})$ pour différentes valeurs de ΔT et la courbe de $\Delta I_c = f(\Delta T)$ pour différentes valeurs de T_{moy} . Ces diagrammes composites maîtres sont représentés par de grands losanges bleus sur les Figure 81, Figure 82, Figure 83 et Figure 84.

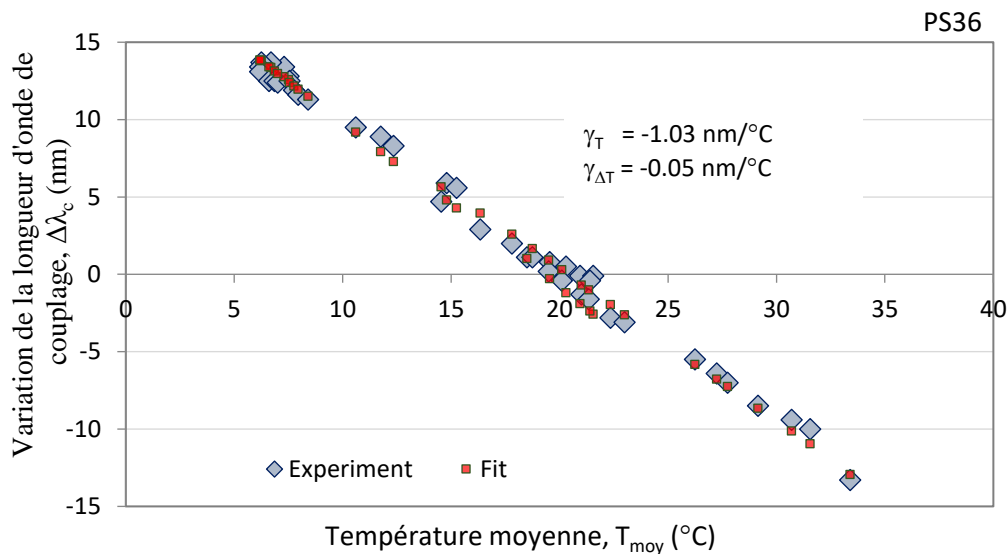


Figure 81: Courbes $\Delta\lambda_c = f(T_{moy})$ pour différentes valeurs de ΔT pour le réseau PS36

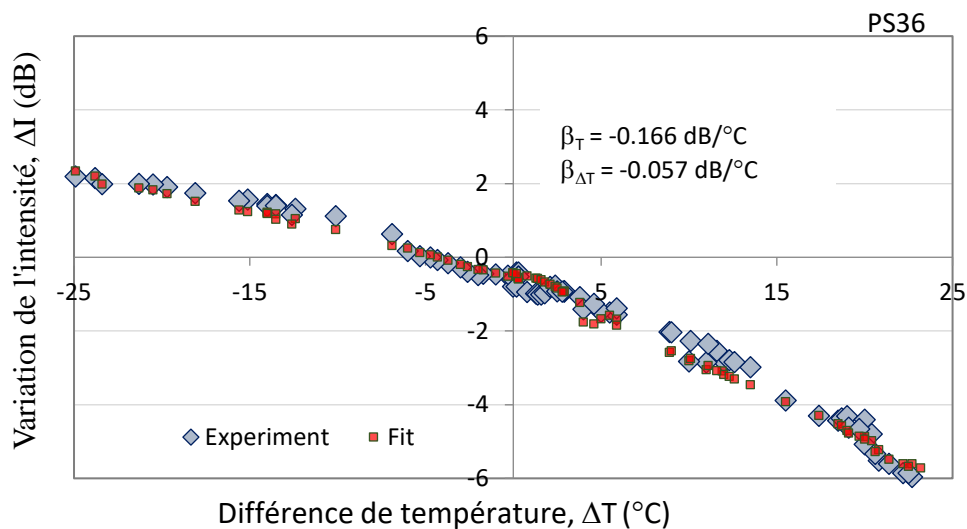


Figure 82: Courbe de $\Delta I_c = f(\Delta T)$ pour différentes valeurs de T_{moy} pour le réseau PS36

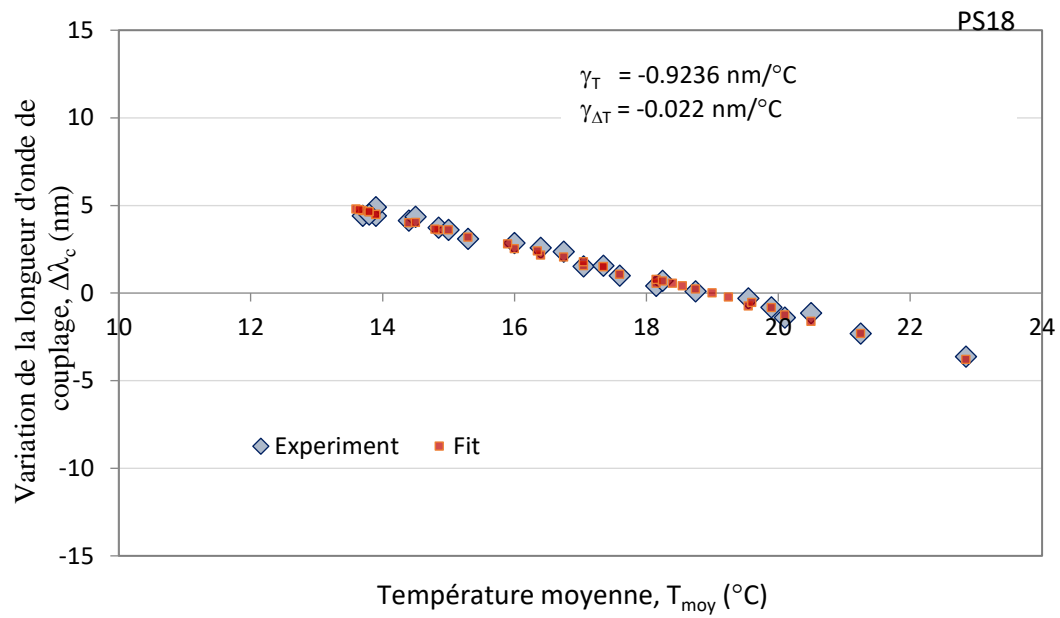


Figure 83: Courbes $\Delta\lambda_c=f(T_{\text{moy}})$ pour différentes valeurs de ΔT pour le réseau PS18

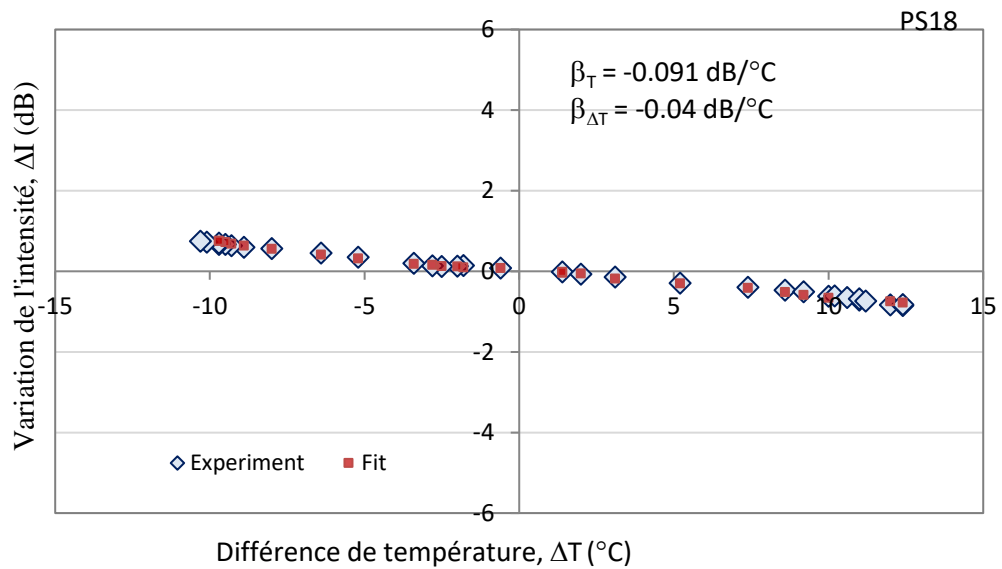


Figure 84: Courbe de $\Delta I_c=f(\Delta T)$ pour différentes valeurs de T_{moy} pour le réseau PS18

Pour comparer les valeurs expérimentales aux valeurs théoriques, nous traçons sur le même graphe ces deux valeurs et de petits carrés rouges indiquent les points ajustés des données théoriques.

La Tableau 11 rapporte les sensibilités aux gradients de température et à la température moyenne pour les deux réseaux LPG insérés dans le bloc de béton.

Tableau 11: Paramètres de sensibilité des réseaux testés dans le béton

LPG #	γ_T (nm/°C)	$\gamma_{\Delta T}$ (nm/°C)	β_T (dB/°C)	$\beta_{\Delta T}$ (dB/°C)
PS36	-1,03	-0,05	-0,166	-0,057
PS18	-0,924	-0,022	-0,091	-0,04

Les courbes des Figure 81, Figure 82, Figure 83 et Figure 84 démontrent une très bonne correspondance entre les données ajustées et les résultats expérimentaux. Ainsi, en mesurant le décalage spectral $\Delta\lambda_C$ et le changement de profondeur ΔI_C , puis en résolvant l'équation (83), nous pouvons trouver T_{moy} et ΔT selon :

$$\begin{bmatrix} T_{moy} \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \gamma_{\Delta T} & -\beta_{\Delta T} \\ -\gamma_T & \beta_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_C \\ \Delta\lambda_C \end{bmatrix} \quad \text{Avec } D = \beta_T \gamma_{\Delta T} - \gamma_T \beta_{\Delta T} \quad (83)$$

Les résultats obtenus pour les deux LPG et leur comparaison soulèvent des questions qui méritent d'être abordées.

Premièrement, nous remarquons une différence entre les résultats des réponses du même réseau LPG testé en dehors du béton et dans le béton. En effet les sensibilités à la

différence de température du réseau LPG installé dans le bloc de béton sont plus faibles que celles mesurées précédemment en dehors du béton. Cependant, les sensibilités à la température moyenne restent les mêmes pour les deux situations, soient mesure hors béton et mesure à l'intérieur du béton. La raison de cet écart est que dans la configuration de mesure de la Figure 41, chaque moitié du LPG est exposée à des températures différentes mais constantes T_1 et T_2 . Cela implique qu'il y a donc un changement brusque de ΔT sur une distance de $\Delta x \approx 1$ mm. Cependant, dans le béton on a un changement progressif de température entre les deux extrémités du réseau LPG donc sur une distance de $\Delta x \approx L \approx 66$ mm à 67mm. Ainsi, les températures le long de chaque moitié du LPG changent progressivement, ce qui réduit la sensibilité aux changements de ΔT . En revanche, lorsque la sensibilité à la température a été mesurée, la même température constante est imposée tout au long des deux moitiés des réseaux. Les sensibilités à la température sont donc similaires dans les deux cas.

Deuxièmement, on remarque que la sensibilité aux gradients thermiques $\beta_T \approx -0,166$ (dB/°C) du premier réseau LPG PS36 est supérieure à celle du deuxième réseau PS18 $\beta_T \approx -0,091$ (dB/°C). Cependant les sensibilités aux variations de la température moyenne des réseaux sont légèrement semblables : $\gamma_T = -1,03$ (nm/°C) pour PS36 et $\gamma_T = -0,924$ (nm/°C) pour PS18. Il y a deux raisons de cette équivalence approximative. D'une part, il y a une différence entre les périodes des réseaux, le PS36 a une variation de période de 1 μm contre 0,5 μm pour le PS18 entre les deux moitiés, ce qui crée la possibilité d'une plus grande sensibilité aux gradients thermiques. D'autre part,

les deux moitiés de PS36 ont été fabriquées à des puissances relatives de laser différentes 12% et 11% (voir Tableau 10) tandis que celles de PS18 ont été écrites sous une puissance identique (12%). Cela signifie qu'on introduit une différence d'indice de réfraction plus grande dans PS36 $\Delta n_{eff,1} > \Delta n_{eff,2}$ qui modifie également la différence des sensibilités puis entraîne donc des sensibilités croisées plus grandes $\gamma_{\Delta T}$ des décalages spectraux à ΔT pour PS36 par rapport à PS18. Ceci explique aussi la non-linéarité de la réponse aux gradients thermiques.

Troisièmement, la comparaison entre les données expérimentales et les valeurs calculées à l'aide des éléments de la matrice de sensibilité (83) révèle des écarts aléatoires. Ces écarts sont observés pour les raisons suivantes : d'une part, le réseau effectue une mesure intégrée du gradient et fournit une valeur efficace, contrairement aux sondes de température qui sont des capteurs ponctuels et mesurent la température à proximité des deux extrémités du réseau. D'autre part, la vitesse de réponse du LPG est beaucoup plus grande que celle des capteurs ponctuels et il existe des décalages de temps entre les deux lectures qui seraient différents pour les changements de température le long du LPG.

En prenant en compte les différents commentaires mentionnés, nous évaluons l'erreur relative entre les données expérimentales et les ajustements théoriques à la fois pour la température moyenne T_{moy} et pour la différence de température ΔT comme suit. Pour les deux cascades de réseaux LPG, nous calculons les écarts-types σ_T et $\sigma_{\Delta T}$ des différences existantes entre les valeurs expérimentales et les ajustements théoriques de tous les points. Puis nous divisons ces écarts types par les plages de mesures R_T et $R_{\Delta T}$.

L'équation (84) présente l'expression des erreurs relatives correspondante.

$$RE_T = \frac{\sigma_T}{R_T} \quad \text{et} \quad RE_{\Delta T} = \frac{\sigma_{\Delta T}}{R_{\Delta T}} \quad (84)$$

Nous effectuons ces calculs pour les deux cascades de LPG donnant donc comme erreur relative de $RE_T = 2,6 \%$ et $RE_{\Delta T} = 2,8 \%$ pour le réseau PS18, tandis que pour le réseau PS36, l'erreur relative est de $RE_T = 3,4 \%$ et $RE_{\Delta T} = 3,3 \%$.

Quatrièmement, les équations matricielles pour la mesure simultanée de deux paramètres (77) et (83) sont valables tant qu'il existe une dépendance linéaire entre ΔI_C . La sensibilité aux variations de température plus élevée pour le LPG_PS36 ayant une courbe linéaire et monotone sur une plage de ΔT de $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ à $+25 \text{ }^\circ\text{C}$. En tenant compte du fait que la longueur du réseau est de $L \approx 67 \text{ mm}$, nous constatons que les plages de gradient maximales $\frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{\Delta T}{L}$ pouvant être détectées avec ce LPG particulier sont d'environ $\pm 3,7 \text{ }^\circ\text{C/cm}$. Selon l'application particulière, un LPG plus court ou plus long peut être nécessaire. La longueur du LPG peut être modifiée en changeant le nombre de périodes N et la puissance du laser, modifiant ainsi la plage de gradient thermique. Une autre approche serait d'utiliser un LPG en cascade avec une distance variable entre chaque réseau présenté dans notre troisième article [138].

Cinquièmement, une plus grande différence entre les périodes Λ_1 et Λ_2 conduira à une plus grande plage de fonctionnement et une plus grande sensibilité aux différences de température ΔT comme c'est le cas pour le réseau LPG_PS36 par rapport au LPG_PS18, comme en témoignent les Figure 81, Figure 82, Figure 83 et Figure 84. On peut montrer à l'aide de la description matricielle [54] , [136] qu'au-delà d'une certaine différence, la

portée et les sensibilités diminueront, et la réponse sera transformée en un spectre à deux pics de résonance.

Dans nos publications précédentes [54] [136] [138], nous avons montré théoriquement et expérimentalement qu'un réseau LPG uniforme est sensible à la valeur absolue de la différence de température $|\Delta T|$ aux extrémités du réseau. Afin de détecter l'amplitude et le signe du gradient thermique, les réseaux en cascade doivent être non uniformes. Ceci est réalisé en introduisant une variation spatiale dans la période $\Lambda(z)$ et/ou variation local d'indice de réfraction dans la différence d'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,i}(z)$. Ces observations indiquent que pour créer un LPG ayant une plus grande sensibilité aux gradients thermiques, il est préférable de modifier à la fois Λ et $\Delta n_{eff,i}$. Cependant, la bonne combinaison : plus haut ou plus bas de $\Delta n_{eff,i}$ et Λ affectera les performances de la réponse du LPG. Bien que les problèmes soient une question d'optimisation, les expériences réalisées révèlent que l'utilisation de LPG non uniformes offre la possibilité de mesurer simultanément la température moyenne et le gradient thermique avec un seul réseau et, ainsi, de contrôler le flux thermique à travers les matériaux de construction, tels que le béton, gypse, matériaux d'isolation, etc. Étant donné que la longueur du LPG peut varier, les éléments de détection peuvent être conçus pour s'adapter à des dimensions spécifiques. Une combinaison de trois LPG non uniformes mutuellement orthogonaux peut détecter un flux thermique en trois dimensions. Étant donné que les changements de flux thermique sont un processus à variation lente, un grand nombre de LPG peuvent être multiplexés dans l'espace à l'aide de commutateurs à fibre optique $1 \times N$ standard de

l'industrie des communications. Les LPG de détection peuvent être intégrés dans le matériau et être utilisés pour détecter les flux thermiques pendant la solidification et l'exploitation ultérieure.

8.3 Conclusion

Sur la base des expériences et de l'analyse présentées dans ce chapitre, nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

- Les LPG en cascade non uniformes peuvent être utilisés avec succès pour mesurer simultanément les gradients thermiques $\Delta T/\Delta x$ et la température moyenne T_{moy} dans les structures en béton pour mesurer et contrôler les échanges thermiques.
- La température moyenne T_{moy} et la différence de température ΔT se sont avérées être des combinaisons linéaires directement mesurable à partir du décalage horizontal $\Delta\lambda_C$ et du décalage vertical de l'intensité de couplage $\Delta I_{C,i}$ de la réponse spectrale du réseau.
- Les coefficients de sensibilité (croisée et non croisée) de la matrice de sensibilité ont été déterminés et se sont avérés dépendantes du type et des combinaisons de non-uniformités longitudinales introduites dans le réseau, à savoir dans les périodes Λ_i ou dans les différences d'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,i}$.

9 Travaux futurs

La principale amélioration à apporter dans les travaux futurs à partir de cette thèse serait de favoriser la fabrication des réseaux LPG en cascade non uniformes de plus de deux réseaux LPG dans le but couvrir une plus grande zone critique de mesurage du gradient de température et de la température moyenne. La fabrication de deux réseaux en cascade s'est avérée complexe et nécessite une précision de manipulation. Il faut donc former les futurs utilisateurs à cette nouvelle technique d'inscription de réseau au laser CO₂ pour optimiser l'opération de fabrication et donc de réduire les pertes de temps et le gaspillage du matériel. Il serait intéressant d'élargir le travail à des températures plus élevées en dotant le laboratoire de modules Peltier plus puissants, d'une source d'alimentations DC Keysight 6227B plus récente et précise et d'un analyseur de spectre à très large bande. Les futurs travaux devront proposer une approche méthodologique permettant de démontrer et d'évaluer les performances du système de mesure par les réseaux LPG et de mieux appréhender sa durabilité sur la durée de vie de la structure contrôlée.

10 Conclusion

Dans le domaine de la construction, les structures civiles et industrielles sont soumises à des modifications très dommageables induites par l'usure, les erreurs de conception et de construction, les exploitations abusives, les surcharges et certains événements naturels inattendus tels que les tremblements de terre, les glissements de terre le réchauffement climatique, gel et dégel. L'optimisation de la gestion d'un patrimoine d'ouvrages nécessite une base de données fiable répertoriant l'état de chaque ouvrage. La déformation, globale et locale de la structure lors des sollicitations de service, ainsi que son état de fissuration sont des indicateurs de la tenue mécanique de l'ouvrage. Disposer d'un système de mesures précises du flux de chaleur et de la température des substrats de matériaux de construction par la fibre optique se révèle être un atout de premier ordre pour le contrôle et la surveillance d'une structure de génie civil puisqu'il permet, généralement avec un seul câble à fibre optique installé dans le béton, d'obtenir des profils de mesures sur une très grande surface.

L'objectif de cette thèse était de développer et de concevoir une nouvelle architecture de réseaux longues périodes hautement sensibles aux gradients de température et aux températures moyennes afin de proposer un nouveau capteur à fibre optique à base de réseau LPG.

Une première partie de ce travail de thèse a consisté à faire une revue de littérature des articles scientifiques en lien avec la mesure du flux thermique par les dispositifs existants. Les limites de ces fluxmètres existants nous ont motivé à aller de l'avant en proposant de nouveaux capteurs à fibre optique. En effet, en raison des avantages qu'offrent les LPG par rapport aux capteurs conventionnels et aux FBG, entre autres une sensibilité thermique des LPG plus grande que les FBG, nous avons développé le nouveau capteur à base de réseaux LPG pour la mesure du gradient thermique.

Le concept physique lié aux réseaux à longue période a été ensuite présenté. Les caractéristiques de la fibre photosensible et celles du LPG étudiées théoriquement ont permis de procéder à plusieurs modifications d'entre elles selon deux techniques d'inscription de réseaux. De nouvelles architectures de réseaux ont ensuite été fabriquées dans de deux types de fibres.

Puis les nouveaux réseaux fabriqués selon nos premières hypothèses ont été expérimentés sur notre banc d'essai dédié. L'analyse des mesures réalisées avec différents types LPG pendant leurs expositions aux gradients et aux températures moyennes, a permis d'ajuster les valeurs des paramètres des premiers modèles et de fabriquer de nouveaux réseaux dans le but d'augmenter leurs sensibilités aux grandeurs mesurées.

Notre hypothèse mentionnant que les deux moitiés du LPG étaient identiques, c'est-à-dire $\Lambda_{0,1} = \Lambda_{0,2} = \Lambda_0$ et $\Delta n_{eff,0,1} = \Delta n_{eff,0,2} = \Delta n_{eff,0}$ s'est avérée fautive puisque dans nos résultats théoriques les réponses $\Delta I_c = f(\Delta T)$ sont symétriques tandis que les réponses expérimentales sont asymétriques. En immergeant une des moitiés dans l'eau et

l'autre dans l'air, nous observons un décalage du spectre. Cette présence de décalage (à gauche ou à droite) autour de son axe vertical de symétrie signifie que l'imposition d'un certain gradient dn au réseau LPG modifie seulement la différence d'indice de réfraction effective $\Delta n_{eff,0,i}$ tandis que la période Λ du réseau reste constante. Un tel décalage de la réponse entraîne une dépendance monotone de la courbe $\Delta I = f(\Delta T)$ sur un intervalle bien défini sur l'axe des ΔT , ce qui permettra de déterminer le signe et l'amplitude de la différence de température d'où la mesure de la grandeur et du signe du flux thermique.

Dans une étape suivante, l'analyse théorique et expérimentale réalisée permet de confirmer que la création d'un gradient de l'indice de réfraction effectif $\Delta n_{eff,0,i}$ le long du réseau LPG permet de créer des décalages de la courbe $\Delta I_c = f(\Delta T)$. Cela a été possible en introduisant délibérément une simple variation d'indice dn dans $\Delta n_{eff,0,i}$ le long d'un LPG. Nous avons donc pu décaler la réponse du LPG aux gradients thermiques $\Delta I = f(\Delta T)$ de sorte que le réseau mesure simultanément à la fois l'amplitude du gradient et sa direction. L'introduction de dn dans cette étape consistait à plonger les deux moitiés du LPG dans différents milieux durant la phase expérimentale.

Puis, le facteur de correction dn a été introduit dans des réseaux LPG inscrits dans des fibres photosensibles par la méthode d'irradiation aux des lasers à CO_2 . La fabrication par laser CO_2 a été optimisé par le choix des paramètres de réseau (période L , nombre des périodes N). La modification de la différence des indices de réfractons effectives Δn_{eff} est produite en variant la puissance optique relative du laser (en %) et vitesse de balayage

du faisceau. Le Δn_{eff} varie avec la puissance du laser et le temps d'exposition de la fibre au rayonnement.

La dernière partie du travail de thèse a été consacrée à une étude de durabilité sur le système de mesure à fibre optique installé dans un bloc de béton dont nous avons déjà caractérisé les performances aux étapes précédentes. Les résultats expérimentaux montrent que les LPG en cascade non uniformes peuvent être utilisés avec succès pour mesurer simultanément les gradients thermiques $\Delta T/\Delta x$ et la température moyenne T_{moy} dans les structures en béton pour mesurer les échanges thermiques. En effet, la température moyenne T_{moy} et la différence de température ΔT se sont avérées être des combinaisons linéaires directement mesurable à partir du décalage horizontal $\Delta \lambda_C$ et du décalage vertical de l'intensité minimale de couplage $\Delta I_{C,i}$ de la réponse spectrale du réseau.

