

Contribution à l'optimisation de la fibre optique pour l'implémentation au système de réseaux de télécommunications 5G

Randriana N.H.E¹, Randriamitantsoa P.A.², Randriamitantsoa A. A³

Laboratoire de Recherche Télécommunication, Automatique, Signal et Images (LR-TASI)

Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED-STII)

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 – Madagascar

¹Erica_mada@hotmail.com, ²rpauguste@gmail.com, ³andriau23@gmail.com

RESUME

La 5G, dont les premiers lancements commerciaux viennent tout juste d'être annoncés dans le monde tout comme à Madagascar. La seule façon de fournir la capacité du réseau d'accès radio (RAN) densifié nécessaire pour la 5G sera par fibre optique, vue la quantité de données qui devront être transportées sur le réseau. Pour l'optimisation de la fibre actuelle, nous nous intéresserons particulièrement à minimiser le facteur de dispersion de la fibre pour un rendement optimal. Le réseau de Bragg permet d'introduire une dispersion positive et négative élevée et de plus adaptable dans toute la largeur spectrale du réseau WDM. Dans ce but, une méthode d'amélioration du masque de phase afin d'inscrire des réseaux de Bragg à pas variable permettant d'ajuster la courbe de dispersion pour compenser les différents termes de la dispersion chromatique.

Mots-clés : fibre, dispersion, réseau de Bragg, spectre, dispersion.

ABSTRACT

The 5G, whose first commercial launches have just been announced around the world as well as in Madagascar. The only way to provide the densified radio access network (RAN) capacity needed for 5G will be through fiber optics. For the optimization of the current fiber, we will be particularly interested in minimizing the dispersion factor of the fiber for optimal performance. The Bragg grating allows to introduce a high positive and negative dispersion and moreover adaptable in the whole spectral width of the WDM grating. For this purpose, a method of improving the phase mask in order to register variable-pitch Bragg gratings allowing the dispersion curve to be adjusted to compensate for the different terms of the chromatic dispersion.

Keywords: fiber, dispersion, Bragg grating, spectrum, dispersion.

1. Introduction

La gestion de la pente des dispersions devient cruciale afin d'assurer de bonnes performances des liaisons optiques. Le principal problème de la liaison optique est la dispersion. L'emploi du réseau de Bragg permet quant à elle d'introduire une dispersion positive et négative élevée et de plus adaptable dans toute la largeur spectrale du réseau WDM. Dans ce but, une méthode d'inscription a été développée afin d'inscrire des réseaux de Bragg à pas variable permettant d'ajuster la courbe de dispersion pour compenser les différents termes de la dispersion chromatique. Concernant cette optimisation de la fibre optique dans les réseaux de télécommunications 5G, nous allons en premier lieu effectuer des maquettes de simulations de la fibre optique dans un réseau 5G. Tout cela dans le but de mettre en évidence la limite actuelle des fibres optiques en fonction des paramètres de la modélisation matricielle de transfert de la fibre optique. La deuxième étape de la simulation consiste à la modélisation des réseaux de Bragg avec un pas linéaire qui permet de mettre en évidence les effets de l'augmentation linéaire de la période le long du réseau sur la réflexion et le temps de retard. La variation linéaire du temps de retard en fonction de la longueur d'onde

permet d'estimer la dispersion du réseau. C'est à travers ces modélisations que nous allons observer les effets de chaque paramètre sur les caractéristiques optiques des réseaux de Bragg uniformes et non-uniformes.

2. Les Réseaux de télécommunications 5G

La technologie 5G est une nouvelle génération car elle donne accès à des débits dépassant de 2 ordres de grandeur la 4G avec des temps de latence très courts, une haute fiabilité ; elle permettra aussi d'augmenter le nombre de connexions simultanées par surface couverte. Elle pourrait permettre, une fois déployée, de bénéficier de débits de télécommunication mobile de plusieurs gigabits de données par seconde. [1]

2.1 Architecture globale des réseaux de télécommunications 5G

L'architecture globale du réseau de télécommunications 5G se compose d'un accès Radio ou *Next Generation RAN (NG-RAN)* et d'un cœur réseau ou *5G Core (5GC)*. [1] [2]

La **Figure 1** illustre cette architecture.

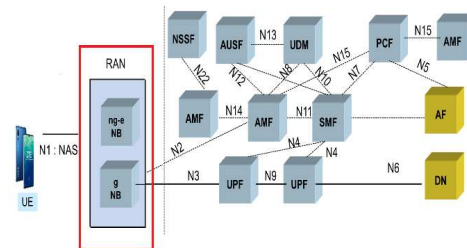


Figure 1 : Architecture 5G et interfaces

AUSF: Authentication Server Function (AuC)

UDM: Unified Data Management (HLR/HSS)

AMF: Access and Mobility Management Function (MME)

SMF: Session Management Function (MME)

NSSF: Network Slice Selection Function

Les *équipements utilisateurs* ou *User Equipment (UE)* communiquent avec les stations de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G.

Si la communication est en 5G, la station de base se nomme *next Generation Node Base Station (gNB)*, si la communication est en 4G, la station de base est une station de base 4G eNB évoluée pour s'interconnecter avec le cœur réseau 5G. La station de base se nomme *Next Generation -eNb (ng-eNb)* ou eLTE-eNB. [2] [3]

Dans le cœur réseau, on a les blocs suivants :

- *Authentication Server Function (AUSF)* : Traite l'authentification de l'UE
- *Core Access and Mobility Management Function (AMF)* : Traite la gestion de la mobilité de l'UE
- *Policy Control Function (PCF)* : Traite la gestion de tout type de politique applicable à l'UE (politique de gestion de mobilité,

gestion PCF (Policy Control Function de la technologie d'accès, etc.)

- **UPF:** User Plane Function (S/PGW) *Session Management Function*

DN: Data Network (PDSN) de l'UE

- **AF :** Application Function *Unified Data Management (UDM)* :

Sert d'interface à l'ensemble des fonctions de réseau qui nécessitent accéder aux données de souscription de l'UE.

- *User plane Function (UPF)* : traite les flux du plan usager sortant et entrants de l'UE
- *Application Function (AF)* : peut utiliser l'interface PCF pour demander la mise en œuvre de la qualité de service pour un flux IP donné
- *Network Slice Selection Function (NSSF)* : Permet d'identifier la fonction AMF appropriée pour la prise en charge de la gestion de la mobilité de l'UE.
- *Data Network (DN)* : concerne les réseaux Data

2.2 Architecture simplifiée

L'architecture de la liaison 5G est subdivisée en 4 Groupes :

- L'utilisateur
- La station de base
- Le réseau intermédiaire
- Le réseau cœur

Nos recherches étant basé dans la station de base, l'utilisation d'une liaison optique entre le RHH et le BBU est indispensable pour une liaison optimale à haut débit. La figure ci-dessous représente l'architecture simplifiée d'un réseau 5G et de la liaison optique. [4]

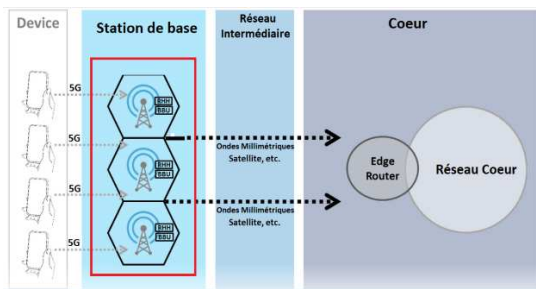


Figure 2 : Architecture 5G simplifiée

BBU : Baseband unit (unité de bande de base)