Références

- [1] N. Kapany, «FIBER OPTICS,» *Scientific American*, vol. 203, n° 15, pp. 72-81 , 1960.
- [2] A. G. Bell, «Selenium and the Photophone,» *Nature*, pp. 500-503, 1880.
- [3] A. G. Bell, «On the production and reproduction of sound by light,» *Am. J. Sci.*, vol. 118, p. 305–324 , 1880.
- [4] T. Mainman, «Optical and microwave optical experiments in Ruby,» *Physical Review Letters*, vol. 4, pp. p. 564-566, 1960.
- [5] J. Hecht, *City of Light*, Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [6] F. Udrea et al., «CMOS temperature sensors—concepts, state-of-the-art and prospects,» *Proceedings of the IEEE International Semiconductor Conference*, pp. 31-40, 2008.
- [7] S. Taheri, «A review on five key sensors for monitoring of concrete structures,» *Construction and Building Materials*, vol. 204, pp. 492-509, 2019.

- [8] A. Vengsarkar, P. Lemaire, J. Judkins, V. Bhatia et T. a. S. J. Erdoga, «Long Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters,» *J. of Lightwave Techn.*, vol. 14, pp. 58-65, 1996.
- [9] V. a. V. A. Bhatia, «Optical fiber Long period gratings sensors,» *optics Letters*, vol. 21, pp. 692-694, 1996.
- [10] B. Glisic et D. a. C. Inaudi, «SHM process as perceived through 350 projects,» *chez in Smart Struct. Mater.*, San Diego,CA., NDE Symp., 2010, p. 76480P.
- [11] M. W. Dewhirst, B. Viglianti, M. Lora-Michiels et M. H. a. H. Hoopes, «Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia,» *International Journal of Hyperthermia*, vol. 19, n° %13, pp. 267-294, 2003.
- [12] G. Vincze et O. a. S. Szasz, «Generalization of the Thermal Dose of Hyperthermia in Oncology,» *Open Journal of Biophysics*, vol. 5, n° %14, p. 97, 2015.
- [13] P. Lu, L. Men, K. Sooley et Q. Chen, «Tapered fiber mach–zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature,» *Applied Physics Letters*, vol. 94, n° %1131110, 2009.
- [14] M. Mohtashim, H. Ibraheem, A. Suhail, L. Andrea et Florin, «Silicon diode temperature sensors—A review of applications,» *Sensors and Actuators A Physical*, n° %1232, p. 63–74, 2015.

- [15] E. Macchi, D. Tosi, G. Braschi, M. Gallati, A. Cigada, E. Lewis et G. Busca, «Optical fiber sensors-based temperature distribution measurement in ex vivo radiofrequency ablation with submillimeter resolution,» *Journal of Biomedical Optics*, vol. 19, p. 117004–117004, 2014.
- [16] A. J. Mullender, B. A. Handley, M. H. Coney et P. T. a. N. A. J. Ireland, «Model test apparatus and method». United States Patent Brevet 6,418,806, 16 Juillet 2002.
- [17] T. E. Diller, «Heat Flux,» chez in *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, T. E. Diller, "Heat Flux," in *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, J. G. Webster, Ed., Boca Raton, Florida, CRC Press, 1999, pp. 34.1-15.
- [18] T. E. Diller, «Advances in Heat Flux Measurements,» *Advances in Heat Transfer*, vol. 3, pp. 279-368, 1993.
- [19] T. V. Jones, *Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena*, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1977.
- [20] E. Piccini et S. a. J. T. V. Guo, « Measurement Science and Technology,» p. 11 342, 2000.
- [21] A. Epstein, G. Guenette, R. Norton et C. Yuzhang, «High-frequency response heat-flux gauge,» *Rev. Sci. Instrum.* , vol. 57, pp. 639-649, 1986.

- [22] D. a. B. E. Assanis, «Evaluation of alternative thermocouple designs for transient heat transfer measurements in metal and ceramic engines,» *SAE paper 890571*, 1989.
- [23] J. Chun, S. H. Oh et S. S. a. M. Lee, «Design and fabrication of micro heat flux sensor,» in *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Conference*, pp. 1045-1048, 1999.
- [24] H. a. H. Mocikat, «Heat Transfer Measurements with Surface Mounted Foil Sensors in an Active Mode: A Comprehensive Review and a New Design,» *Sensors*, vol. 9, n° %14, pp. 3011-3032, 2009.
- [25] J. Hager, L. Langley et S. a. D. T. Onishi, «Microsensor for highheat flux measurements,» *J. Thermophysics* , vol. 7, n° %13, p. 531–534, 1993.
- [26] C. Entreprise, «Captec,» 47 rue Jeanne d’Arc 59000 Lille, [En ligne]. Available: <http://www.captec.fr>. [Accès le 16 10 2019].
- [27] T. Bajzek, «Thermocouples: a sensor for measuring temperature,» *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 8, n° %11, pp. 35 - 40, 2005.
- [28] P. Thery et B. a. P. J. Duthoit, «Propriétés thermoélectriques des systèmes à deux couches minces superposées. Application à la mesure des flux thermiques,» *Revue de Physique Appliquée*, vol. 15, n° %13, pp. 741-747 , 1980.

- [29] P. They et J. Marechal, «Etude et caractérisation d'un nouveau fluxmètre calorifique,» *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, vol. 13, pp. 859-865, 1980.
- [30] B. Vick, *ME 3304 Heat and Mass Transfer Course Notes*, Blacksburg: VA: Virginia Tech., 2010..
- [31] J. M. Hager, S. Simmons, D. Smith, S. Onishi et L. W. a. D. T. E. Langley, «Experimental performance of a heat flux microsensor,» *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 113, n° 112, pp. 246-250, 1991.
- [32] T. Diller, «Advances in Heat Flux Measurements,» *Advances in Heat Transfer*, vol. 23, pp. 279-368, 1993.
- [33] C. .. Yuzhang, G. Guenette et R. a. E. ., Norton, «High-frequency response heat-flux gauge.,» *Rev. Sci.Instruments*, vol. 57, p. 639 – 649, 1986.
- [34] S. Guo, C. Lai, T. Jones, M. Oldfield, L. G.D. et A. Rawlinson, «The application of thin film technology to measure turbine-vane heat transfer and effectiveness in a film cooled, engine-simulated environment,» *Int. J. Heat and Fluid Flow* , vol. 19, p. 594 – 600, 1998.
- [35] C. Hogendoorn, H. de Lange et A. van Steenhoven, «Design optimization for fast heat-transfer gauges,» *Meas. Sci.Technol.*, vol. 9, p. 428–434, 1998.

- [36] D. G. Holmberg et T. E. Diller, «High-Frequency Heat Flux Sensor Calibration and Modeling,» *Journal of Fluids Engineering*, vol. 117, n° 114, pp. 659-664, 1995.
- [37] M. Rencz, E. Kollar et V. Székely, «Heat-flux sensor to support transient thermal characterisation of IC packages,» *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 116, n° 112, pp. 284-292, 2004.
- [38] G. Woschni, «A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine,» *SAE Technical Paper 670931*, 1967.
- [39] v. Obermair et R. a. W. T. Scarcelli, «Efficiency Improved Combustion System for Hydrogen Direct Injection Operation,» *SAE technical paper*, p. 16, 2010.
- [40] J. Heywood, «Internal Combustion Engine Fundamentals,» *McGraw Hill*, 1988.
- [41] J. J. Coblish et S. a. J. D. Coulter, «Aerothermal Measurement Improvements using Coaxial Thermocouples at AEDC Hypervelocity Wind Tunnel,» chez *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 2007.
- [42] P. Kayser et M. a. G. C. Rodrigues, «Thin gradient heat fluxmeters developed at ONERA,» *New Trends in Instrumentation for Hypersonic Research*, Springer, pp. 481-492, 1993.

- [43] C. A. Pullins et T. E. Diller, «In situ High Temperature Heat Flux Sensor Calibration,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, n° %117-18, pp. 3429-3438, 2010.
- [44] L. Li, J. Wang et X. Fan, «Development of integrated high temperature sensor for simultaneous measurement of wall heat flux and temperature,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, n° %117, 2012.
- [45] S. Guo, T. Jones et E. Piccini, «The development of a new direct-heat flux gauge for heat transfert facilities,» *Measurement Science and Technology*, vol. 11, n° %14, pp. 342-349, 2000.
- [46] R. Kumr, N. Sahoo et V. Kulkarni, «Conduction based calibration of handmade platinum thin film heat transfer gauges for transient measurements,» *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 55, pp. 2707-2713, 2012.
- [47] J. H. Klems et D. DiBartolomeo, «Large area high sensitive heat flow sensors,» *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 53, n° %1110, 1982.
- [48] D. Hamadi, B. Garnier, H. Willaime, F. Monti et H. Peerhossaini, «A novel thin-film temperature and heat-flux microsensor for heat transfer measurements in microchannels,» *Lab Chip*, vol. 12, pp. 652-658, 2012.
- [49] J. P. Bardon, M. Raynaud et Y. Scudeller, «Mesures par contact des températures de surface,» *Rev. Gén. Therm. (HS95)*, vol. 34, n° %1134, pp. 15-35, 1995.

- [50] B. Bourouga, V. Goizet et J. p. Bardon, «Les aspects théoriques régissant l'instrumentation d'un capteur thermique pariétal à faible inertie,» *Therm. Sci.*, vol. 139, pp. 96-109, 2000.
- [51] A. Gery, A. Degiovanni, v. Petit et J. Dard, «Mesure des températures de surface par contacts séparés,» *Revue de Physique Appliquée*, vol. 17, n° %14, pp. 163-175, 1982.
- [52] F. P. D'Aleo et H. M. Prasser, «Design, calibration and testing of a thin film temperature gauge array for temperature and heat flux measurements in fluid mixing experiments,» *Flow measurement and instrumentation*, vol. 24, pp. 29-35, 2012.
- [53] J. Bardon et Y. Jarny, «Procédé et dispositif de mesure en régime transitoire de température et flux surfacique». Brevet 94.01996, 22 Février 1994.
- [54] M. Koffi, T. Eftimov, F. Lesage, P. Mikulic et W. J. Bock, «Measurement of thermal gradients using long period gratings at different levels of ambient refractive indices,» *IEEE*, vol. 37, n° %118, pp. 4674 - 4679, 2019.
- [55] A. a. a. Cozannet, «Optique et télécommunications : transmission et traitement optiques de l'information,» chez *Collection technique et scientifique des télécommunications*, Eyrolles, CENT-ENST, 1981, p. 491 p..

- [56] I. a. a. Joindot, «Les télécommunications par fibres optiques,» chez *Collection technique et scientifique des télécommunications*, Dunod, Paris, CENT-ENST, 1996, pp. ISBN 2-10-002787-5, 737 p..
- [57] K. Okamoto, *Fundamentals of optical waveguides*, vol. 10, San Diego: Academic Press, 2000, pp. 2252-2258.
- [58] R. Measures, *Structural monitoring with fiber optic technology*, San Diego: Academic Press, 2001.
- [59] K. Kawano et T. Kitoh, *Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equation and the Schrödinger Equation*, New Jersey: Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [60] G. Keiser, *Optical fiber communications*, 3rd. Coll. « McGraw-Hill séries in electrical and computer engineering. Communications and signal processing », Boston, MA : McGraw-Hill, xxi, 602p.: 3rd ed. McGraw-Hill International ed., 2000.
- [61] D. Globe, «“Weakly Guided Fibers,”» *Applied Optics*, vol. 10, n° 110, pp. 2252-2258, 1071.
- [62] T. Erdogan, «Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters,» *J. Optical Society of America A.*, vol. 14, n° 18, pp. 1760-1773, 1997.

- [63] T. Erdogan, «Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters: Errata,» *J. Optical Society of America A.*, vol. 17, n° 111, p. 2113, 2000.
- [64] R. Kashyap, *Fibre Bragg Gratings*, New York: New York : Academic, 1999.
- [65] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins et M. A. a. F. E. J. Putnam, «Fiber grating sensors,» *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, n° 163, p. 1442, 1997.
- [66] M. G. et M. a. W. H. G. W. W., «Formation Of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,» *Opt.Lett.*, vol. 14, n° 115, pp. 823-825, 1989.
- [67] T. Erdogan, «Fiber grating spectra,» *J. of Lightwave Techn.*, vol. 15, p. 1277–1294, 1997.
- [68] V. Bhatia, «Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing,» *sensing Opt. Express*, vol. 4, n° 166, p. 457, 1999.
- [69] F. Yu, «Fiber Optic Sensors,» *Dekker*, 2002.
- [70] J. Ascorbe, J. Corres, F. Arregui et I. Matías, «Optical fiber current transducer using lossy mode resonances for high voltage networks,» *J. Lightwa. Technol.* , vol. 33, p. 2504–2510, 2015.

- [71] Z. Ding, Y. Du, T. Liu, K. Liu, B. Feng et J. Jiang, «Distributed optical fiber current sensor based on magnetostriction in OFDR,» *IEEE Photon. Technol. Lett.* , vol. 27, p. 2055–2058, 2015.
- [72] J. Lopez-Higuera, *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [73] N. C. 93-800, *Composants électroniques – Spécification générique pour les capteurs à fibres optiques*, Association Française de Normalisation AFNOR, Septembre 1991.
- [74] G. Holst et B. Mizaikoff, *Handbook of optical fiber sensing technology*, New York Huard: John Wiley & Sons Ltd , ISBN: 978-0-471-82053-6, 2001.
- [75] D. Marcuse, D. Gloge et E. Marcatili, Guiding properties of fibres. In Miller, S.E. & Chynoweth, A.G. (Eds.), *Optical fiber telecommunications*, New York: Academic Press, 1979.
- [76] P. a. a. Raatikainen, «Fiber-optic liquid-level sensor,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 58, n° %12, pp. 93-97, 1997.
- [77] C. a. a. Li, «Distributed fiber optic bi-directional strain-displacement sensor modulated by fiber bending loss,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 111, n° %12-3, pp. 236-239, 2003.

- [78] D. A. Krohn, *Fiber Optic Sensors: Fundamental and Applications*, North Carolina: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1988.
- [79] F. Castro, S. Carneiro et O. a. C. Lisboa, «wo-Mode Optical Fiber Accelerometer,» *Optics Letters*, vol. 17, n° %120, pp. 1474-1475, 1992.
- [80] B. a. a. Wu, «Hybrid-integrated Michelson fiber optic accelerometer,» *Optical Engineering*, vol. 43, n° %12, pp. 313-318, 2004.
- [81] K. Hill, Y. Fujii et D. a. K. Johnson, «Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication,» *Applied Physics Letters*, vol. 32, n° %110, pp. 647-649, 1978.
- [82] A. a. K. Othonos, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Massachusetts: Artech House, 1999.
- [83] G. A. Ball et W. W. a. C. P. K. Morey, «Single- and multipoint fiber-laser sensors,» *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 267-270, 1993.
- [84] K. P. a. K. D. Koo, «Bragg grating-based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing,» *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, pp. 1243-1249 , 1995.
- [85] A. N. Starodumov, L. A. Zenteno et D. a. R. D. L. Monzon, «Fiber Sagnac interferometer temperature sensor,» *Appl. Phys. Lett.* , vol. 70, pp. 19-21, 1997.

- [86] T. L. a. a. Lowder, «High temperature sensing using surface relief Fiber Bragg gratings,» *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 1926-1928, 2005.
- [87] Y. Shen, J. He, W. Zhao, T. Sun, K. T. V. Grattan et W. D. N. Pritchard, «Fiber-optic sensor system for heat-flux measurement,» *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, n° %114, pp. 1006-1012, 2004.
- [88] N. Hirayama et Y. Sano, «Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use,» *ISA Transactions*, vol. 39, n° %12, pp. 169-173, 2000.
- [89] S. A. Wade et S. F. a. B. ., W. Collins, «Fluorescence intensity ratio technique for optical fiber point temperature sensing,» *Journal of Applied Physics*, vol. 94, pp. 4743- 4756, 2003.
- [90] E. Li et X. a. Z. Wang, «Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, p. 091119, 2006.
- [91] Y. Liu et L. Wei, «Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers,» *Appl. Opt.*, vol. 46 , pp. 2516-2519, 2007.
- [92] D. Tosi, E. Macchi, M. Gallati, G. Braschi, A. Cigada, S. Rossi et G. a. L. Leen, «Fiber-optic chirped FBG for distributed thermal monitoring of ex-vivo radiofrequency ablation of liver,» *Biomedical Optics Express*, vol. 5, n° %16, pp. 1799 -1811, 2014.

- [93] G. Palumbo, D. Tosi, A. Iadicicco et S. Campopiano, «Analysis and Design of Chirped Fiber Bragg Grating for Temperature Sensing for Possible Biomedical Applications,» *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, n° %13, p. 7103015, 2018.
- [94] A. L. .. Ricchiuti, D. Barrera, K. Nonaka et S. Sales, «Temperature gradient sensor based on a long-fiber Bragg grating and time-frequency analysis,» *Optics Letts.*, vol. 39, n° %119, pp. 5729-5731, 2014.
- [95] D. Tosi, E. Macchi, M. Gallati, G. Braschi, A. Cigada, S. Rossi et G. a. L. Leen, «Fiber-optic chirped FBG for distributed thermal monitoring of ex-vivo radiofrequency ablation of liver,» *Biomedical Optics Express*, vol. 5, n° %16, pp. 1799-1811, 2014.
- [96] F. Napoleoni, M. Caponero, A. Polimadei, D. Tosi et P. a. S. Saccomandi, «Monitoring of thermal treatment by linearly chirped fiber Bragg grating sensors: feasibility assessment during laser ablation on ex-vivo liver,» chez *38th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Orlando, FL, USA, 2016.
- [97] G. Palumboa, A. Iadiciccoa, D. Tosi, P. Verzec, N. Carlomagnoc, V. Tammaroc et J. a. C. Ippolitoc, «Fiber Bragg Grating for temperature monitoring during medical radiofrequency treatments,» *30th Eurosensors Conference, Eurosensors 2016;Elsevier Procedia Engineering 168*, p. 1308 – 1311, 2016.

- [98] P. Saccomandi, A. Varalda, R. Gassino, D. Tosi, C. Massaroni, M. A. Caponero, R. Pop, S. Korganbayev, G. Perrone, M. Diana, A. Vallan, G. Costamagna et J. a. S. Marescaux, «Linearly chirped fiber Bragg grating response to thermal gradient: from bench tests to the real-time assessment during in vivo laser ablations of biological tissue,» *J. of Biomedical Optics*, vol. 22, n° 19, p. 097002, 2017.
- [99] A. Varalda, E. Schena, C. Massaroni, M. A. Caponero, A. Polimadei, D. Tosi et P. Saccomandi, «Assessment of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor under linear and non-linear temperature gradient,» chez *IEEE Int. Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Torino, Italy, 2017.
- [100] S. a. a. Korganbayev, «Thermal Profile Detection Through High-Sensitivity Fiber Optic Chirped Bragg Grating on Microstructured PMMA Fiber,» *J. of Lightwave Techn.*, vol. 36, pp. 4723 - 4729, 2018.
- [101] V. a. V. A. M. Bhatia, «Optical fiber long-period grating sensors,» *Opt. Lett.* , vol. 21, pp. 692-694 , 1996.
- [102] S. W. a. T. P. James, «Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application,» *Meas. science and techn.*, vol. 14, pp. R49-R61, 2003.
- [103] R. Min, C. Marques, K. Nielsen et O. a. O. B. Bang, «Fast Inscription of Long Period Gratings in Microstructured Polymer Optical Fibers,» *IEEE Sensors J.*, vol. 18, pp. 1919-1923, 2018.

- [104] V. Bhatia, «Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing,» *Opt. Express*, vol. 4, n° 111, p. 457–466, 1999.
- [105] E. Dianov, S. Vasiliev, A. Kurkov, Medvedkov et V. Protopopov, «In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings,» chez *22nd European Conference on Optical Communication - ECOC'96*, Oslo, MoB.3.6, pp.1. 65-1.68., 1996.
- [106] R. C. Youngquist, J. L. Brooks et H. J. Shaw, «Birefringent-fiber polarization coupler,» *Optics Letters*, vol. 8, n° 112, pp. 656-658, 1983.
- [107] K. O. a. a. Hill, «Efficient mode-conversion in telecommunication fiber using externally written gratings,» *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 1270-1272, 1990.
- [108] K. O. a. a. Hill, «Efficient narrowband LP₀₁↔LP₀₂ mode converters fabricated in photosensitive fiber: Spectral response,» *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 682-684, 1991.
- [109] F. Delgado, D. Silveira, T. Coelho et A. Bessa dos Santos, «Mathematical modelling for correlation between temperature and mechanical strain in long period gratings,» *In Proceedings of the 2014 IEEE Sensors*, p. 1900–1903, 2014.
- [110] F. T. S. e. Y. Yu, *Fiber Optic Sensor*, New York: Marcel Dekker Inc, 2002.

- [111] X. Z. L. et B. I., «Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings,» *J. Lightwa. Technol.*, vol. 20, p. 255–256, 2002.
- [112] T. H. et U. K., «Characterization of long-period grating refractive index sensors and their applications,» *Sensors*, vol. 9, p. 4559 – 4571, 2009.
- [113] K. Chen, H. P. R. et R. a. Z. J. Tam, «Rapid long-period grating formation in hydrogen loaded fibre with 157 nm F2 laser radiation Electron,» *Electron. Lett.*, vol. 36, n° %11, p. 2000, 2000 .
- [114] J. a. T. D. Y. Blows, «Gratings written with tripled output of Q-switched Nd:YAG,» *laser Electron. Lett.*, vol. 36, n° %19, p. 1837, 2000 .
- [115] M. Fujumaki, Y. Ohki et J. a. R. S. Brebner, «Fabrication of long-period optical fibre gratings by use of ion implantation,» *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 88-90, 2000.
- [116] Y. e. a. Kondo, «Fabrication of long-period fibre gratings by focused irradiation of infra-red femtosecond laser pulses,» *Opt. Lett.*, vol. 24, n° %18, p. 646, 1999.
- [117] L. e. a. Drozin, «Long-period fibre gratings written by CO2 exposure of H2-loaded standard fibres,» *Electron. Lett.*, vol. 36, n° %13, p. 742, 2000.
- [118] H. W. Lee et Y. a. C. K. S. Liu, «Writing of long-period gratings in conventional and photonic-crystal polarization-maintaining fibers by CO2-laser pulses,» *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, n° %12, p. 132–134, 2008.

- [119] S. Savin, M. J. F. Digonnet et G. S. a. S. H. Kino, «Tunable mechanically induced long-period fibre gratings,» *Opt. Lett.*, vol. 25, n° %112, p. 710, 2000.
- [120] C. Lin et G. a. W. L. A. Chern, «Periodical corrugated structure for forming sampled fibre Bragg grating and long-period fibre grating with tunable coupling strength,» *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, n° %120, p. 1212, 2001.
- [121] G. Rego, O. Okhotnikov et E. a. S. V. Dianov, «High-temperature stability of long-period fibre gratings using an electric arc,» *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, n° %110, pp. 1574- 1579, 2001.
- [122] G. Rego, A. Fernandez, A. Gusarov, B. Brichard, F. Berghmans et J. a. S. Santos, «Effect of ionizing radiation on the properties of arc-induced long-period fiber gratings,» *Applied Optics* , vol. 44, n° %129, pp. 6258-6263, 2005.
- [123] K. a. M. Y. Morishita, «Fabrication and resonance wavelengths of long-period gratings written in a pure-silica photonic crystal fiber by the glass structure change,» *J. of Lightwave Technol.*, vol. 22, n° %12, p. 625–630, 2004.
- [124] J. S. Petrovic, H. Dobb et V. K. e. a. Mezentsev, «Sensitivity of LPGs in PCFs fabricated by an electric arc to temperature, strain, and external refractive index,» *J. of Lightwave Technol.*, vol. 25, n° %15, p. 1306–1312, 2007.
- [125] J. Berthold, «Historical Review of Microbend Fiber optic Sensors,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, n° %17, pp. 1193-1199, 1995.

- [126] I. Sohn, J. Baek, N. Lee et H. a. S. J. Kwon, «Gain flattened and improved EDFA using microbending long-period fibre gratings.,» *Electronics Letters* , vol. 38, n° %122, pp. 1324-1325, 2002.
- [127] W. J. Bock, J. Chen et P. E. T. a. K.-P. M. Mikulic, « Pressure sensing using periodically tapered long-period gratings written in photonic crystal fibres,» *Meas. Sci. Technol.* , vol. 18 , n° %110, p. 3098, 2007.
- [128] A. I. Kalachev et V. a. N. D. N. Pureur, «Investigation of long-period fiber gratings induced by high-intensity femtosecond UV laser pulses,» *Opt. Commun.*, vol. 246 , pp. 107-115, 2005.
- [129] J. Cobine, in *Gaseous Conductors*, New York: Mc Graw-Hill: 290, 1941, pp. J.D. Cobine, in *Gaseous Conductors*. Mc Graw-Hill: 290, 1941.
- [130] S. H. Nam, C. Zhan, J. Lee, C. Hahn, K. Reichard, P. Ruffin, K. L. Deng et S. and Yin, «Bend-insensitive ultra short long-period gratings by the electric arc method and their applications to harsh environment sensing and communication,» *Optics Express* , vol. 13, n° %13, pp. 731-737 , 2005.
- [131] M. Smietana, W. Bock, P. Mikulic et J. Chen, «Increasing sensitivity of arc-induced long-period gratings-pushing the fabrication technique toward its limits.,» *Meas. Sci. Technol.* , vol. 22, n° %12, p. 015201, 2011.

- [132] X. Shu, L. Zhang et I. Bennion, « Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings,» *J. Lightwa. Technol.*, vol. 20, n° %12, p. 255–256, 2002.
- [133] X. Yu, M. Zhang, P. Childs, L. Wang, S. Lai et Y. Liao, «Characteristics analysis of cascaded long-period gratings with nm-thick film coating,» *Proceedings of SPIE*, vol. 7508, pp. 75081N-75081N, 2009.
- [134] Y. Tan, L. P. Sun, L. Jin, J. Li et B.-O. Guan, «Microfiber Mach-Zehnder interferometer based on long period grating for sensing applications,» *Opt. Express* , vol. 21, p. 154 –164, 2013.
- [135] S. W. a. T. P. James, «Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application,» *Measurement science and technology*, vol. 14, n° %15, pp. R49-R61, 2003.
- [136] T. Eftimov, N. Koffi, F. Lesage, P. Mikulic et W. Bock, «Thermal gradients sensing using LPGs with a spatially varying effective refractive index difference,» *Optics and Laser Technology* , vol. 122, p. 105836, 2020.
- [137] J. Fu, C. Guan, Z. Zhu, M. Wang, P. Huang, P. Li, J. Shi, L. Yuan et Z, «In-Fiber M-Interferometer Based on Cascaded Long Period Gratings in Embedded-Core Fiber,» *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29 , p. 1876–1979, 2017.

- [138] T. Eftimov, N. Koffi, F. Lesage, P. Mikulic et W. J. Bock, «Responses to temperature and thermal gradients of non-uniform cascaded LPGs taking into account dispersion,» *Optical Fiber Technology*, vol. 55, n° %1102098, 2020.
- [139] N. G. M. Koffi, T. Eftimov, A. Arapova, F. Lesage, W. Bock et A. Cherif, «Simultaneous Measurement of Thermal Gradient and Average Temperature in Concrete Blocks Using Nonuniform Long-Period Optical Fiber Gratings,» in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, n° %19509308, pp. 1-8, 2022.
- [140] Y. Cao, G. R. Guenette, R. J. G. Norton et A. H. Epstein, «High-frequency response heat-flux gauge,» *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 57, pp. 639-649, 1986.
- [141] B. William, J. Spillman et J. W. a. S. Inc., *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, Ed. By Eric Udd, 2011.
- [142] A. a. a. Arditty, «Les capteurs à fibre optique : principes et technologies,» *Optoélectronique*, n° %113, pp. 55-62, 1982.
- [143] M. Amanzadeh, S. Aminossadati, M. Kizil et A. Raki'c, «Recent developments in fibre optic shape sensing,» *Measurement*, vol. 128, p. 119–137, 2018, .
- [144] A. M. a. a. Vengsarkar, «Long-period fiber gratings as band-rejection filters,» *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 58-65, 1996.

- [145] C. Silva, J. Coelho et P. a. J. Caldas, «Fibre Sensing System Based on Long-Period Gratings for Monitoring Aqueous Environments,» *Fiber Opt. Sensors*, p. 317–342, 2012.
- [146] S. Vasiliev, E. Dianov, O. Medvedkov, D. Constantitni, A. Iocco et H. a. S. R. Limberger, «Properties of the cladding modes of an optical fibre excited by refractive index,» *Quantum Electronics* , vol. 29 , p. 65–69, 1999.
- [147] G. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, London: Academic Press, 2001.
- [148] K. Chen, H. P. et J. a. T. R. Zhang, «Fabrication of strong long-period gratings in hydrogen-free fibers with 157-nm F2 -laser radiation,» *Opt. Letts.* , vol. 26, p. 771–773, 2001),.
- [149] K. O. Hill, J. Fujii, D. C. et B. and Kawasaki, «Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- [150] D. Tosi, E. Macchi, M. Gallati, G. Braschi, A. Cigada, S. Rossi, G. Leen et E. Lewis, «Fiber-optic chirped fbg for distributed thermal monitoring of ex-vivo radiofrequency ablation of liver,» *Biomedical Optics Express* , vol. 5, p. 1799–1811, 2014.

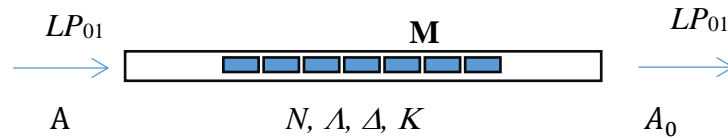
- [151] R. Sporken et J. Longueville, "Physique des Télétransmissions : Les fibres optiques", Namur: Université de Namur, 2004.
- [152] P. S. André et A. N. a. P. L. Pinto, «Effect of temperature on the single modes fibers chromatic dispersion,» *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, vol. 3 , n° %15, pp. 64-70, 2004.
- [153] A. Othonos, «Fiber Bragg gratings,» *Rev. Sci. Instrum.* , vol. 68, n° %112, pp. 4309-4341, 1997.
- [154] G. Rego, O. Okhotnikov et E. a. S. V. Dianov, «High-temperature stability of long-period fibre gratings using an electric arc,» *J. Lightwave Technol.* , vol. 19 , n° %19, p. 1574, 2001.
- [155] G. Rego, P. Marques et H. a. S. J. Salgado, «Simultaneous measurement of temperature and strain based on arc-induced long-period fibre gratings,» *Electronics Letters*, vol. 41, n° %12, pp. 60-62, 2005.
- [156] W. Bock, J. Chen, P. Mikulic et T. Eftimov, «A novel fiber-optic tapered long-period grating sensor for pressure monitoring,» *IEEE Trans. Instrum. Meas.* , vol. 56, n° %14, p. 1176–1180, 2007.
- [157] E. Udd et W. B. Spillman Jr, *An Introduction for Engineers and Scientists*, New Jersey: John Wiley and Sons, 2011, p. 512.

- [158] M. Koffi, T. Eftimov, W. Bock, F. J. Lesage et P. Mikulic, «Measurement of temperature and thermal gradients using fiber optic Long Period Gratings,» chez *Complex Days Conference*, Nice, 2018.
- [159] S. Daud, M. Jalil, S. Najmee, S. Saktioto, J. Ali et P. Yupapin, «Development of FBG Sensing System for Outdoor Temperature Environment,» *Procedia Engineering*, vol. 8, p. 386–392, 2011.
- [160] M. Fajkus, I. Navruz, S. Kepak, A. Davidson, P. Siska, J. Cubik et V. Vasinek, «Capacity of wavelength and time division multiplexing for quasi-distributed measurement using fiber bragg gratings,» *Optics Optoelectronics*, vol. 13, n° %15, p. 575–582, 2015.
- [161] I. Hwang et S. K. B. Yun, «Long-period fiber gratings based on periodic microbends.,» *Optics Letters*, vol. 24, n° %118, pp. 1263-1265, 1999.
- [162] T. Eftimov, N. Koffi, F. Lesage, P. Mikulic et W. Bock, «Responses to temperature and thermal gradients of non-identical cascaded LPGs taking into account dispersion,» *Optical Fiber Technology*, vol. 55, n° %1102098, 2020.

ANNEXE

1. ANNEXE A

➤ Méthode matricielle pour un seul réseau



$$A = \mathbf{M} \cdot A_0$$

$$\begin{bmatrix} A_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C + j\Delta S & jKS \\ jKS & C - j\Delta S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C + j\Delta S) \cdot 1 + jKS \cdot 0 \\ jKS \cdot 1 + (C - j\Delta S) \cdot 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C + j\Delta S & jKS \\ jKS & C - j\Delta S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C + j\Delta S \\ jKS \end{bmatrix}$$

$$A_c = (C + j\Delta S) \cdot 1 + jKS \cdot 0$$

$$A_c = C + j\Delta S$$

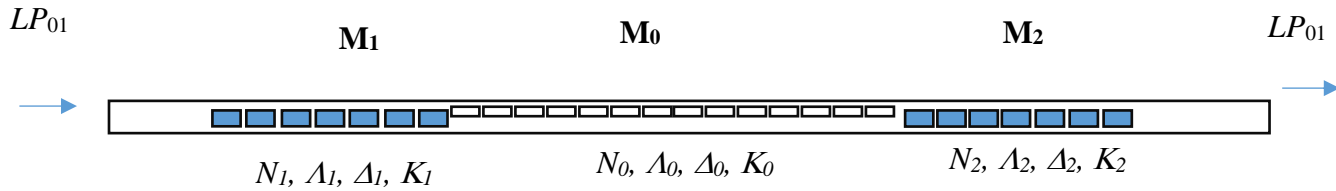
le module du nombre complexe A_c est $|A_c|$:

$$|A_c| = \sqrt{C^2 + (\Delta S)^2}$$

$$I = |A_c|^2$$

$$I = C^2 + \Delta^2 S^2 = 1 - K^2 S^2$$

➤ Méthode matricielle pour 3 réseaux en cascade



$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_0 \mathbf{M}_1$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} C_1 + j\Delta_1 \cdot S_1 & jK_1 \cdot S_1 \\ jK_1 \cdot S_1 & C_1 - j\Delta_1 \cdot S_1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} C_2 + j\Delta_2 \cdot S_2 & jK_2 \cdot S_2 \\ jK_2 \cdot S_2 & C_2 - j\Delta_2 \cdot S_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} C_0 + j\Delta_0 \cdot S_0 & jK_0 \cdot S_0 \\ jK_0 \cdot S_0 & C_0 - j\Delta_0 \cdot S_0 \end{bmatrix}$$

Calculs Matriciels

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_0 \mathbf{M}_1 \mathbf{A}^o$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{M}_1 \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} C_1 + j\Delta_1 \cdot S_1 & jK_1 \cdot S_1 \\ jK_1 \cdot S_1 & C_1 - j\Delta_1 \cdot S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 + j\Delta_1 \cdot S_1 \\ jK_1 \cdot S_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M}_0 \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} C_0 + j\Delta_0 \cdot S_0 & jK_0 \cdot S_0 \\ jK_0 \cdot S_0 & C_0 - j\Delta_0 \cdot S_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 + j\Delta_1 \cdot S_1 \\ jK_1 \cdot S_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} C_0 C_1 - (\Delta_0 \Delta_1 + K_0 K_1) S_0 S_1 + j(\Delta_0 S_0 C_1 + \Delta_1 S_1 C_0) \\ (\Delta_0 K_1 - K_0 \Delta_1) S_0 S_1 + j(K_0 S_0 C_1 + K_1 S_1 C_0) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_c \\ A_{cl} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_2 \mathbf{Q}$$

$$= \begin{bmatrix} C_2 + j\Delta_2 \cdot S_2 & jK_2 \cdot S_2 \\ jK_2 \cdot S_2 & C_2 - j\Delta_2 \cdot S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 C_1 - (\Delta_0 \Delta_1 + K_0 K_1) S_0 S_1 + j(\Delta_0 S_0 C_1 + \Delta_1 S_1 C_0) \\ (\Delta_0 K_1 - K_0 \Delta_1) S_0 S_1 + j(K_0 S_0 C_1 + K_1 S_1 C_0) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
A_c = & [C_0 C_1 - (\Delta_0 \Delta_1 + K_0 K_1) S_0 S_1] C_2 - (\Delta_0 S_0 C_1 + \Delta_1 S_1 C_0) \Delta_2 S_2 - (K_0 S_0 C_1 \\
& + K_1 S_1 C_0) K_2 S_2 \\
& + j([C_0 C_1 - (\Delta_0 \Delta_1 + K_0 K_1) S_0 S_1] \Delta_2 S_2 + (\Delta_0 S_0 C_1 + \Delta_1 S_1 C_0) C_2 + \\
& (\Delta_0 K_1 - \Delta_1 K_0) S_0 S_1 K_2 S_2)
\end{aligned}$$

$$I_c = A_c \cdot A_c^* = |A_c|^2$$

$$\begin{aligned}
I(\lambda) = & ([C_0 C_1 - (\Delta_0 \Delta_1 + K_0 K_1) S_0 S_1] C_2 - (\Delta_0 S_0 C_1 + \Delta_1 S_1 C_0) \Delta_2 S_2 - (K_0 S_0 C_1 \\
& + K_1 S_1 C_0) K_2 S_2)^2 \\
& + ([C_0 C_1 - (\Delta_0 \Delta_1 + K_0 K_1) S_0 S_1] \Delta_2 S_2 + (\Delta_0 S_0 C_1 + \Delta_1 S_1 C_0) C_2 + \\
& (\Delta_0 K_1 - \Delta_1 K_0) S_0 S_1 K_2 S_2)^2
\end{aligned}$$

2. ANNEXE B

Simulations

À l'aide de l'équation $I(\lambda) = f(C, K, S, \Delta)$, nous pouvons simuler la performance thermique de différents réseaux LPG.

Modélisation de la sensibilité

La simulation de la dépendance des réponses spectrales pour les différences de température nous mène à définir Λ_1 et Λ_2 , ensuite Δn_1 et Δn_2 comme suite :

$$\Lambda_1 = \Lambda_0 + \alpha_T \Delta T_1 = \Lambda_0 + \alpha_T \delta T_1 m$$

$$\Lambda_2 = \Lambda_0 + \alpha_T \Delta T_2 = \Lambda_0 - \alpha_T \delta T_2 m$$

$$\Delta n_1 = \Delta n_{01} + \alpha_n \Delta T_1 = \Delta n_0 + \alpha_n \delta T_1 m$$

$$\Delta n_2 = \Delta n_{02} + \alpha_n \Delta T_2 = \Delta n_0 - \alpha_n \delta T_2 m$$

avec $\delta T_1 = T_1 - T_0$

$$\delta T_2 = T_2 - T_0$$

$$\Delta n_0 = \frac{\lambda_c}{\Lambda_0}$$

$$m \in \mathbb{Z}$$

Certaines valeurs sont fixées et pour bien décrire les types de réponses qui peuvent être attendues en fonction des signes et des valeurs des sensibilités nous avons représenté la différence de température comme suite :

$$\alpha_T \delta T_1 = -\alpha_T \delta T_2 = \alpha_T \delta T = 0,01^\circ C$$

$$\Delta T_i = \alpha_T \delta T_i m \quad ; \quad i = (1, 2)$$

Il suffit de varier m pour simuler le fait que nous chauffons un côté à un certain degré de température et au même moment de l'autre côté du réseau nous le refroidissons au même degré de température.

❖ Les valeurs fixes appelées valeurs d'entrée sont les suivantes :

$$\Lambda_0 = 250 \mu m \quad ; \quad \lambda_c = 1,55 \mu m \quad ; \quad \Delta \lambda = 0,043 \mu m$$

et les périodes N_0, N_1 et N_2 , périodes que nous faisons varier pour obtenir les trois différents réseaux étudiés dans ce projet tout en maintenant :

$$N_0 + N_1 + N_2 = N = 200$$



Premier réseau

N_0	20
N_1	90
N_2	90

Deuxième réseau

N_0	100
N_1	50
N_2	50

Troisième réseau

N_0	160
N_1	20
N_2	20

Les valeurs calculées :

$$\Delta n_0 = \frac{\lambda_c}{\Lambda_0} = \frac{1,55}{250} = 0,0062$$

$$L_0 = \frac{N_0 * \Lambda_0}{1000}$$

Les valeurs calculées qui dépendent de la variable m :

$$\Delta T_i = \alpha_T \delta T_i m \quad ; \quad \delta n = 0,0000015 * m \quad ; \quad \alpha_n \Delta T_1 = -\alpha_n \Delta T_2 = 0,000002$$

$$\Delta n_1 = \Delta n_0 + \alpha_n \delta T_1 m \quad ; \quad \Delta n_2 = \Delta n_0 - \alpha_n \delta T_2 m$$

$$\Lambda_1 = \Lambda_0 - \Delta T_1 \quad ; \quad \Lambda_2 = \Lambda_0 - \Delta T_2$$

$$L_1 = \frac{N_1 * \Lambda_1}{1000} \quad ; \quad L_2 = \frac{N_2 * \Lambda_2}{1000}$$

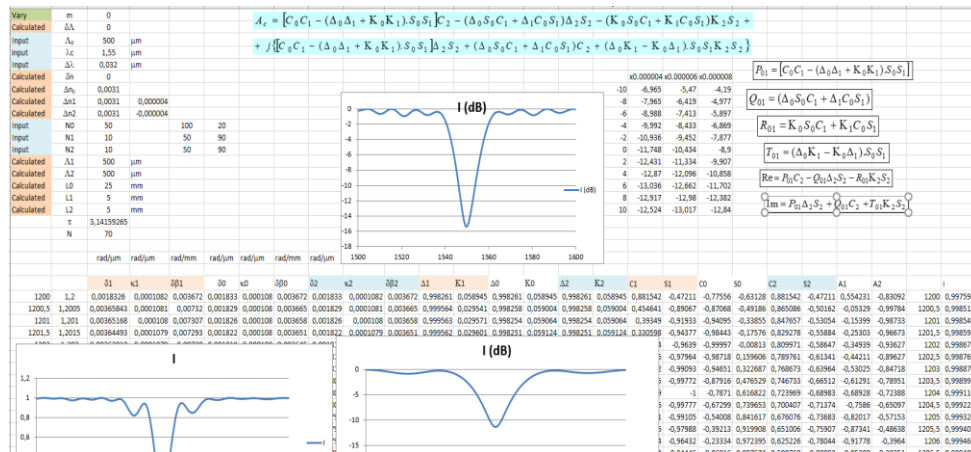
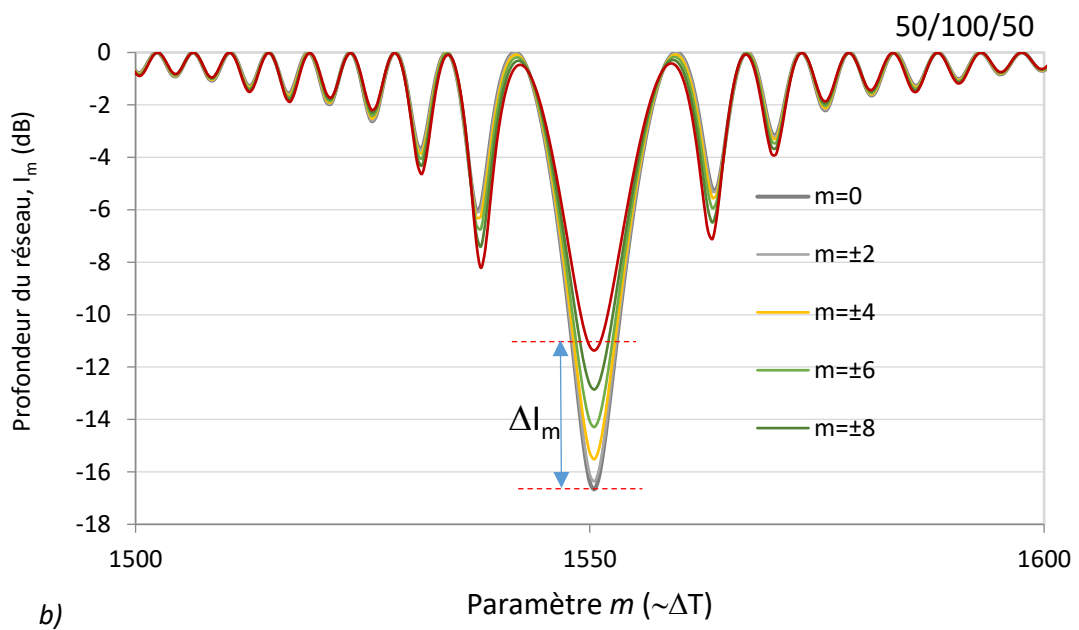
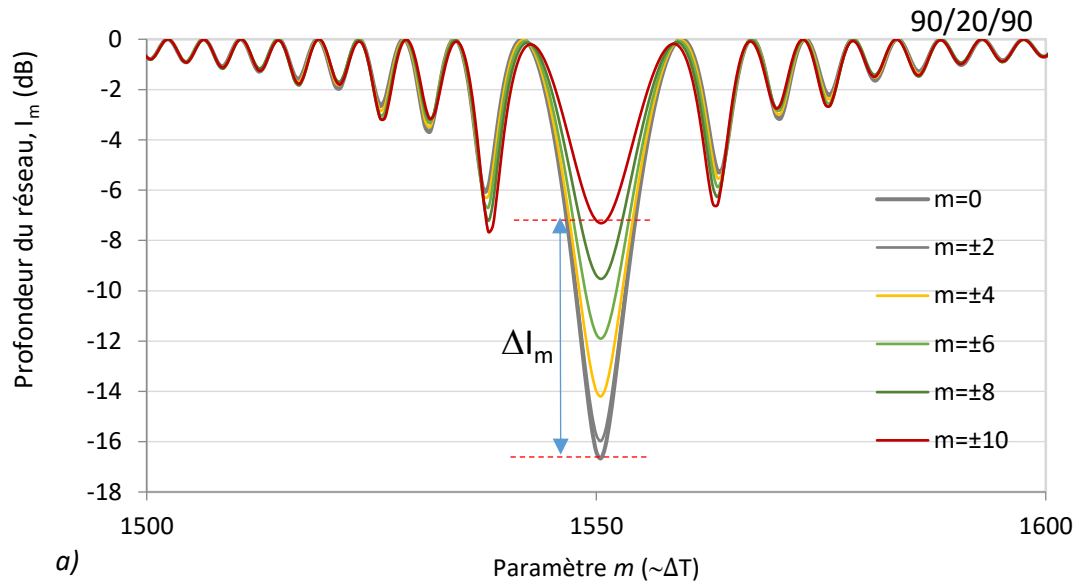


Figure 1 : Page 1 du Programme de simulation

Simulation dans le cas d'un réseau uniforme (symétrique)

Pour effectuer cette simulation, il a été pris en considération trois types de réseaux comme abordé précédemment. Le réseau symétrique est un réseau dans lequel $\Delta n_{01} = \Delta n_{02}$.



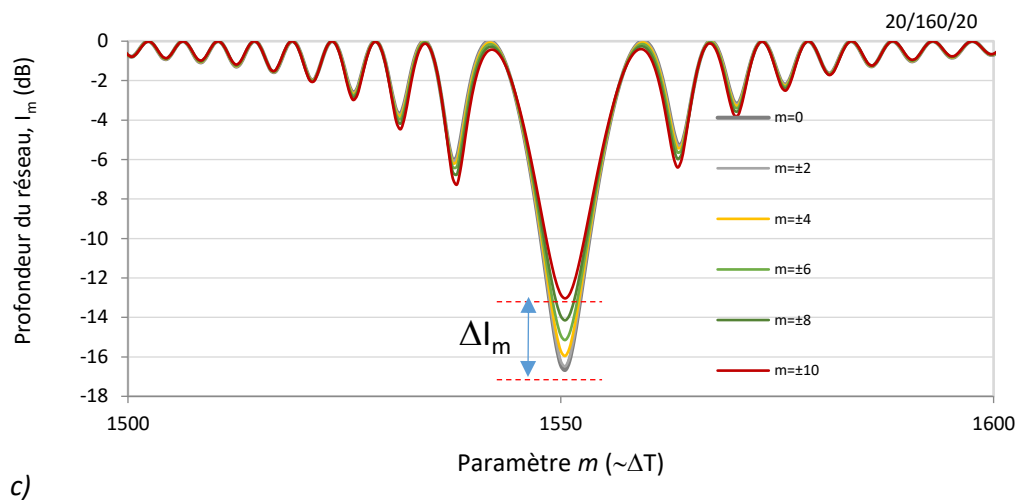


Figure 2 : Simulations de la réponse spectrale du réseau LPG uniforme aux différences de température ΔT : a), b), c) variations spectrales simulées pour $\alpha_n \Delta T_i$ nulle et m variant de -10 à $+10$.

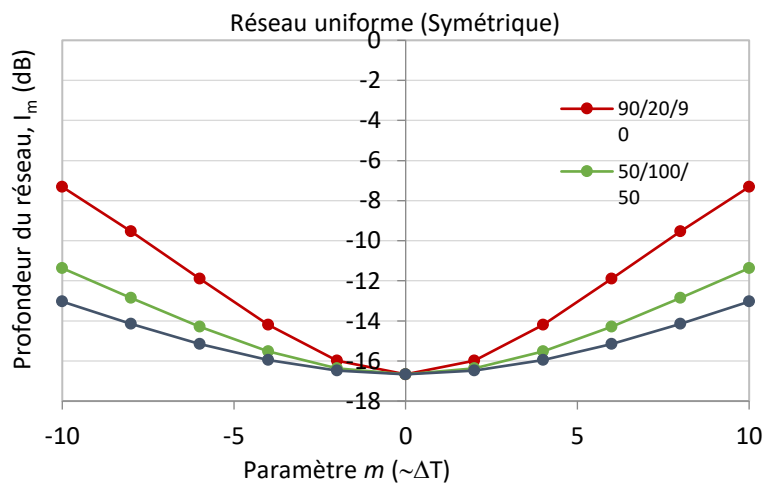


Figure 3 : Variations de la profondeur du réseau LPG uniforme suite aux différents paramètres de température m pour les trois types de réseaux.

On peut remarquer sur la Figure 1 a) correspondant au réseau 90/20/90 dont la longueur d'onde de fonctionnement des réseaux LPG aux extrémités est plus grande que celle du milieu. On remarque une variation importante de la profondeur du LPG suite à la variation

de la température. Cette variation diminue au fur et à mesure qu'on augmente la longueur du LPG central et qu'on diminue celle au niveau des extrémités du réseau comme le montre la Figure 1 b) avec le réseau 50/100/50 et la Figure 1 c) avec le réseau 20/160/20. Plus la longueur du réseau central est grande par rapport à chacun des réseaux des deux extrémités, plus la sensibilité à la température est faible sinon on remarque le phénomène inverse.