RRH : Remote Radio Head

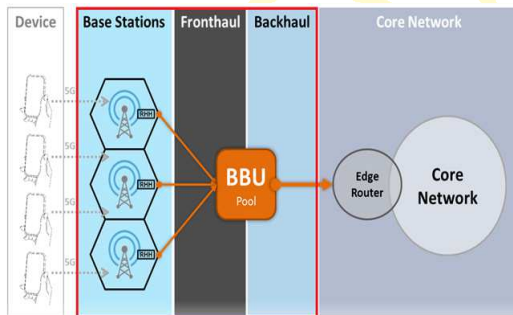


Figure 3 : Architecture du réseau Intermédiaire de la liaison 5G

BBU : Baseband unit (unité de bande de base)

RRH : Remote Radio Head

Les travaux de recherche que nous développons se rapportent aux blocs en rouge de l'architecture 5G de la **Figure 1**,

Figure 2 et la Figure 3 plus précisément entre le RRH et l'unité radio et le BBU. [4]

3. Architecture globale d'une chaîne de transmission optique

Le système à gestion de la dispersion est dans cette recherche innové au niveau du réseau de Bragg dans le bloc CDC

(Compensateur de Dispersion Chromatique).

Ces améliorations sont schématisées ici sur le bloc en rouge. [6]

[6] [7]



Figure 4 : Schéma bloc d'une liaison optique dans un réseau 5G

Tx : Transmetteur (Transmitter)

AP : Amplificateur Optique (Amplifier)

GFF : Filtre d'aplatissement du gain (Gain Flattening Filter)

CDC : Compensateur de Dispersion Chromatique (Chromatic Dispersion Compensator)

PMDC : Compensateur de dispersion en mode polarisation (Polarization Mode Dispersion Compensator)

RTx : Recepteur (Detector)

4. Innovation de la liaison optique par l'optimisation du réseau de Bragg

Les réseaux de Bragg sur fibre optique ont désormais un rôle essentiel dans les télécommunications. Nous pouvons observer sur la **Figure 4**, un schéma descriptif de la méthode utilisée pour la propagation de l'information grâce à plusieurs longueurs d'onde (canaux) qui utilise la technique de multiplexage WDM (Wavelength Division Multiplexing).

La détermination de la matrice de transfert nous a permis de modéliser efficacement différemment les réseaux de Bragg. Celui-ci est divisé en N sections consistant en un réseau de Bragg uniforme. Chaque section peut être de longueurs variées de 1 à plusieurs périodes. Cependant dans le cas d'une modélisation d'un réseau avec un pas évoluant par incrément, une attention particulière doit être portée sur la taille maximale du bloc utilisé.

Les réponses optiques de chaque section de taille « l » vont s'ajouter les unes aux autres pour finalement obtenir la réponse du réseau de Bragg de longueur « L ». Il est ainsi possible d'attribuer une période différente à chaque section pour simuler des réseaux de Bragg non-uniformes. Mathématiquement, nous obtenons :

$$[T_L] = [T_1][T_2] \dots [T_N] \quad (1.01)$$

Ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} a(0) \\ b(0) \end{bmatrix} \quad (1.02)$$

$$= [T_N][T_{N-1}] \dots [T_1] \begin{bmatrix} a(L) \\ b(L) \end{bmatrix}$$

Le calcul des longueurs d'onde a pour objectif de calculer les matrices de transfert de chaque section et les multiplier afin d'obtenir au final la réponse du réseau de Bragg.

Nous obtenons alors une matrice de transfert T de la forme :

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (1.03)$$

Il est ainsi possible d'obtenir la réflexion « r » et « θ » la phase de la lumière grâce au coefficient r :

$$r = \left| \frac{T_{21}}{T_{11}} \right| \quad (1.04)$$

$$\theta = \arg \left(\frac{T_{21}}{T_{11}} \right) \quad (1.05)$$

Pour un réseau uniforme dont l'indice de réfraction effectif et la période sont uniformes, nous obtenons :

$$r(L, \lambda) \quad (1.06)$$

$$= \frac{K^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + K^2 \cosh^2(SL)}$$