Simulation dans le cas d'un réseau non-uniforme (asymétrique)

Dans ce cas $\Delta n_{01} \neq \Delta n_{02}$, cela voudrait dire que soit les réseaux sont fabriqués de façon asymétrique, soit on introduit un gradient d'indice de réfraction local. Dans notre cas on immerge une partie du réseau dans l'eau.

L'asymétrie a été introduite en introduisant des corrections δn dans l'ordre de 10^{-6} riu de signes opposés à Δn_0 ce qui fait que $\Delta n_{01} \neq \Delta n_{02}$.

On a par la suite fait varier m de -10 à 10 pour obtenir les graphes sur les figures 3 a), b) et c) ci-dessous. Il est à remarquer également, comme cela a été dans le cas d'un réseau uniforme, que plus la longueur du réseau central est grande par rapport à chacun des réseaux des deux extrémités, plus la sensibilité à la température est faible et plus longueur du réseau central est plus petite par rapport à chacun des réseaux des deux extrémités, plus la sensibilité à la température est grande.

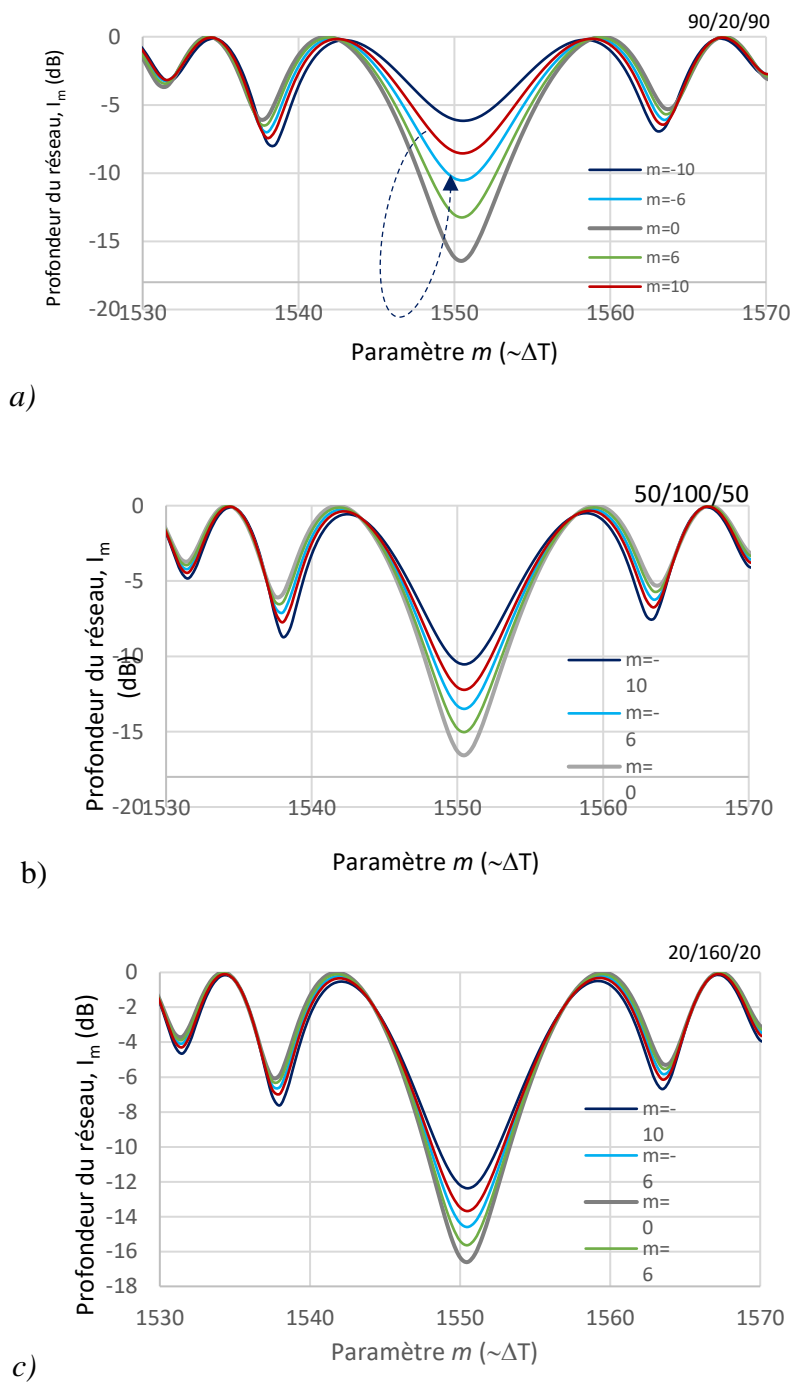


Figure 4 : Simulations théoriques de la réponse spectrale d'un réseau LPG non-uniforme aux différences de température ΔT : a), b), c) variations spectrales simulées pour $\alpha_n \Delta T_i$ en $^{\circ}\text{C}$ et m variant de -10 à +10.

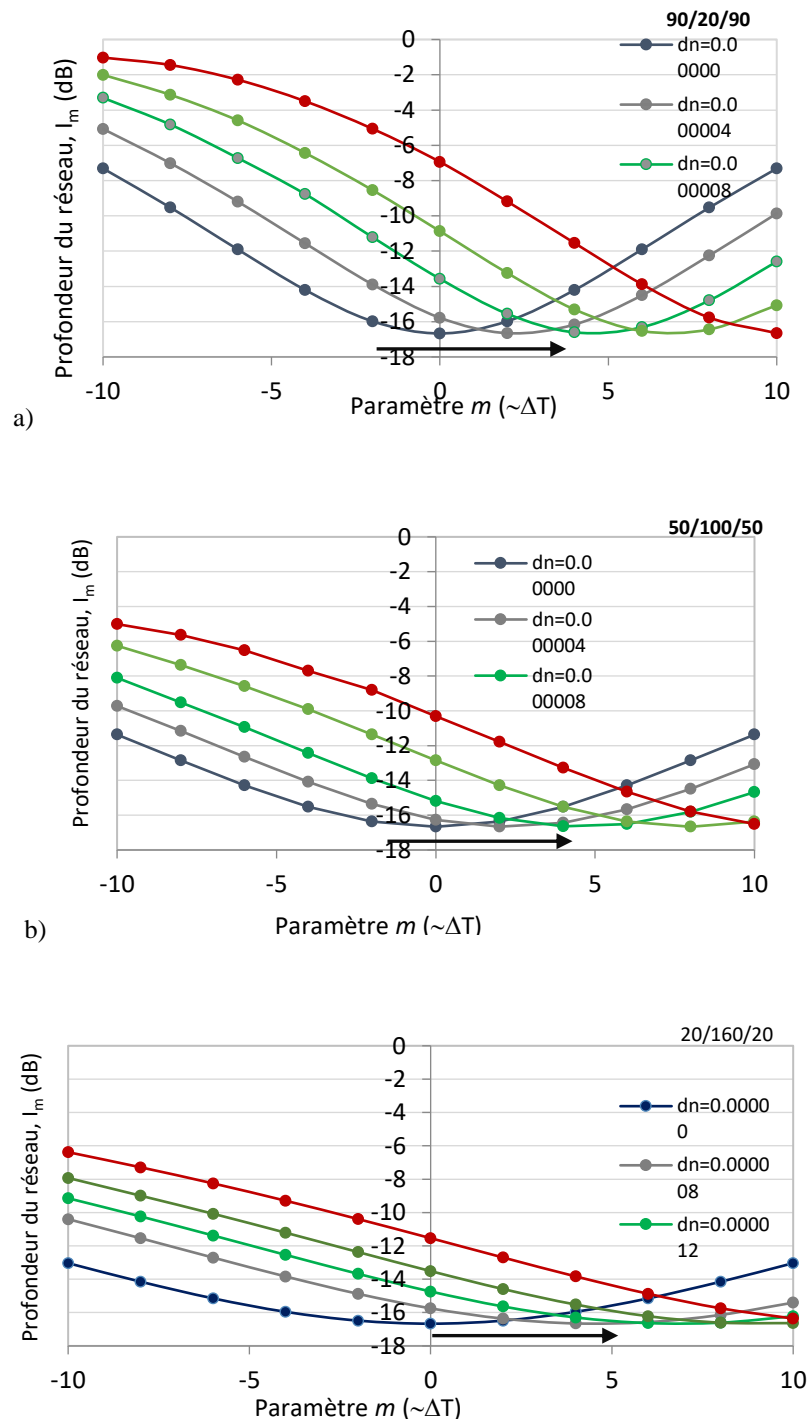


Figure 5 : a), b) et c) déplacement de la profondeur de la longueur d'onde centrale du LPG non-uniforme vers la droite suite aux variations de la sensibilité δn et du paramètre m .

Dans le cas du réseau non-uniforme ($\Delta n_{01} \neq \Delta n_{02}$), pour les tests, il a été question de varier la sensibilité δn et le paramètre m . Ainsi, Il a été possible d'observer pour un même type de réseau des comportements assez similaires pour les trois réseaux étudiés. Il s'agit en fait d'un déplacement de la profondeur de la longueur d'onde centrale vers la droite. Les changements par rapport à la profondeur du réseau en regardant les trois figures 4 a), b) et c) dépendent de la longueur du LPG central et ceux des deux extrémités.

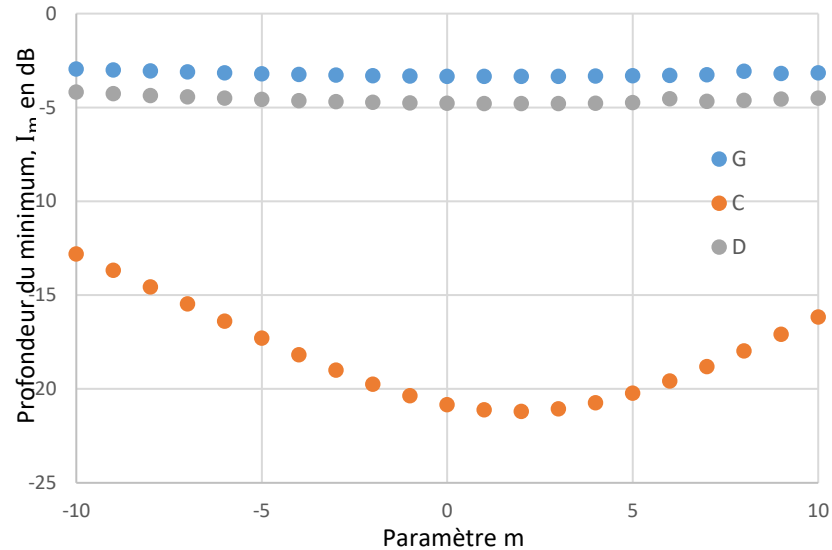


Figure 6 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur du paramètre m lorsque $N_1 = N_2$ et pour $dn = 0.000002$

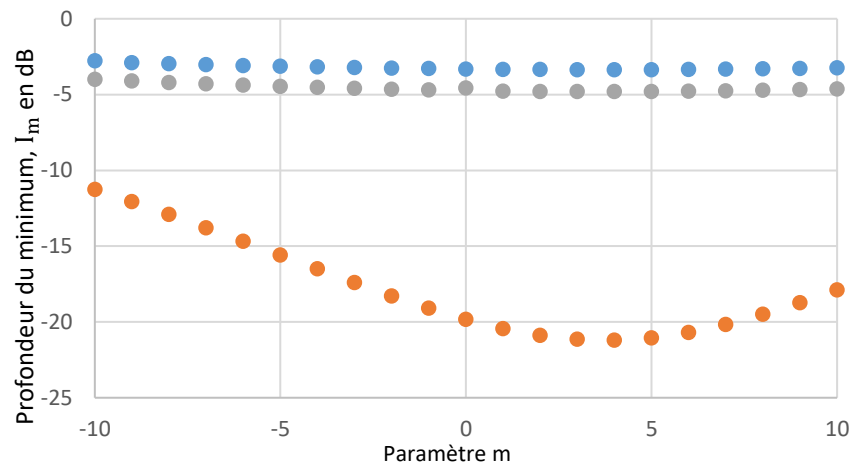


Figure 7 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur du paramètre m lorsque $N_1 = N_2$ et pour $dn = 0.000004$

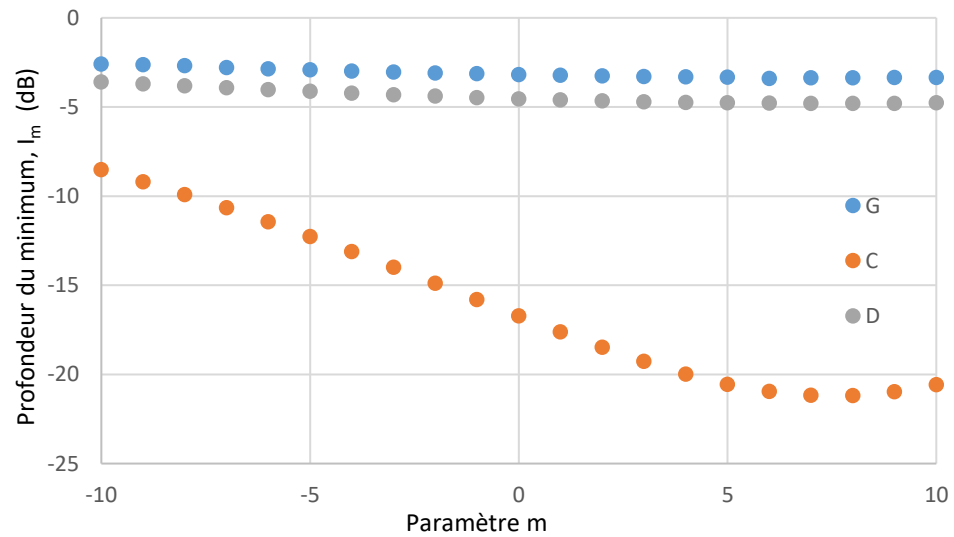


Figure 8 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur du paramètre m lorsque $N_1 = N_2$ et pour $dn = 0.000008$

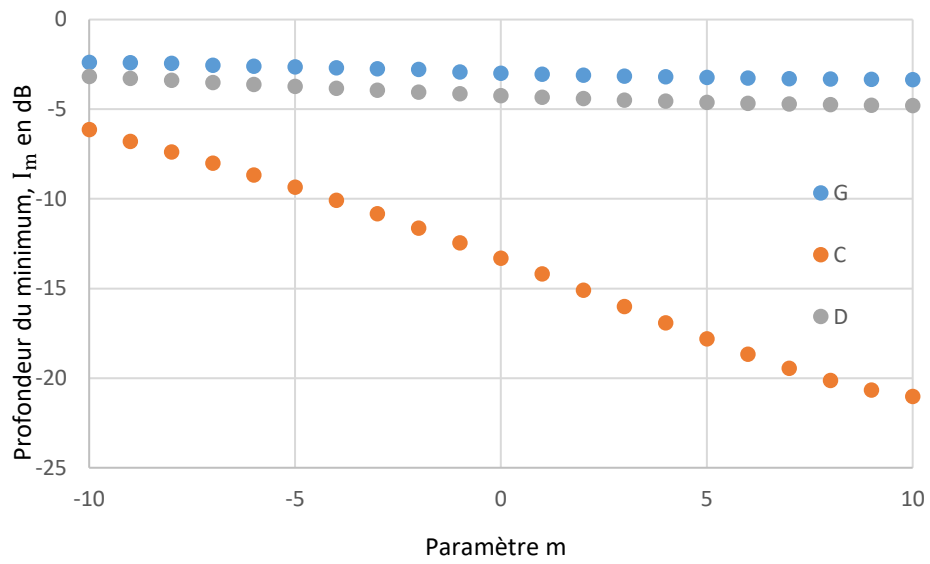


Figure 9 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur du paramètre m lorsque $N_1 = N_2$ et pour $dn = 0.000012$

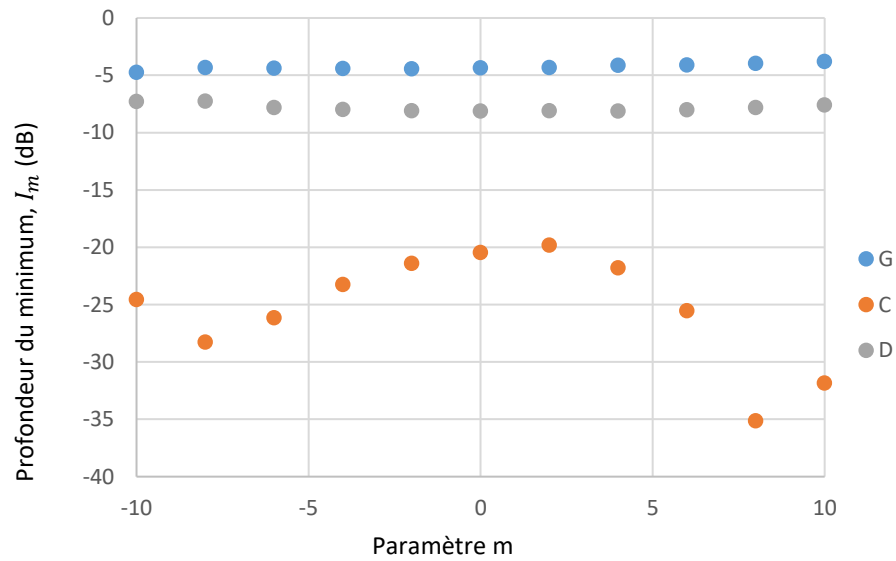


Figure 10 :

Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur du paramètre m

lorsque $N_1 \neq N_2$ et pour $dn = 0.000002$

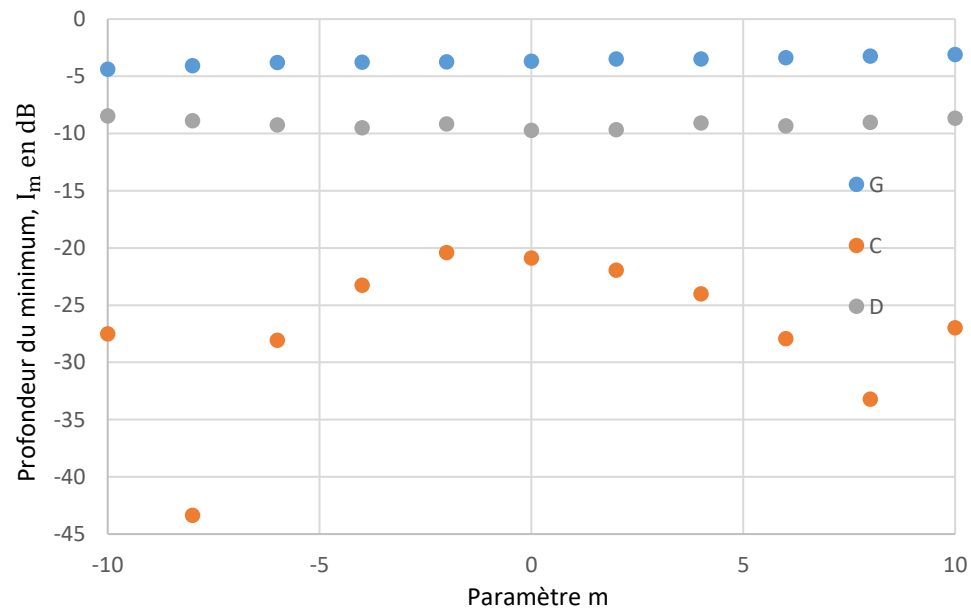


Figure 11 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur du paramètre m lorsque $N_1 \neq N_2$ et pour $dn = 0.000004$

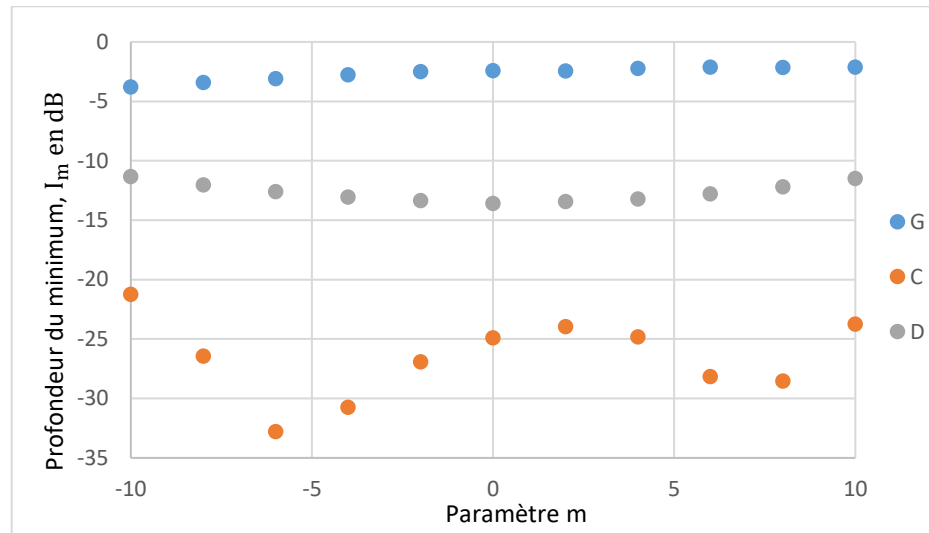


Figure 12 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur du paramètre m lorsque $N_1 \neq N_2$ et pour $dn = 0.000008$

Comme observations globales, il revient à dire que les gradients de température le long du LPG provoquent des changements de profondeur ΔI_c , tandis que la température moyenne provoque le déplacement de la longueur d'onde $\Delta \lambda_c$. En gros, les résultats des tests de simulation reflètent ceux escomptés.

3. ANNEXE C

ETALONNAGE ET CONFIGURATION DE L'ANALYSEUR DE SPECTRE

Ce dispositif garantit une bonne résolution pour le suivi du spectre. La configuration expérimentale utilisée pour l'étalonnage du réseau LPG est montrée sur la **Figure 1** et elle permet d'imposer une température aux modules Peltier.

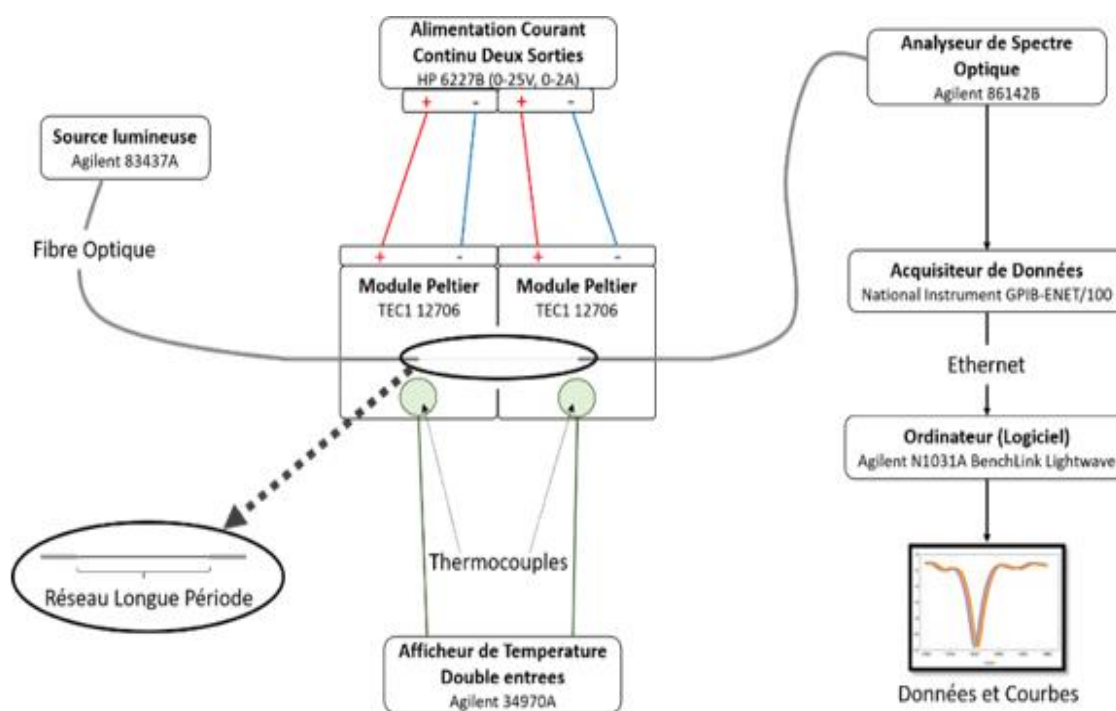


Figure 13 : Schéma du montage expérimental

Premièrement, il est impératif de programmer l'analyseur de spectre en fonction de la longueur d'onde de couplage du réseau LPG. À cette étape, la source lumineuse est directement connectée à l'analyseur spectral. Le Tableau 1 montre les paramètres ajustés dans l'analyseur de spectre.

Tableau 12: Paramétrage général de l'analyseur de spectre

Wavelength => start = 1160 nm; stop = 1660 nm	<i>Définition de la plage de données</i>
Bandwidth => manual resolution = 2 nm	<i>Définition de la période d'échantillonnage</i>
Amplitude => manual sensitivity = -75 dB	<i>Suppression du bruit</i>
Trace => A : update = on ; view = off	<i>Signal à l'entrée du réseau</i>
B: update = off; view = off	<i>Signal à travers le réseau</i>
C : update = on ; view = on ; C= A-B	<i>Signal à la sortie du réseau</i>
Amplitude => scale/div = 5 dB	<i>Définition de l'échelle en ordonnée</i>

Une fois la configuration effectuée, il convient de nettoyer les connecteurs de fibres optiques pour ne pas avoir de déformations ni de parasites sur le signal. Pour la configuration de l'analyseur de spectre, il faut le connecter en direct à la source lumineuse. La configuration de l'analyseur de spectre Agilent 86142B, est détaillée au Tableau 12.

Ensuite, une première source de courant (BK Précision 9201) chauffe un module Peltier et la seconde source de courant refroidit le deuxième Peltier. Les différents espacements utilisés entre les modules Peltier sont : 0 ;5 ;20 et 40 millimètres pour les différentes catégories de mesures de températures. Les thermocouples, collés sur les modules Peltier

et connectés à Agilent 34970A (acquisition de données), permettent de mesurer la température et donc de la contrôler à partir des sources de courant. L'acquisition des données pour traitement se fait grâce au logiciel Agilent N1031A BenchLink Lightwave. Le Tableau 2 détaille les différentes étapes.

Tableau 13: Acquisition des données

Trace Data => New <i>Quelques secondes pour le transfert puis ouverture d'une fenêtre</i>
Cocher Trace C, OK <i>Acquisition de la trace C puis affichage du spectre dans une fenêtre</i>
Clic droit : Copy data=> Trace C <i>Copie des données et coller sans Excel</i>

Le traitement des données est réalisé avec Excel, pour cela il suffit de coller les données copiées précédemment dans Excel.

En premier lieu, il faut vérifier la symétrie des données récupérées lors des mesures aux températures des extrémités du gradient, illustrées au Tableau 14.

Tableau 14: Mesures aux températures des extrémités du gradient

		T1 (°C)	T2 (°C)	ΔT (°C)
Mesures	1	45	5	-40
	2	25	25	0
	3	5	45	40

Une fois que la superposition des pics de résonance est centrée à la même longueur d'onde de couplage λ_c , cela correspond à une égalité des valeurs des températures moyennes et donc une disposition symétrique du LPG. En cas de non-symétrie, il faut déplacer délicatement le réseau LPG de façon horizontale jusqu'à obtenir des courbes bien centrées. Une fois le centrage effectué, les séries de mesures sont prises.

La série de mesure du tableau 3 met en évidence la différence de températures. On observe pour cette série de mesure un décalage horizontal de la longueur d'onde de couplage.

Tableau 15: Tableau de mesures pour $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$

		T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{moy} ($^{\circ}\text{C}$)
Mesures	1	5	5	0	5
	2	10	10	0	10
	3	15	15	0	15
	4	20	20	0	20
	5	25	25	0	25
	6	30	30	0	30
	7	35	35	0	35
	8	40	40	0	40
	9	45	45	0	45

Réseau avec une résonance

En ce qui concerne le traitement des données mesurées, au fur et à mesure de l'acquisition des données, nous les classons dans le Tableau 4 qui permettra l'exploitation des résultats.

Tableau 4 : Tableau de classement des données

DT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	} 1
T average	5	10	15	20	25	30	35	40	45		
λ_c (nm)	1525.8	1526.1	1526.3	1526.5	1526.7	1526.9	1527.1	1527.4	1527.5	} 2	
I min (dB)	-23.2104	-23.1352	-23.2131	-23.1821	-23.0204	-23.0751	-22.9859	-22.9006	-22.9275		} 3
	5(5)	10(10)	15(15)	20(20)	25(25)	30(30)	35(35)	40(40)	45(45)	} 4	
1500	-0.72123	-0.73374	-0.74374	-0.75632	-0.77058	-0.78415	-0.80681	-0.8281	-0.84315		} 5
1500.1	-0.71386	-0.7246	-0.73536	-0.74525	-0.75931	-0.77179	-0.79339	-0.81602	-0.83104		
1500.2	-0.70577	-0.71389	-0.72132	-0.73516	-0.74565	-0.75814	-0.78267	-0.80663	-0.81965		
1500.3	-0.69569	-0.70529	-0.7149	-0.72296	-0.73665	-0.75039	-0.76984	-0.79276	-0.8065		
...		
1599.7	-0.63313	-0.61455	-0.62587	-0.62511	-0.59006	-0.61787	-0.61651	-0.61365	-0.60281		
1599.8	-0.66765	-0.64747	-0.66826	-0.64792	-0.63482	-0.65128	-0.65373	-0.63178	-0.63619		
1599.9	-0.65728	-0.6528	-0.64694	-0.63847	-0.62326	-0.62172	-0.64124	-0.62617	-0.64679		
1600	-0.65283	-0.64659	-0.65314	-0.65517	-0.61968	-0.64409	-0.66409	-0.64393	-0.63973		

Dans la zone 1, DT (ou ΔT) indique la différence de température entre les modules Peltier, T_{moy} (T_{average}) indique la température moyenne. La zone 3 représente les intensités de couplage minimales voir Figure 2. Ces minimums de pics de résonance correspondent aux longueurs d'ondes centrales associées en zone 2. La zone 4 indique à quelle mesure correspondent les valeurs de la colonne. La zone 5, est la zone ou sont regroupées toutes les valeurs acquises durant les différentes mesures. Une fois ce tableau rempli, il faut tracer les courbes des pics de résonance en fonction des longueurs d'ondes.

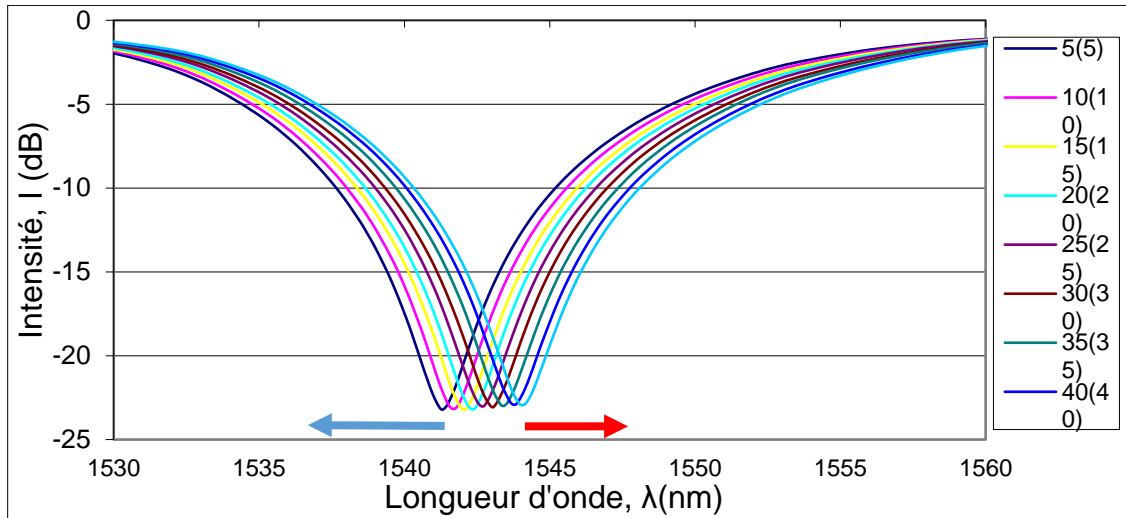


Figure 14 : Courbes d'évolution de pertes en fonction des longueurs d'ondes

Les résultats obtenus sont copiés dans un nouveau Tableau 5 contenant une nouvelle donnée : $\Delta\lambda_c$, variation de longueur d'onde centrale, correspondant à la différence entre la longueur d'onde centrale λ_c associée à la mesure sélectionnée et la longueur d'onde centrale λ_c de référence, correspondant celle répertoriée à la mesure 25(25). Puis, il faut tracer les courbes, à savoir : les intensités de couplage minimales (pertes minimales) en fonction des températures moyennes ainsi que les variations (écarts) de longueur d'onde en fonction des températures moyennes comme nous montre les Figure 3 et Figure 4.

Tableau 5 : Calcul des écarts de longueur d'onde centrale

$\Delta T=0$				
T_{moy}	I_{min} (dB)	λ_c (nm)	T_{moy}	$\Delta\lambda_c$ (nm)
45	-22.9275	1527.5	45	0.8
40	-22.9006	1527.4	40	0.7
35	-22.9859	1527.1	35	0.4
30	-23.0751	1526.9	30	0.2
25	-23.0204	1526.7	25	0
20	-23.1821	1526.5	20	-0.2
15	-23.2131	1526.3	15	-0.4
10	-23.1352	1526.1	10	-0.6
5	-23.2104	1525.8	5	-0.9

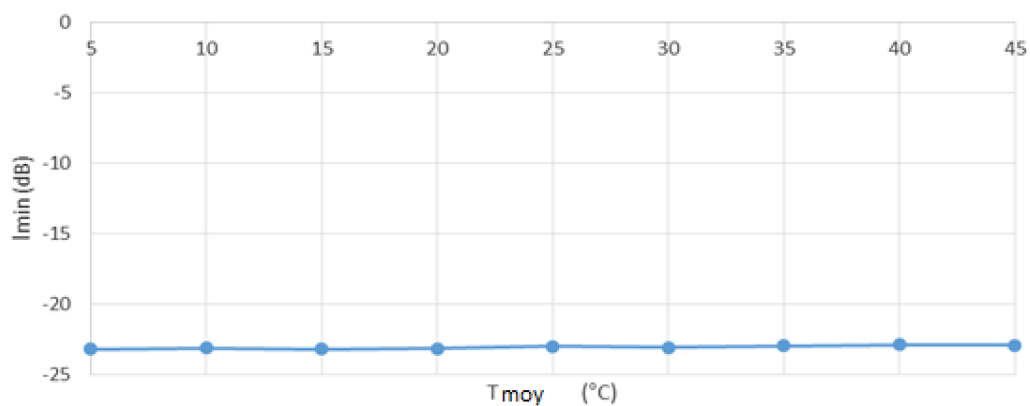


Figure 15 : Évolution des pics de résonances en fonction des températures moyennes

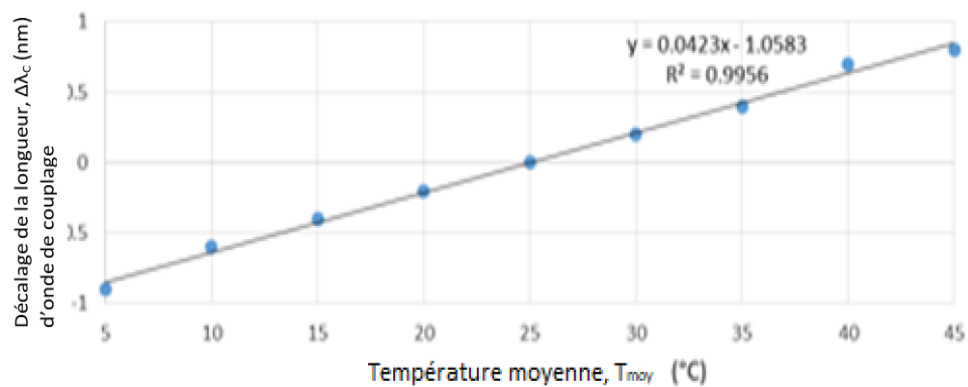


Figure 16 : Evolution des pics de pertes de transmission en fonction des températures moyennes

La Figure 3 montre que l'intensité de couplage minimale reste constante quel que soit la température moyenne imposée au réseau LPG. La Figure 4 présente la sensibilité $S_{T_{moy}}$ à la température moyenne. On peut en déduire que celle-ci est d'environ $S_{T_{moy}} = 0,0423 \text{ dB/}^\circ\text{C}$.

Plus d'une centaine de réseaux LPG ont été modélisés, fabriqués et testés. Nous vous présentons quelques résultats ci-dessous :

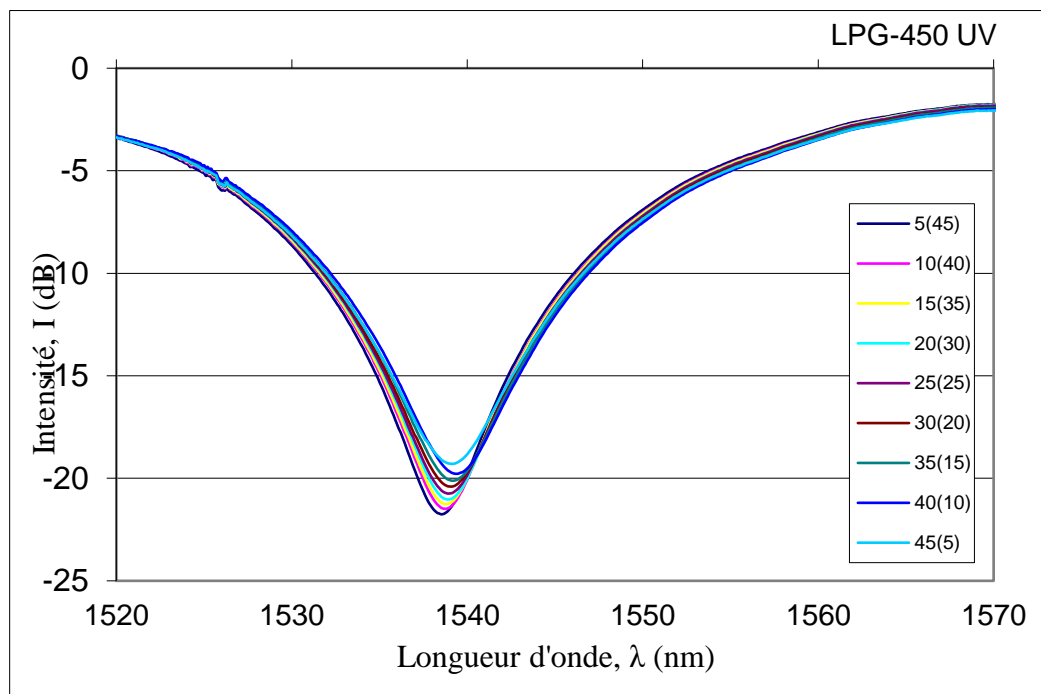


Figure 17 : Réponse spectrale du LPG aux changements de gradient de température

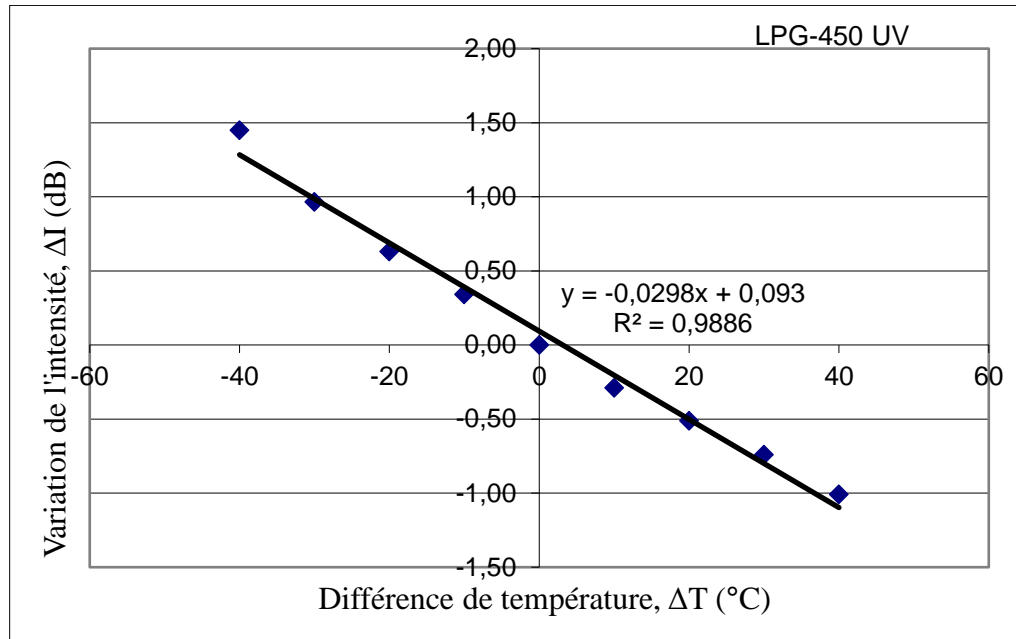


Figure 18 : Variation de l'intensité minimale en fonction des différences de températures

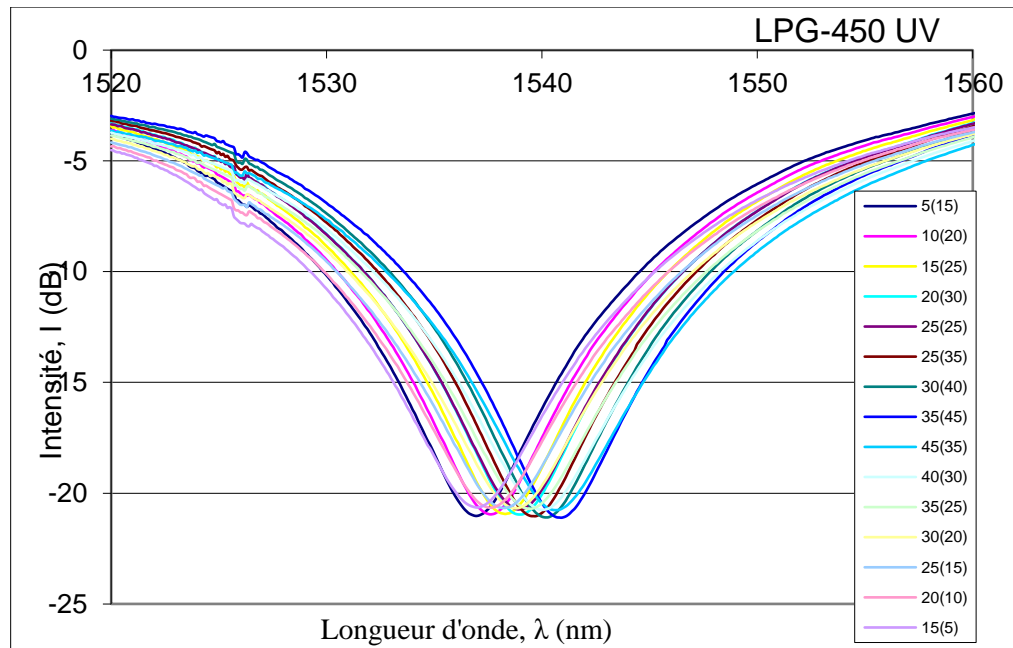


Figure 19 : Variation de l'intensité de couplage en fonction de la température moyenne

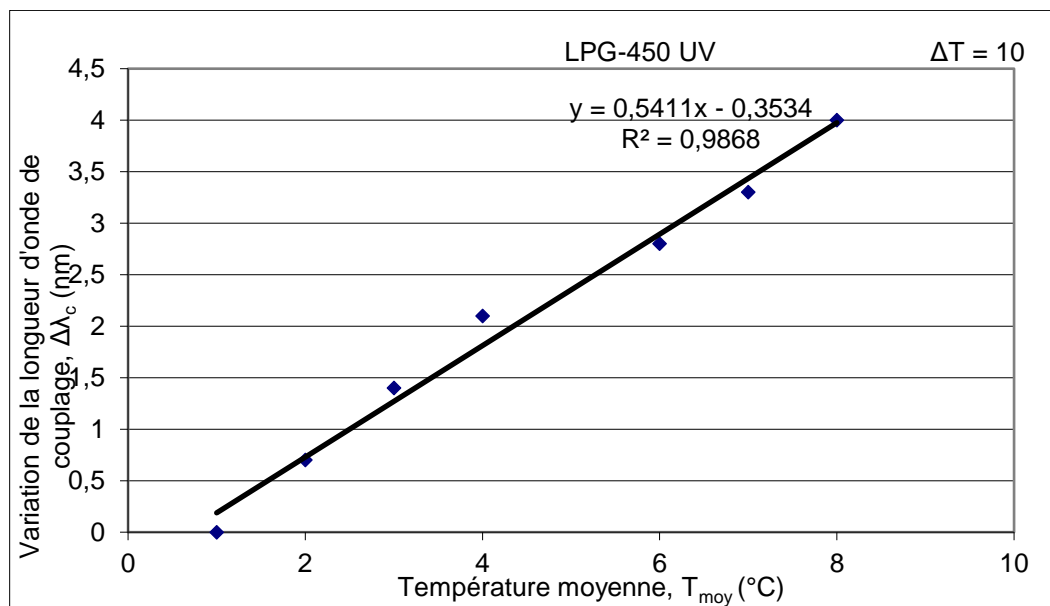


Figure 20 : Variation de la longueur d'onde de couplage en fonction de la température

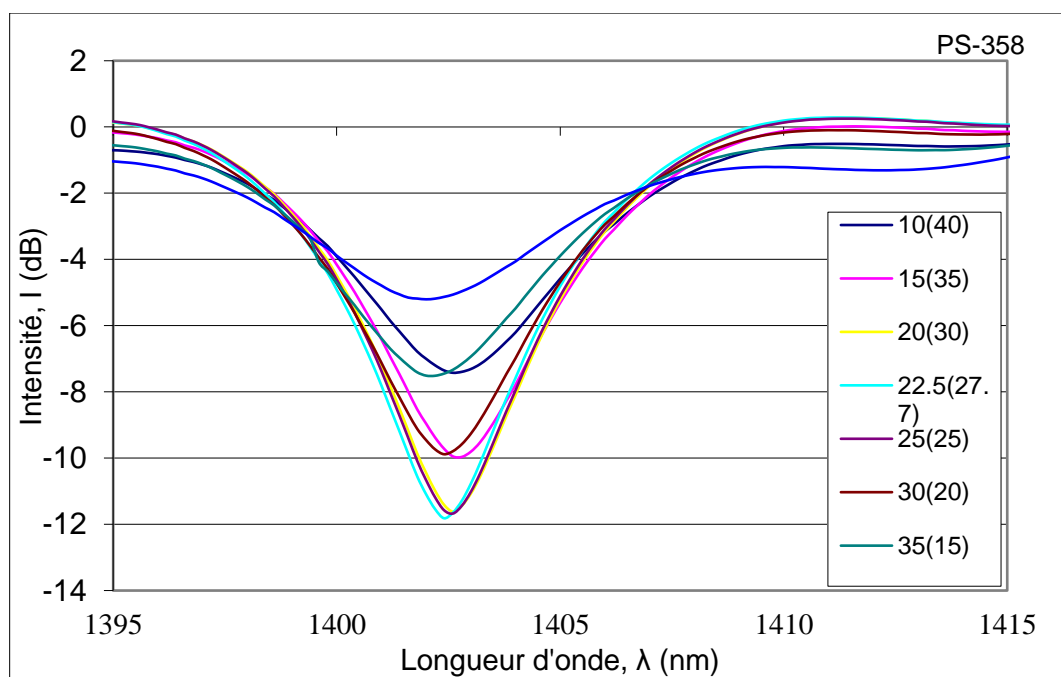


Figure 21 : Réponse spectrale du LPG aux changements de gradient de température

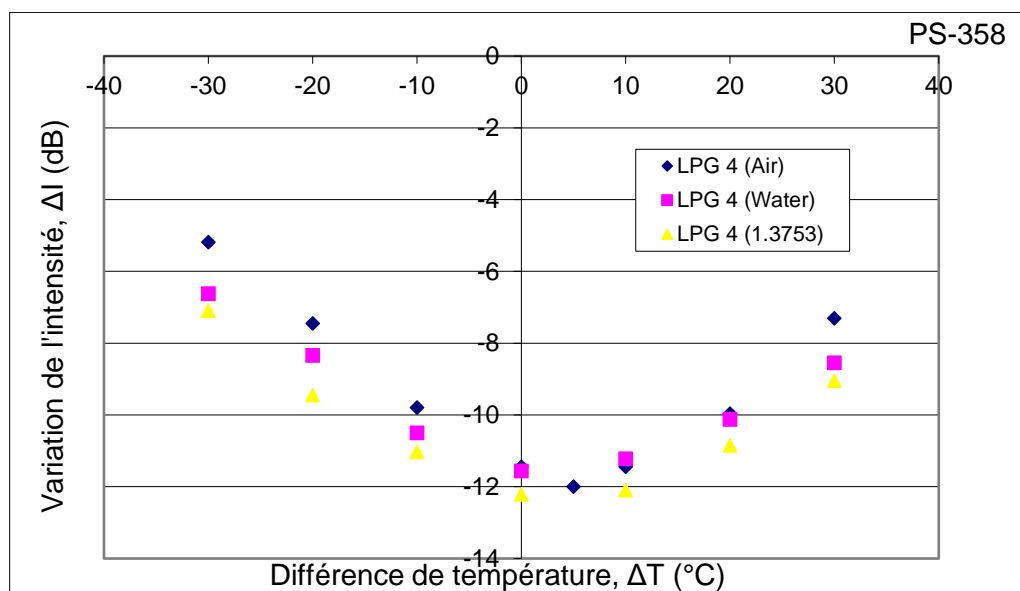


Figure 22 : Variation de l'intensité minimale en fonction des différences de températures