Ainsi pour la longueur d'onde de Bragg λ_B ,

Avec :

$$\Delta\beta = 0 \quad (4.48)$$

Nous obtenons alors :

$$r(L, \lambda_B) = \tanh^2(KL) \quad (1.07)$$

Afin d'estimer l'impact de la dispersion chromatique sur les performances du système avec des temps de simulation courts, nous avons développé un modèle simple se basant sur la formule $r(L, \lambda_B)$. Sachant que la dispersion chromatique induit un élargissement de l'impulsion dans le domaine temporel, et comme il n'y a pas de pertes dues à ce phénomène, les paramètres les plus significatifs que nous avons évalués pour la modélisation sont la largeur T et l'amplitude H du lobe centrale de l'impulsion étalée au niveau de la sortie de fibre dans laquelle la plus grande partie de la puissance optique est contenue.

Ainsi les figures suivantes représentent les caractéristiques de la modélisation de la fibre optique sous Matlab. La **figure 5** représente la période du réseau de bragg dans la fibre optique en fonction de la position. Cette première figure permet de mettre en évidence la répartition du réseau de bragg uniformément dans le réseau optique.

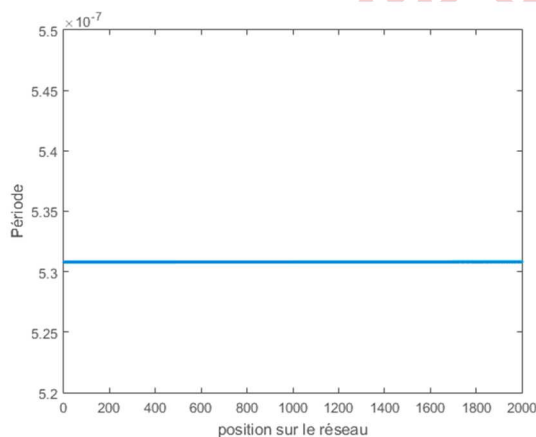


Figure 5 : Période du réseau en fonction de sa position

Les réseaux de fibres à période uniforme représentée par la **Figure 5** consistent en une perturbation périodique de la propriété de la fibre optique, généralement de l'indice de réfraction du noyau, et se répartissent en deux classifications générales sur la période de la grille comme représentée sur la **Figure 5**.

La **Figure 6** suivante représente cette réflectivité du réseau en fonction de la longueur d'onde.

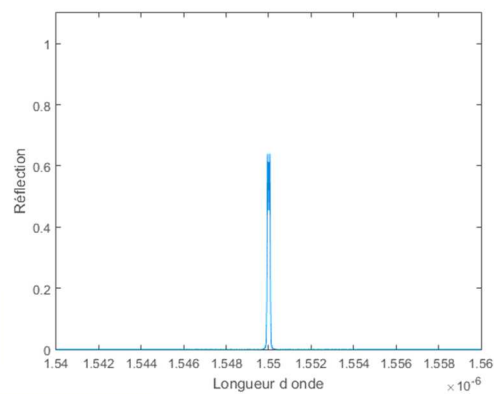


Figure 6 : Réflectivité du réseau en fonction de la longueur d'onde

En effet, plus la différence d'indice entre deux milieux est importante, plus la réflexion à l'interface de ces deux milieux est grande. Notre observation est cohérente avec le fait que la différence d'indice est importante aux deux extrémités du réseau de Bragg. Nous pouvons ainsi, en localisant ces positions, déterminer la longueur optique du réseau qui est ici à 1550nm. D'après la **Figure 6**, nous avons une réflectivité maximum à la longueur d'onde de 1550nm grâce à la technique des réseaux de Bragg.

La **Figure 7** suivante représente la phase du système en fonction de la longueur d'onde.