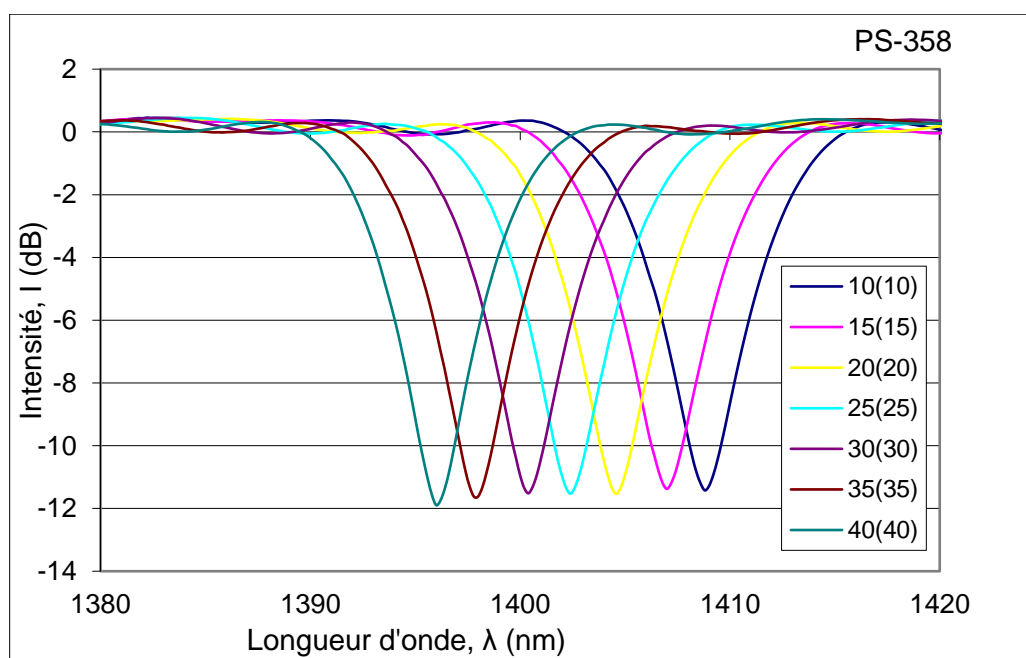


Figure 23 : Variation de l'intensité de couplage en fonction de la température moyenne

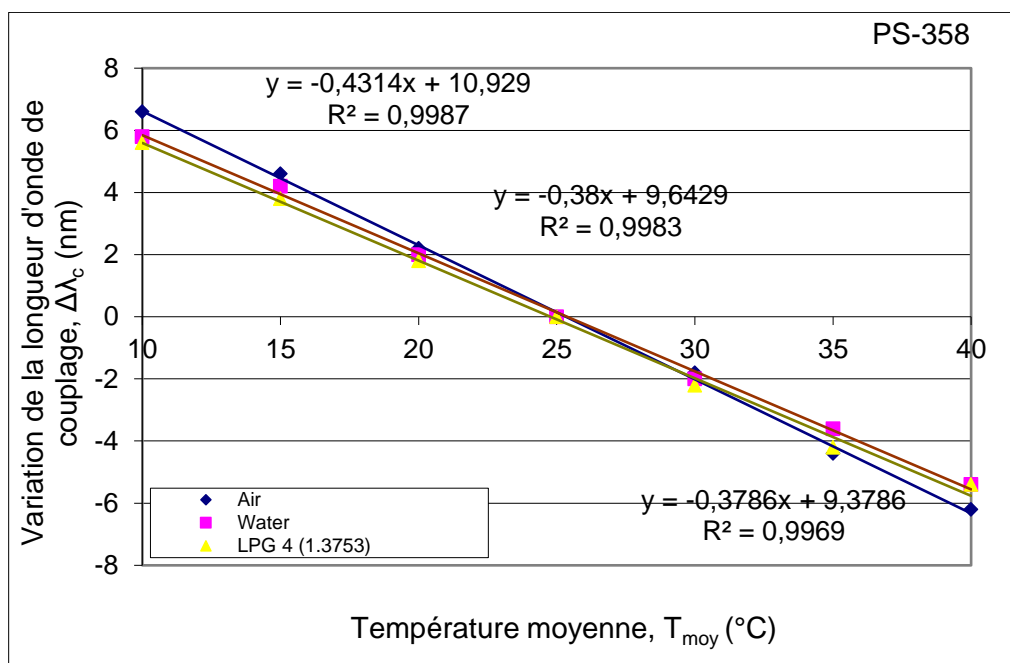


Figure 24 : Variation de la longueur d'onde de couplage en fonction de la température

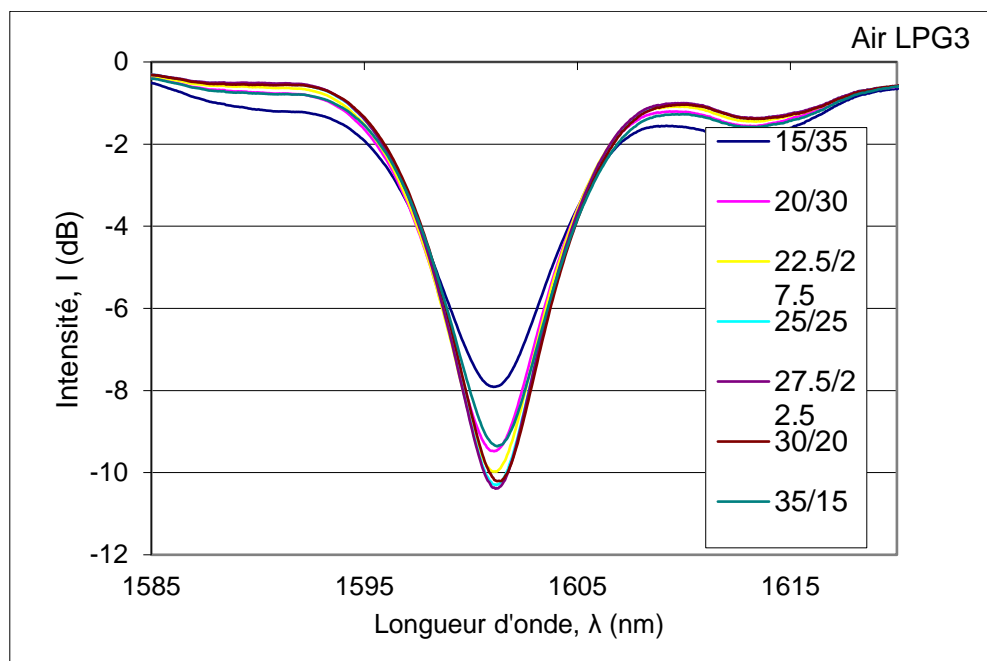


Figure 25 : Réponse spectrale du LPG aux changements de gradient de température

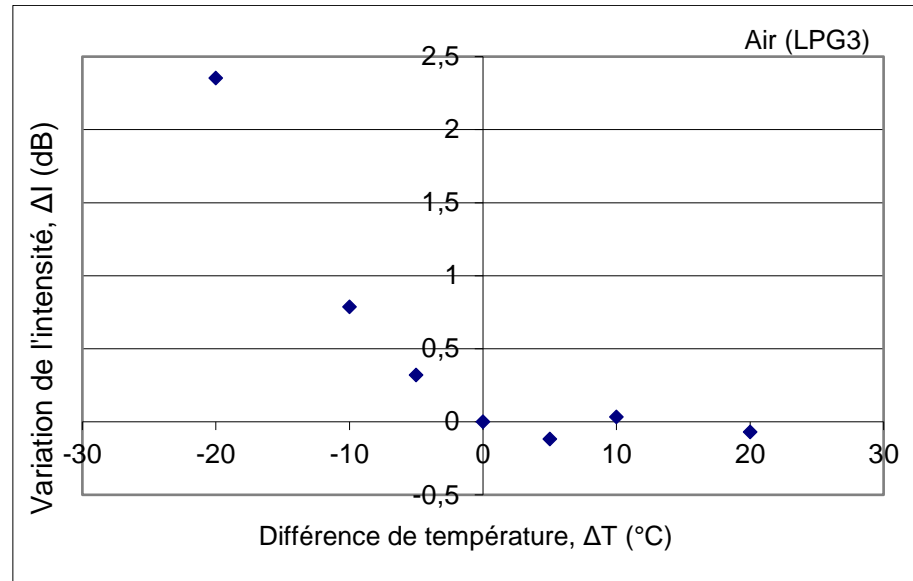


Figure 18 : Variation de l'intensité minimale en fonction des différences de températures

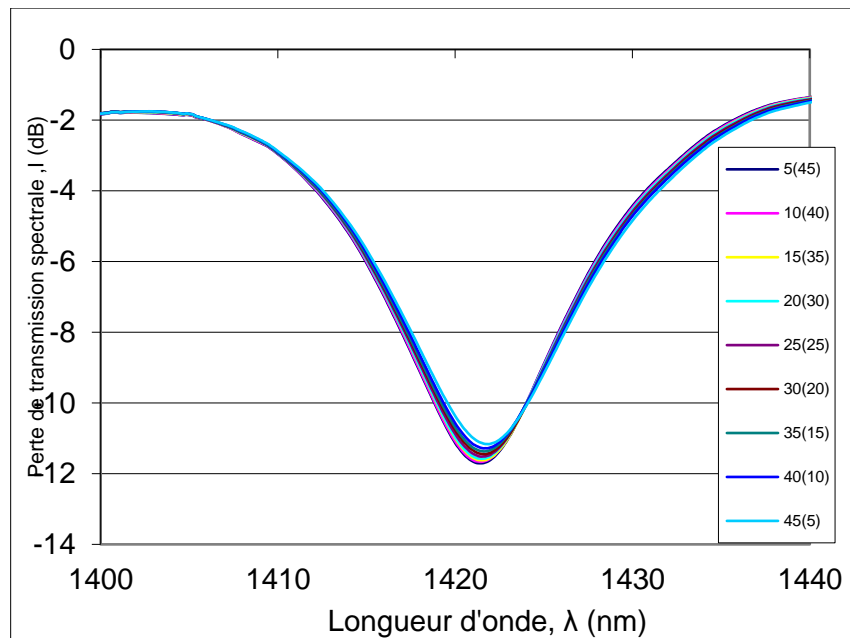


Figure 26 : Évolutions des pics de résonance avec la variation du ΔT_{PS259}

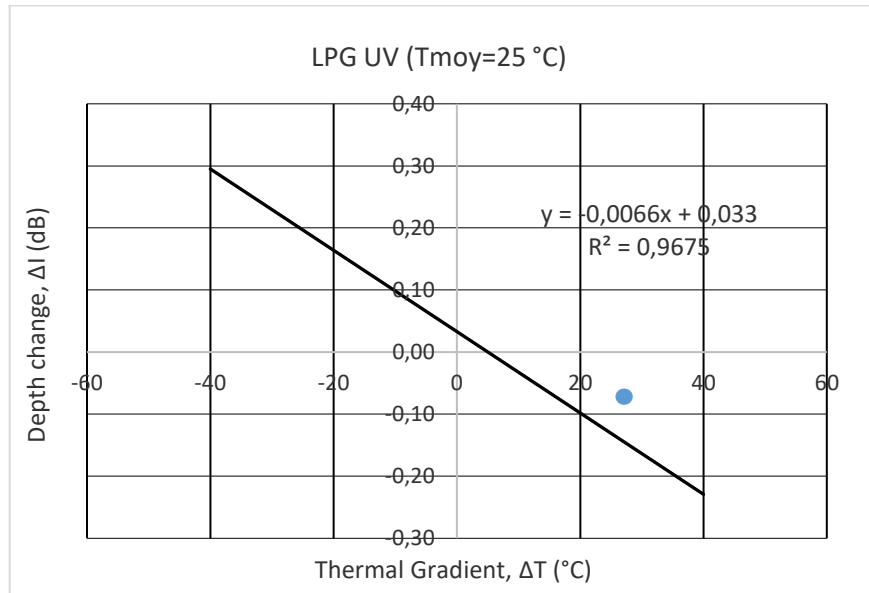


Figure 27 : Évolution du pic des pertes de transmission avec T_{moy_PS259}

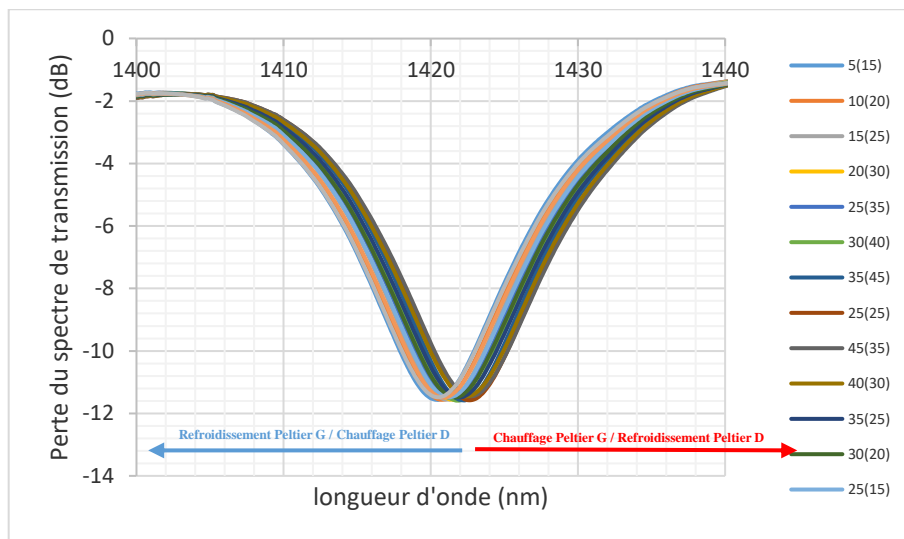


Figure 28 : Variation de l'intensité de couplage en fonction de la température moyenne

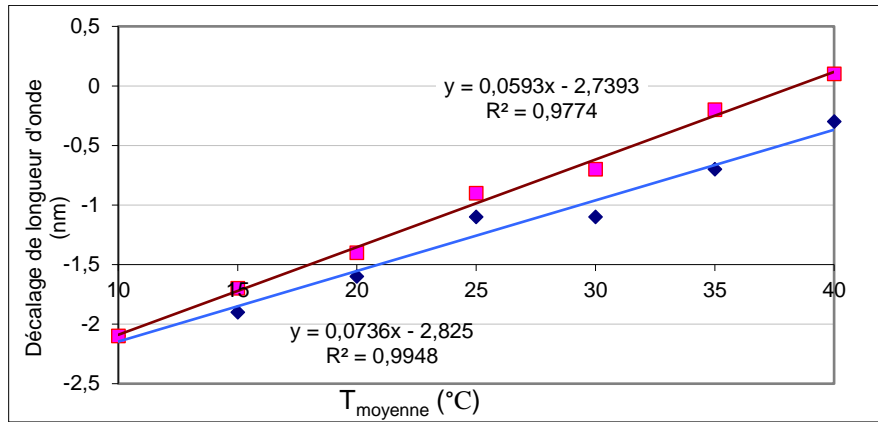


Figure 29 : Variation de la longueur d'onde de couplage en fonction de la température

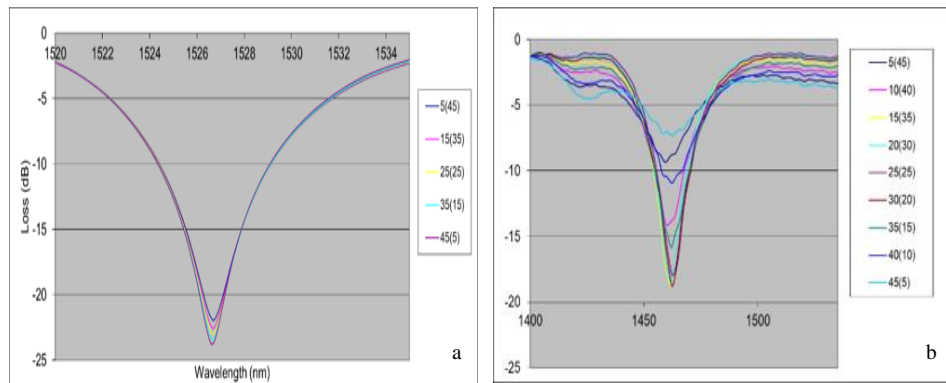


Figure 30 : Evolution des pics de résonance en fonction des différences de températures
 a) LPG FTSFM b) LPG 190.70_258

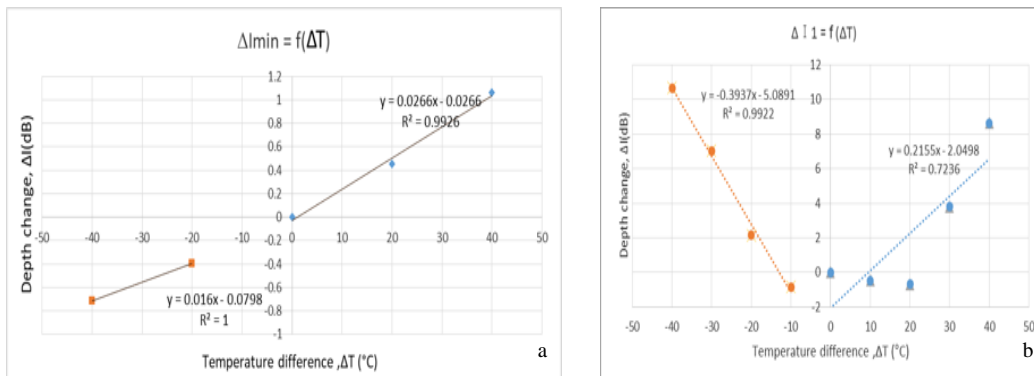


Figure 31 : Variations de profondeur des pics de résonance en fonction des différences de température a) LPG FTSM b) LPG 190.70_258

Les graphiques ci-dessous présentent le réel travail qui est fait pendant et après l'acquisition des données.

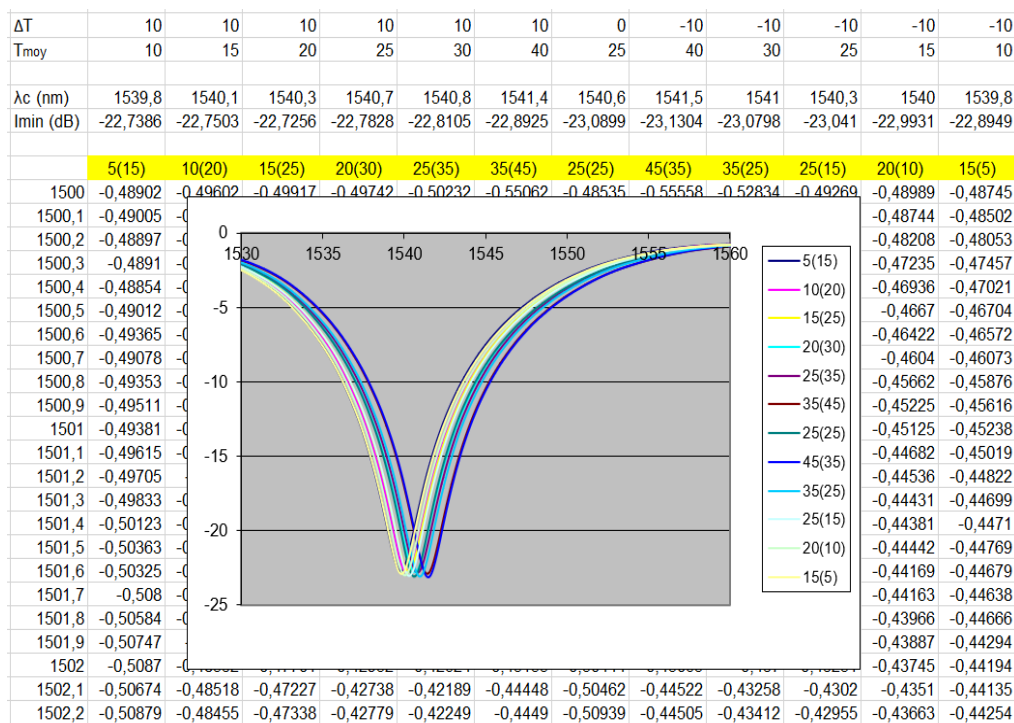


Figure 32 : Variation de l'intensité de couplage en fonction de la température moyenne_PS352

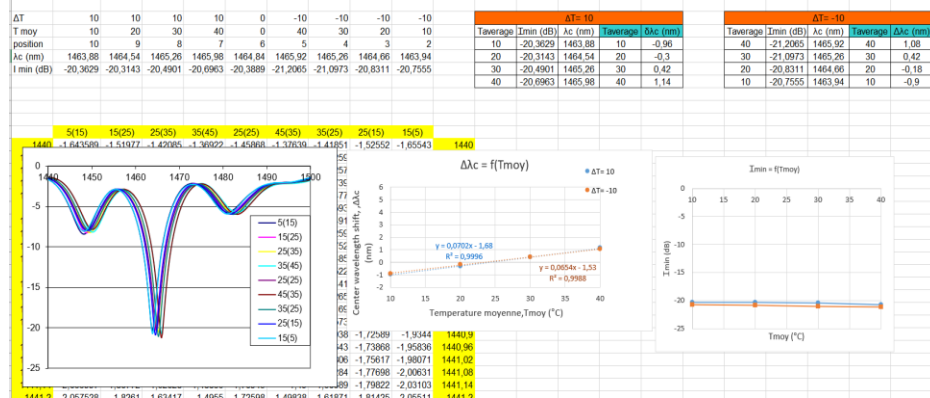


Figure 35 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta\lambda = f(T_{moy})$ _SMF28 pour $\Delta T=10^\circ C$ et $\Delta x=1mm$

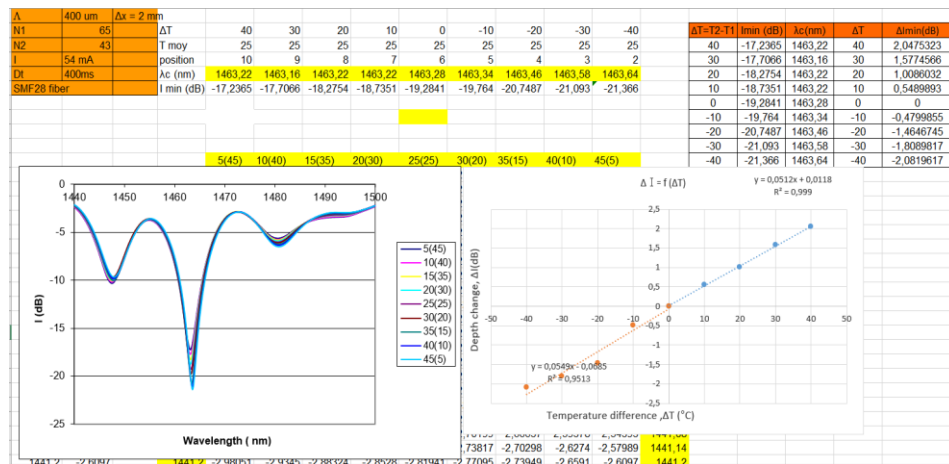


Figure 36 : Courbes $I = f(\Delta T)$ et $\Delta I = f(\Delta T)$ _SMF28 pour $T_{moy}=25^\circ C$ et $\Delta x=5mm$

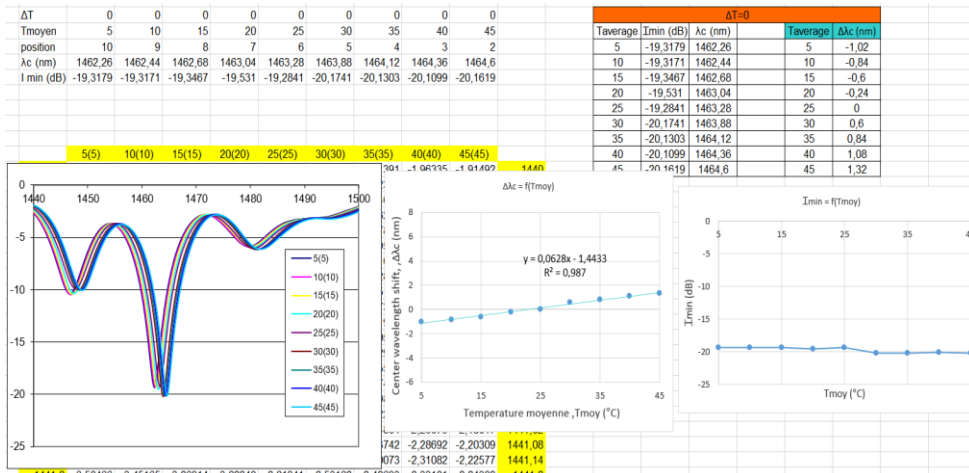


Figure 37 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta\lambda = f(T_{moy})$ _SMF28 pour $\Delta T=0^\circ C$ et $\Delta x=5mm$

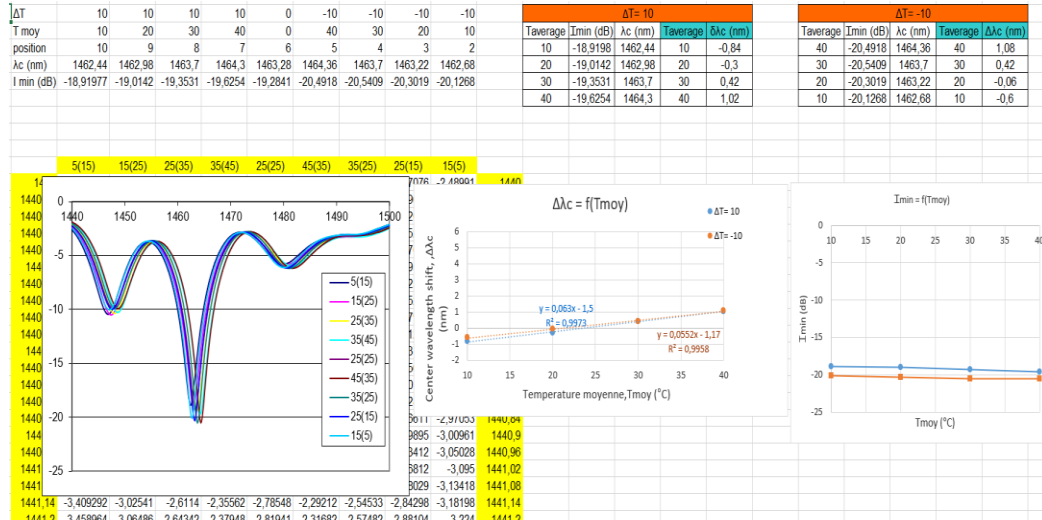


Figure 38 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta\lambda = f(T_{moy})$ _SMF28 pour $\Delta T=10^\circ C$ et $\Delta x=5mm$

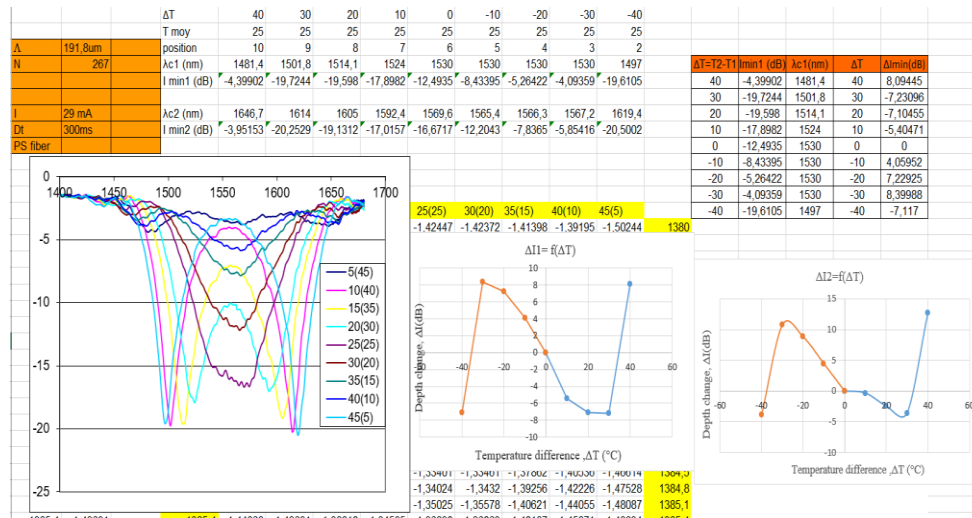


Figure 39 : Courbes $I = f(\Delta T)$ et $\Delta I = f(\Delta T)$ _PS pour $T_{moy}=25^\circ C$ et $\Delta x=1mm$

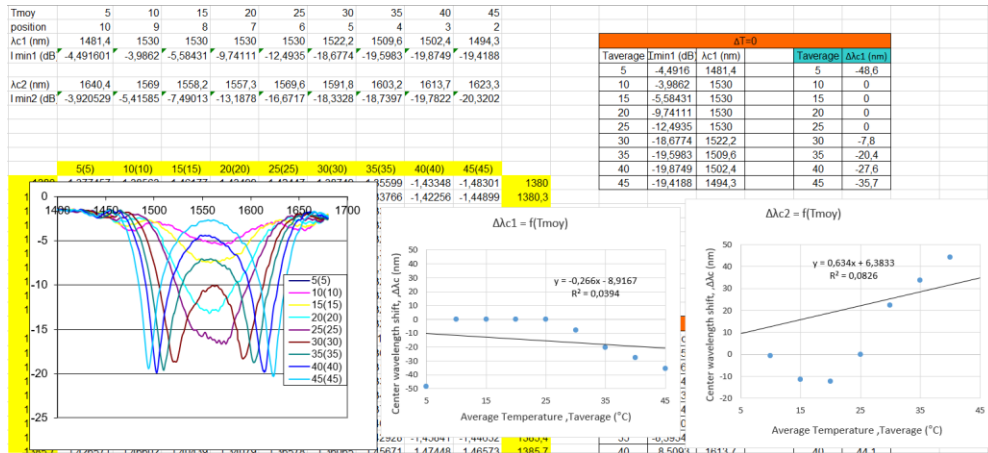


Figure 40 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta\lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T=0^\circ C$ et $\Delta x=1mm$

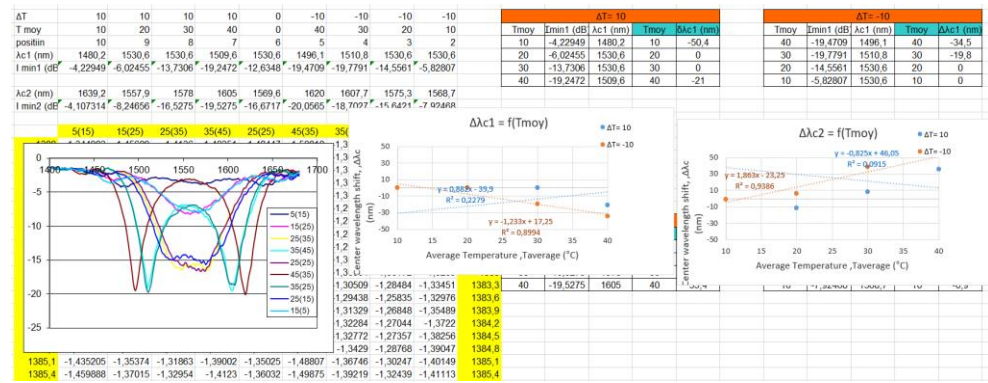


Figure 41 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta\lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T=10^\circ C$ et $\Delta x=1mm$

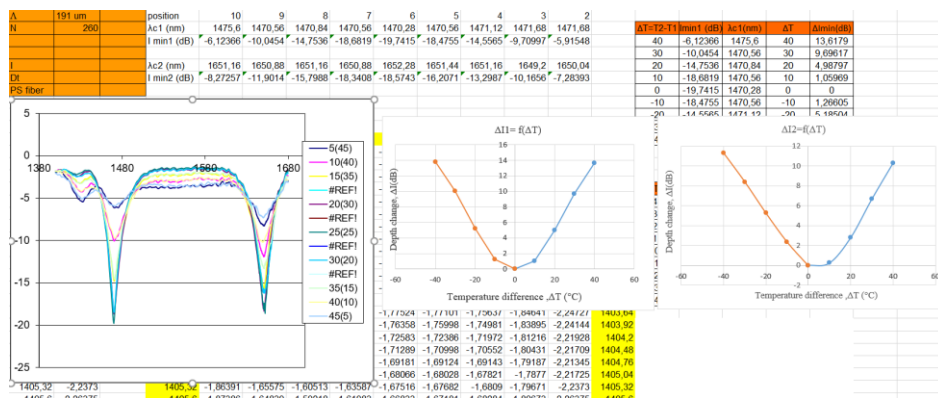


Figure 42 : Courbes $I = f(\Delta T)$ et $\Delta I = f(\Delta T)$ _PS pour $T_{moy} = 25^\circ C$ et $\Delta x = 1mm$

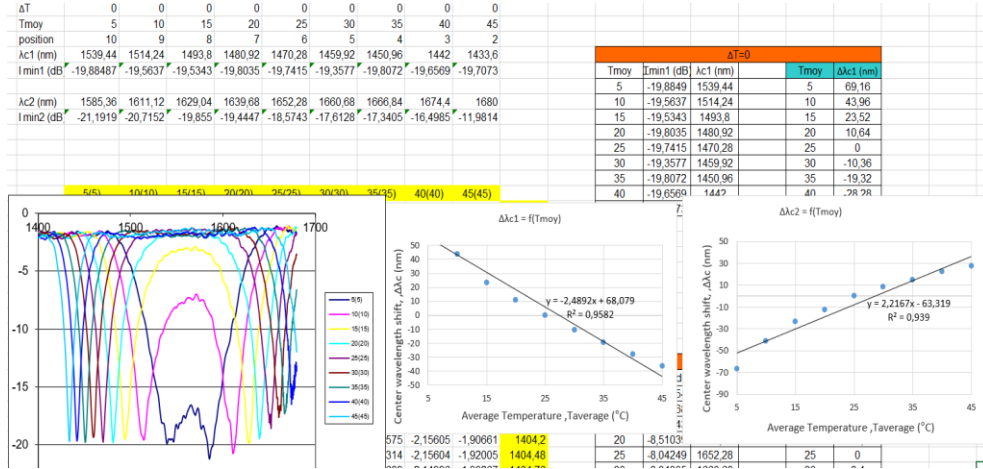


Figure 43 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta \lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T = 0^\circ C$ et $\Delta x = 2mm$

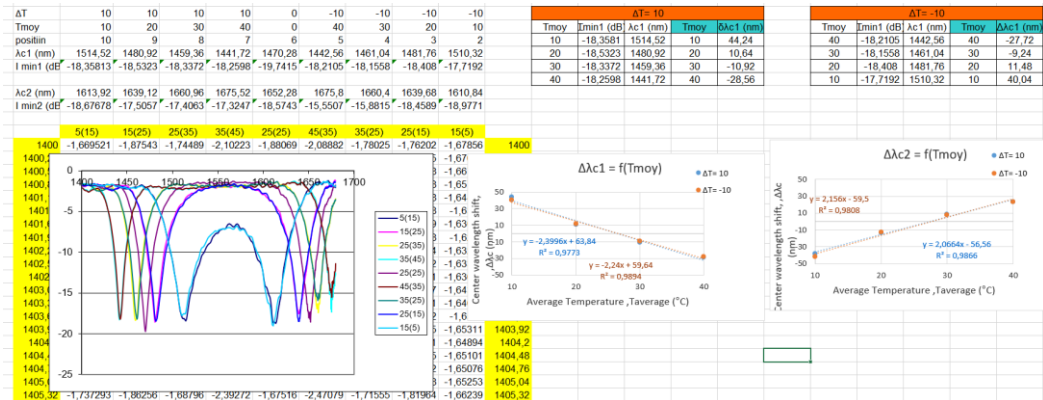


Figure 44 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta \lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T = 10^\circ C$ et $\Delta x = 2mm$

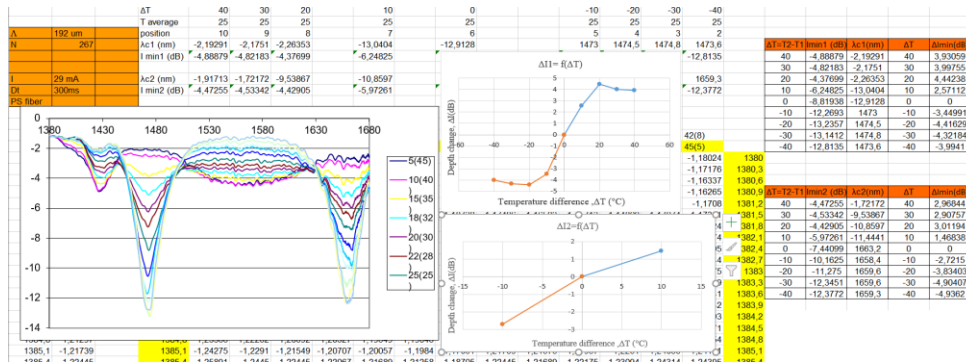


Figure 45 : Courbes $I = f(\Delta T)$ et $\Delta I = f(\Delta T)$ _PS pour $T_{moy}=25^{\circ}C$ et $\Delta x=1mm$

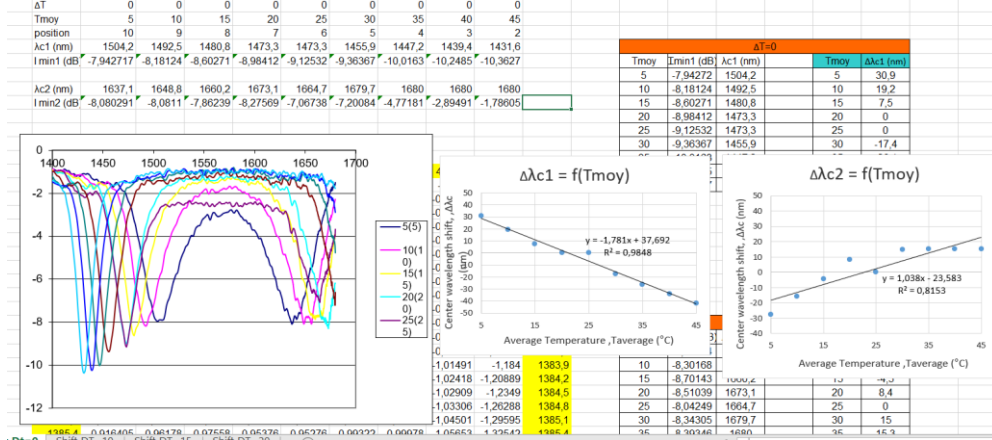


Figure 46 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta \lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T=0^{\circ}C$ et $\Delta x=1mm$

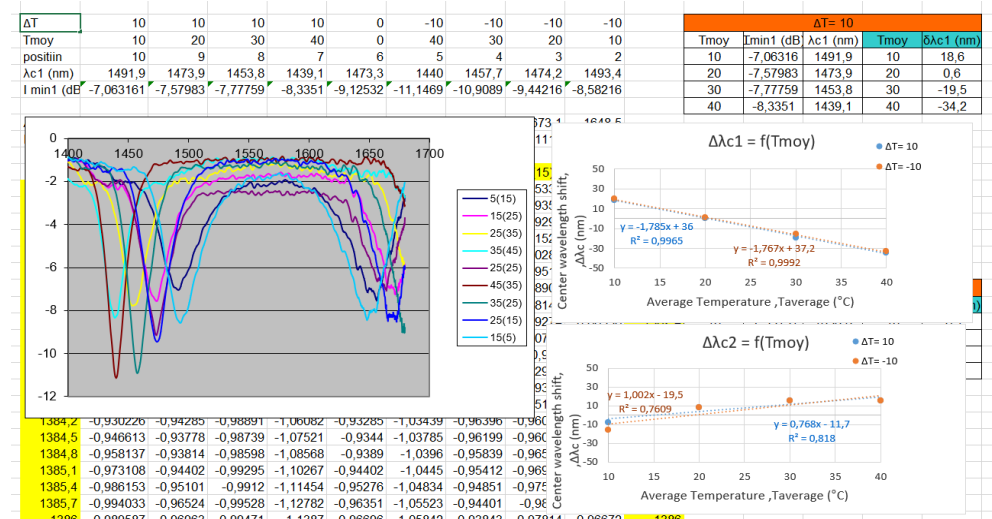


Figure 47 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta \lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T=10^{\circ}C$ et $\Delta x=1mm$

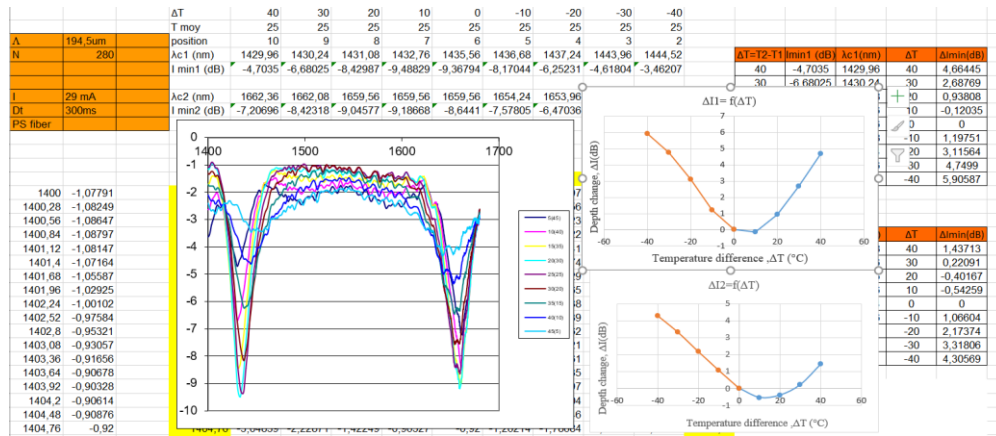


Figure 48 : Courbes $I = f(\Delta T)$ et $\Delta I = f(\Delta T)$ _PS280

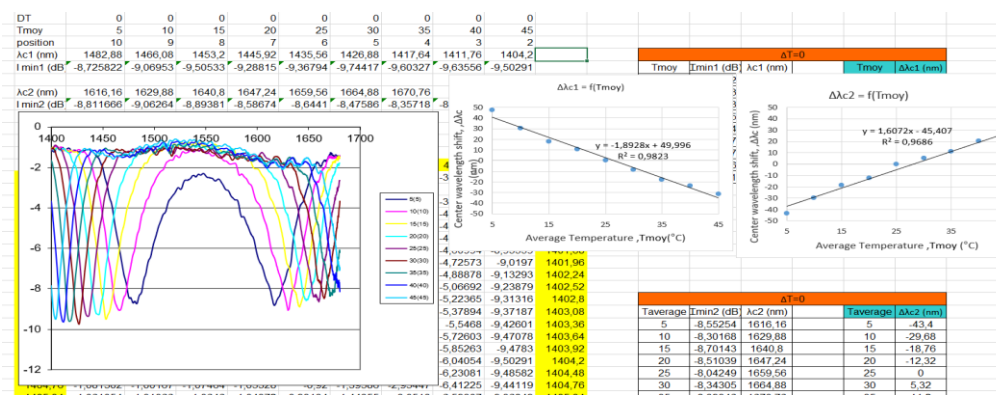


Figure 49 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta \lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T=0^\circ C$ et $\Delta x=1mm$

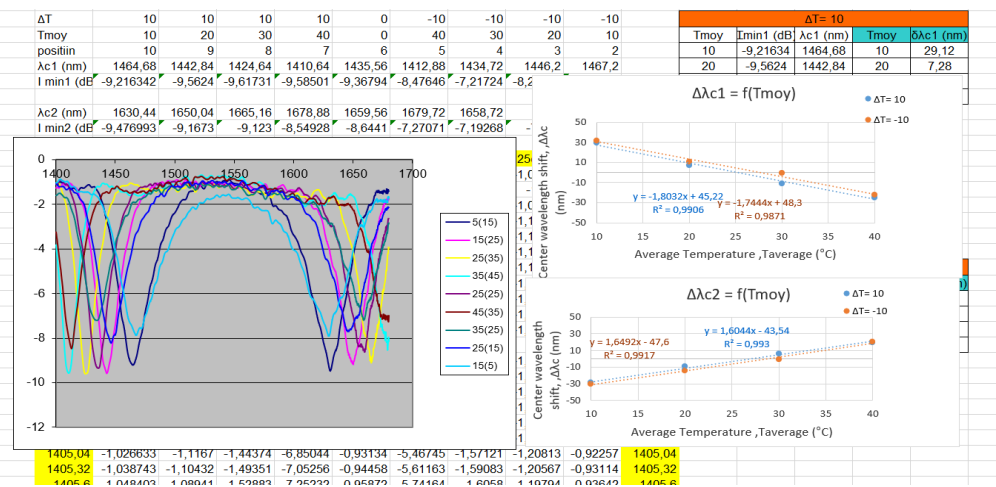


Figure 50 : Courbes $I = f(T_{moy})$ et $\Delta\lambda = f(T_{moy})$ _PS pour $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ et $\Delta x = 1\text{mm}$

➤ $N_1 = N_2$

La différence d'indices des deux milieux $dn = 0$

Air-Air : $N_1 = N_2 = 61$; $L_0 = 21\text{ mm}$; $\Lambda = 250\ \mu\text{m}$

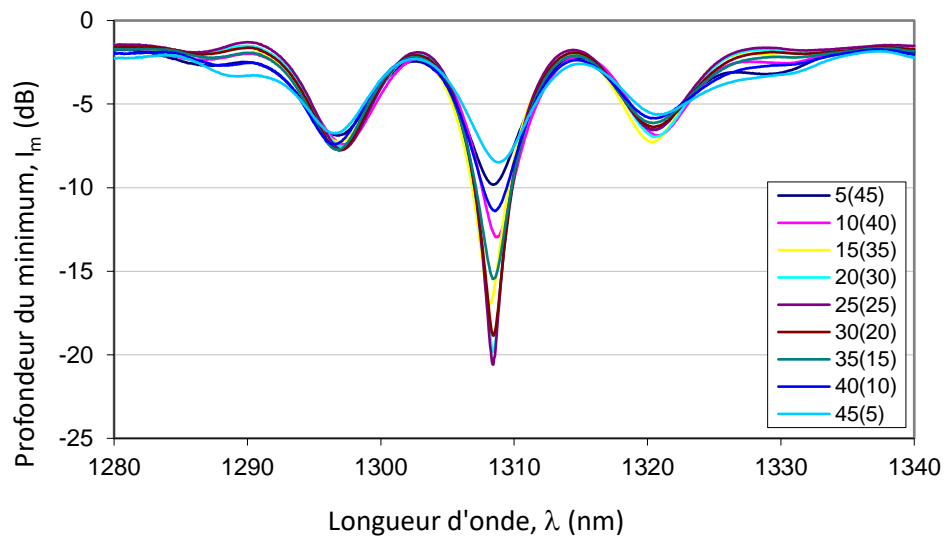


Figure 51 : Superposition des réponses spectrales obtenues expérimentalement pour les différences de température variables pour deux milieux Air - Air lorsque $N_1 = N_2$

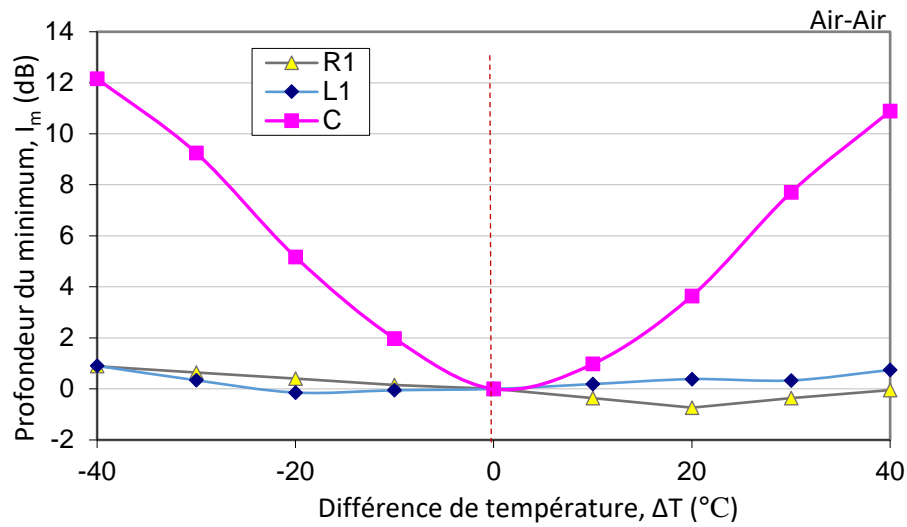


Figure 52 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur de différence de température pour deux milieux Air – Air lorsque $N_1 = N_2$

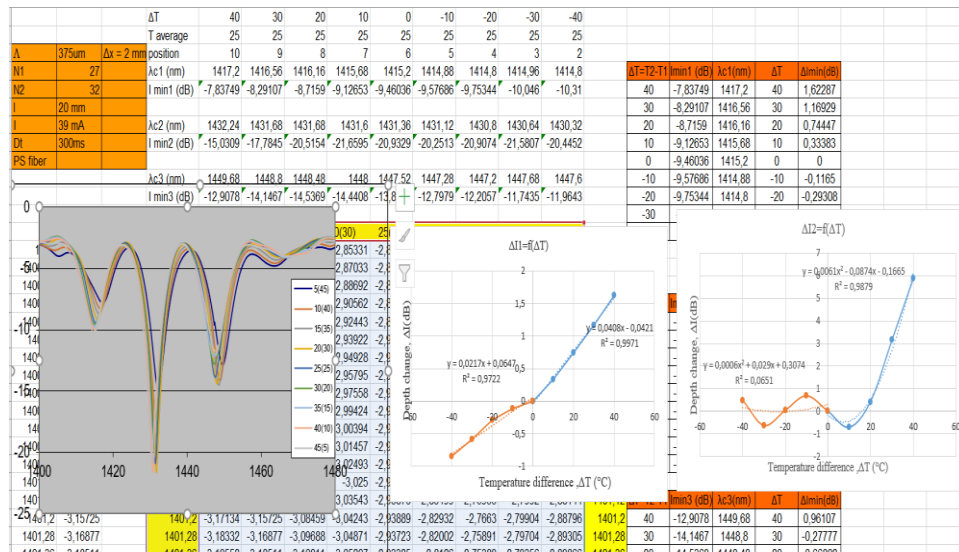


Figure 53 : Courbes $I = f(\Delta T)$ et $\Delta I = f(\Delta T)$ _PS375 pour $T_{moy} = 25^\circ C$ et $\Delta x = 2mm$

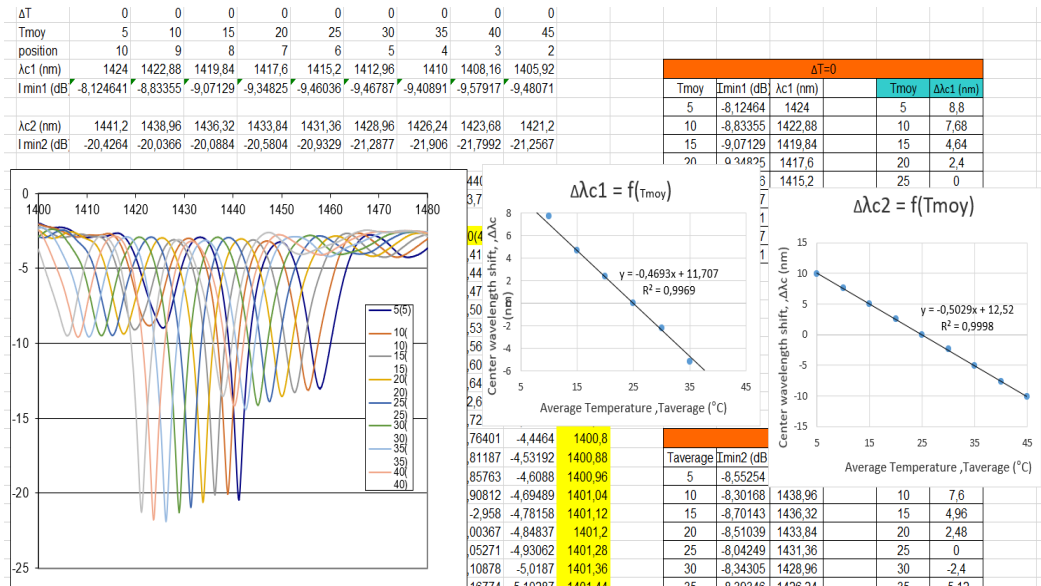


Figure 54 : Courbes $I = f(T moy)$ et $\Delta \lambda = f(T moy)$ _PS pour $\Delta T=0^\circ C$ et $\Delta x=2mm$

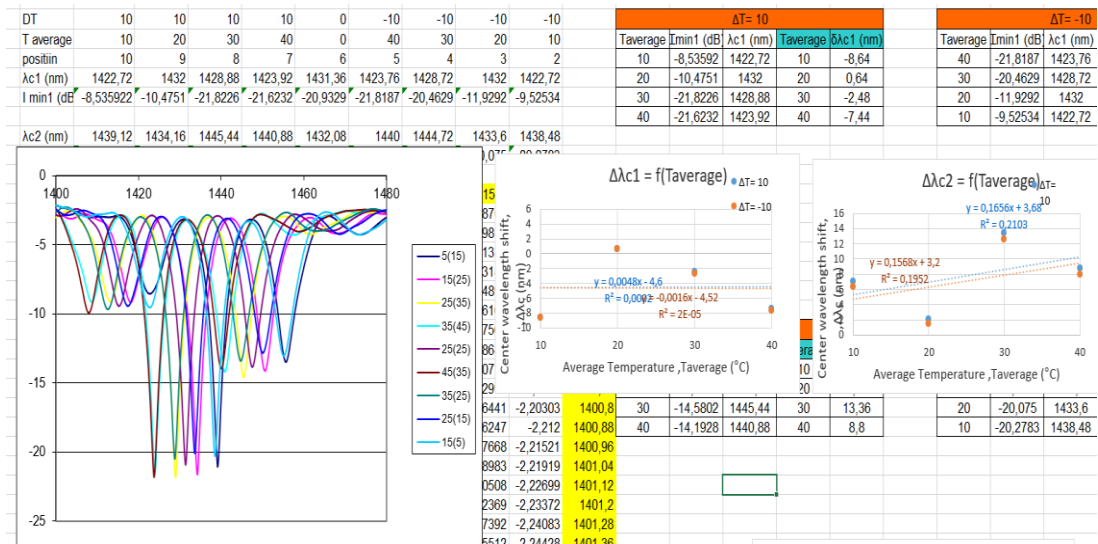


Figure 55 : Courbes $I = f(T moy)$ et $\Delta \lambda = f(T moy)$ _PS pour $\Delta T=10^\circ C$ et $\Delta x=2mm$

La différence d'indices des deux milieux n_2 est supérieur à 0

Air-Eau : $N_1 = N_2 = 61$; $L_0 = 21$ mm ; $\Lambda = 250$ μm

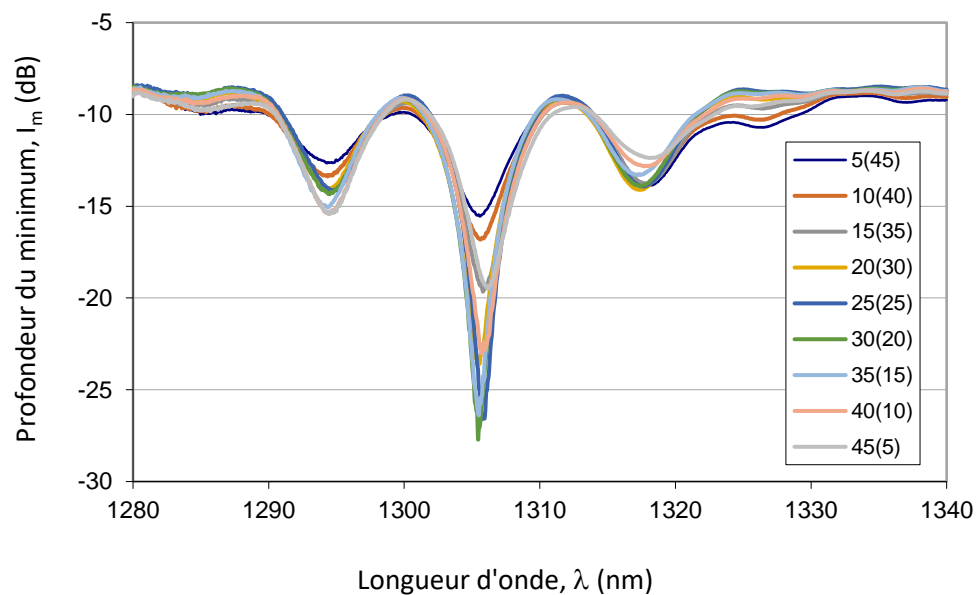


Figure 56 : Superposition des réponses spectrales obtenues expérimentalement pour les différences de température variables pour deux milieux Air – Eau lorsque $N_1 = N_2$

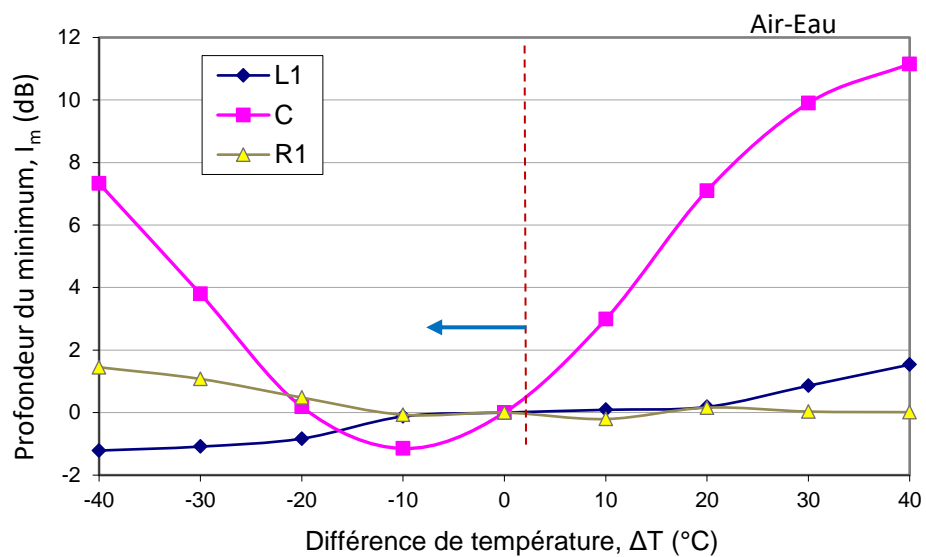


Figure 57 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur de différence de température pour deux milieux Air – Eau lorsque $N_1 = N_2$

Eau-Air : $N_1 = N_2 = 61$; $L_0 = 21$ mm ; $\Lambda = 250$ μ m

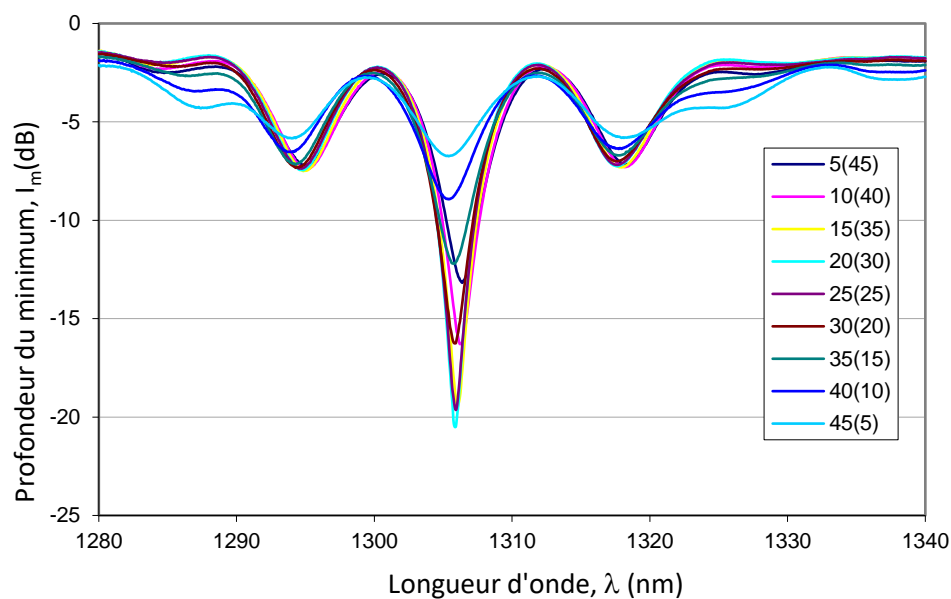


Figure 58 : Superposition des réponses spectrales obtenues expérimentalement pour les différences de température variables pour deux milieux Eau – Air lorsque $N_1 = N_2$

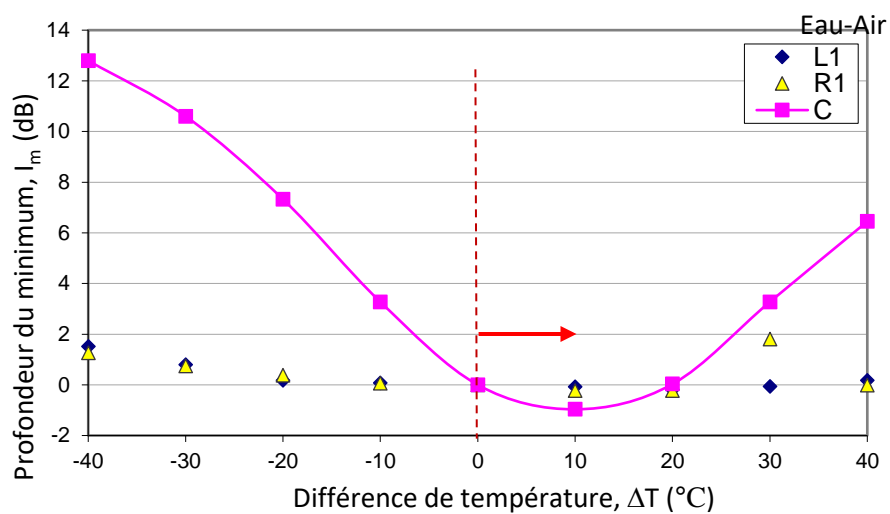


Figure 59 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur de différence de température pour deux milieux Eau – Air lorsque $N_1 = N_2$

Deux réseaux en cascades avec :

- $N_1 \neq N_2$ Air-Air : $N_1 = 27$ et $N_2 = 32$; $L_0 = 20$ mm ; $\Lambda = 375$ μ m

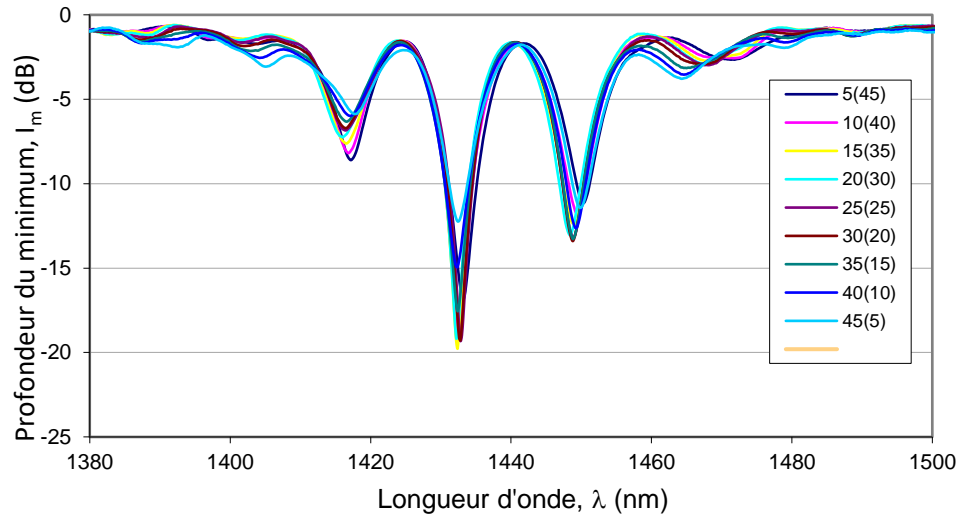


Figure 60 : Superposition des réponses spectrales obtenues expérimentalement pour les différences de température variables pour deux milieux Air – Air lorsque $N_1 \neq N_2$

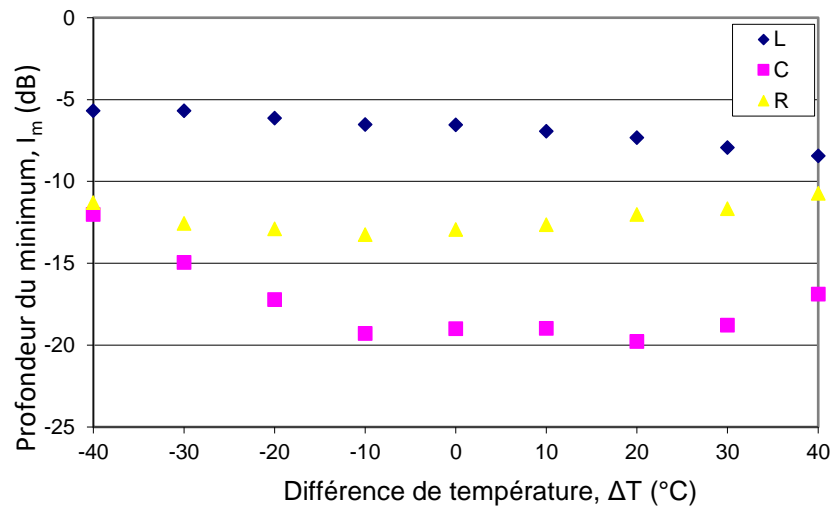


Figure 61 : Réponse de trois minimums (à gauche, au centre et à droite) pour chaque valeur de différence de température pour deux milieux Air – Air lorsque $N_1 \neq N_2$

Tableau 6 : Récapitulatif de résultats les réseaux testés

		Fluide	ΔT (°C)		Sensibilité Moyenne	$T_{average}$ (°C)		Sensibilité Moyenne
			$d(\Delta I)/d(\Delta T)$ en dB/°C			$d\lambda_c/dT$ en nm/°C		
			0 °C to -40 °C	0 °C to 40 °C		$\Delta T = -20$ °C	$\Delta T = 20$ °C	
LPG 190.75_270	Spectre N°1	AIR	-0.353	0.0695	0.21125	-3.36	-3.564	3.462
		WATER	-0.2557	-0.0186	0.13715	-1.122	-1.248	1.185
	Spectre N°2	AIR	-0.3525	0.023	0.18775	3.264	4.002	3.633
		WATER	-0.216	0.094	0.155	0.99	1.122	1.056
LPG_190.70_258	Spectre N°1	AIR	-0.3937	0.2155	0.3046	-1.8312	-1.8088	1.82
		WATER	-0.1346	0.0111	0.07285	-0.924	-0.864	0.894
	Spectre N°2	AIR	-0.2859	0.1759	0.2309	1.5512	1.5848	1.568
		WATER	Hors plage	Hors plage		Hors plage	Hors plage	
LPG_191.50_267	Spectre N°1	AIR	0.0089	0.0162	0.01255	-1.8312	-1.8088	1.82
		WATER	-0.0046	0.0062	0.0054	0	0.006	0.003
	Spectre N°2	AIR	0.0079	0.0139	0.0109	1.5512	1.5848	1.568
		WATER	-0.0138	-0.0067	0.01025	-0.186	-0.042	0.114
LPG_FTSMF	Spectre N°1	AIR	0.016	0.0266	0.0213	0.046	0.04	0.043
		WATER	0.0061	0.0192	0.01265	0.054	0.062	0.058
	Spectre N°2	AIR	Hors plage	Hors plage		Hors plage	Hors plage	
		WATER	Hors plage	Hors plage		Hors plage	Hors plage	
LPG_N_1	Spectre N°1	AIR	-0.234	0.222	0.228	-1.794	-1.43	1.612
		WATER	-0.1868	0.1447	0.16575	-0.858	-0.97	0.914
	Spectre N°2	AIR	-0.1896	0.159	0.1743	1.566	1.512	1.539
		WATER	Hors plage	Hors plage		Hors plage	Hors plage	
			Sensibilité au ΔT			Sensibilité a $T_{average}$		

4. ANNEXE D

Matériels pour les expériences

- Source lumineuse Agilent 83437A

La source lumineuse large bande présentée garantit une puissance de sortie stable jusqu'à 25dBm ainsi qu'une stabilité de puissance spectrale à $\pm 0,2\text{dB}$ pour une plage de longueur d'onde comprise entre 1200nm et 1650nm.

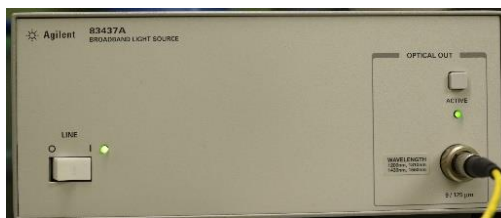


Figure 62 : Source lumineuse Agilent 83437A

- Analyseur de spectre optique Agilent 86142B

Cet analyseur de spectre optique a une large possibilité d'utilisation. Dans notre cas, il permet la visualisation de l'évolution des pertes de signal dans la fibre. Sa plage de scrutation de longueur d'onde est comprise entre 600 nm et 1700 nm avec une précision de reproductibilité du signal de $\pm 0,002$ nm.

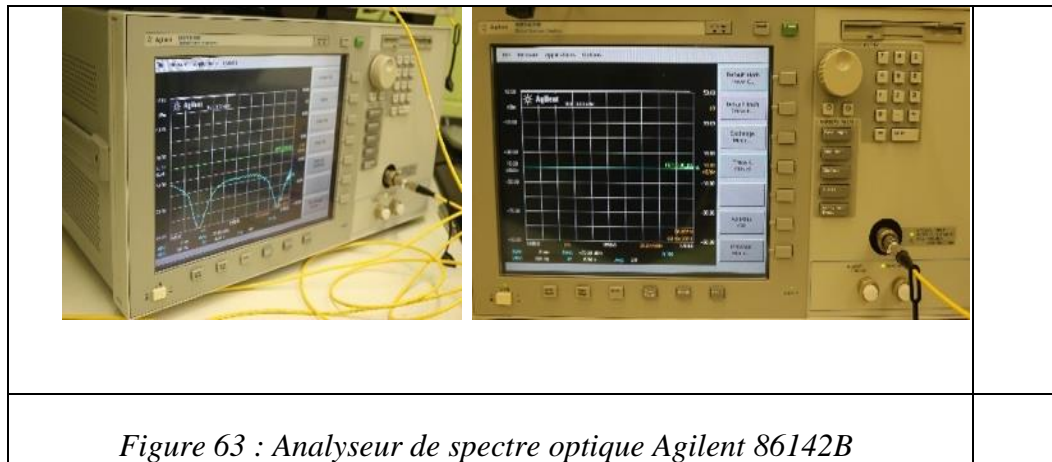


Figure 63 : Analyseur de spectre optique Agilent 86142B

- Source d'alimentations DC Keysight 6227B

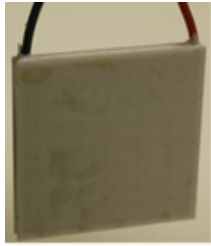
Elle fournit de façon contrôlée une tension et un courant avec une précision de 1mV et 100mA. Cette alimentation possède deux sorties indépendantes permettant de fournir une tension comprise entre 0V et 25V et un courant compris entre 0A et 2A. Elle permet de déterminer une puissance pour refroidir ou réchauffer la plaque thermique à la température souhaitée. Confère figure 8 et 9 pour le schéma expérimental.



Figure 64 : Source d'alimentations DC Keysight 6227B

- Modules Peltier TEC1 12706

Les modules Peltier sont des composants thermoélectriques qui convertissent le courant électrique en différence de température entre les deux faces. La variation de température du module est provoquée par la variation du courant qui le traverse. De plus, en inversant les polarités au niveau de l'alimentation électrique, il est possible de chauffer ou de refroidir le module.



CARACTERISTIQUES:

- Longueur = 40mm
- largeur = 40mm
- hauteur = 3,9mm
- Courant max = 6,1 A
- Tension max = 16,0 V
- Différence de température maximale entre les deux faces : 70°C

Figure 65 : Modules Peltier TEC1 12706

- Afficheur de température Agilent 34970A

Cet afficheur est aussi équipé d'un convertisseur analogique numérique qui convertit la tension du thermocouple en température. Puis cette température est affichée avec un retard de 2ms maximum. Grace au multiplexage, nous pouvons avoir accès aux différentes températures par l'intermédiaire d'un bouton dédié. Il enregistre les données transmises par les thermocouples connectés aux modules Peltier. Ses caractéristiques sont : Voltage : 100 ;120/220 ;240 Vca \pm 10% ; Fonctionnement : 45 - 66 Hz ; Dimension : 374 mm x 255 mm x 89 mm.

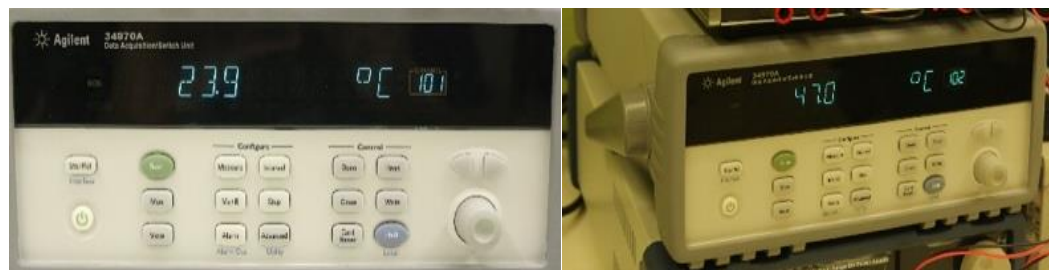


Figure 66 : Afficheur de température Agilent 34970A

- Thermocouples

Les thermocouples sont des couples thermoélectriques qui délivrent une tension qui varie en fonction de la température ce qui fait d'eux des capteurs de températures. Ceux qui sont présents dans notre montage et illustrés mesure 25mm de long, 19mm de large et 0,3mm d'épaisseur et ont des plages de mesures allant de -60°C à 175°C . La partie adhésive est collée au module Peltier.

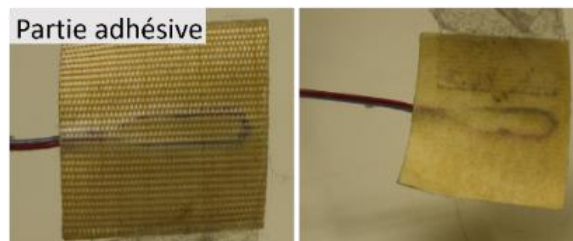


Figure 67 : Thermocouple

- Dispositif Laser

Le dispositif laser est composé de Tête de balayage de contour & de montage et de laser CO₂, qui est jumelée avec son alimentation. Tous les deux sont de marque *Synrad*. Ce dispositif permet la fabrication de réseau LPG dans la fibre.



Figure 68 : Dispositif Laser

- Prototype expérimental

Notre assemblage final intégrant la fibre optique dans le béton pour la mesure simultanée du gradient de température et de la température moyenne.



Figure 69 : Prototype expérimental

- Station de mesure gradient de température



Figure 70 : Station de mesure gradient de température