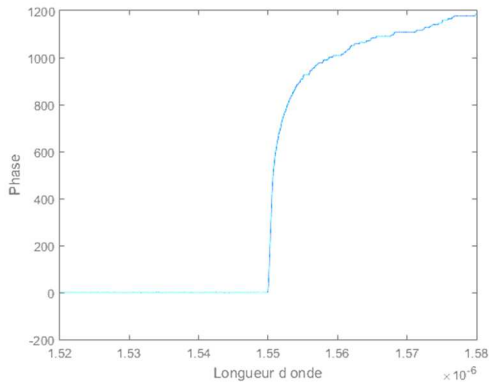


Figure 7 : Phase du réseau en fonction de la longueur d'onde

La **Figure 7** résulte du phénomène de réseau de Bragg. La croissance de la courbe de phase à 1550nm est indispensable pour la performance de notre système. Car les ondes diffractées dans les ordres +1 et -1 créent un champ de franges d'interférence stable dont les plans d'égaux intensités sont perpendiculaires au plan du masque. Le pas de la modulation d'indice est égal à la largeur des traits gravés dans le masque de phase.

Dans la **Figure 8** suivante, les retards de groupes en fonction de la longueur d'onde sont représentés.

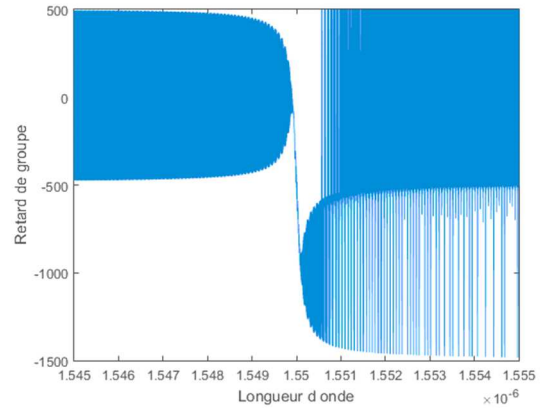


Figure 8 : Les retards de groupes en fonction de la longueur d'onde

D'après la **Figure 8**, les retards de groupe sont maximums entre l'intervalle 1545nm et 1550nm et 1551nm à 1555nm. Les dispersions de groupes sont minimisées aux bornes de la fréquence 1550nm grâce à la technique des réseaux de Bragg.

D'après la technique de l'ENST qui donne directement les parties réelle et imaginaire de l'interférogramme par l'intermédiaire de la détection synchrone qui sont représentée par la **Figure 9** et la **Figure 10**. Dans notre simulation, avec un réseau de Bragg uniforme, le calcul de la transformée de Hilbert de l'interférogramme nous permet d'obtenir la partie complexe.

Bien qu'il soit communément supposé supérieur à 1, l'indice de réfraction peut en réalité prendre des valeurs bien différentes. Dans notre simulation, l'indice de réfraction est un nombre complexe dont la partie imaginaire rend compte de l'atténuation de l'onde.

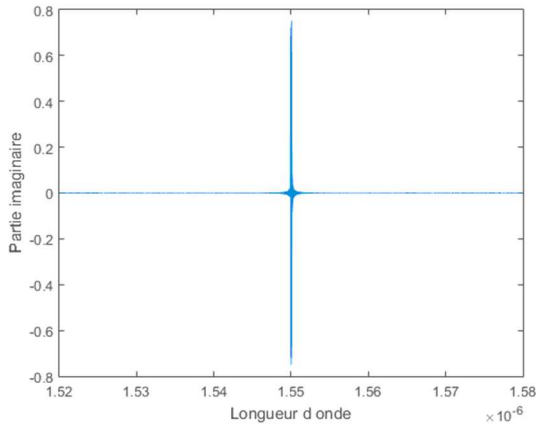


Figure 9 : *Partie imaginaire du réseau en fonction de la longueur d'onde*

La forme $n = n_1 + n_2$ de l'indice optique peut être étendue aux parties réelle et imaginaire de l'indice complexe. L'auto focalisation est phénomène lié à la partie réelle de l'indice optique. Pour une partie réelle de n_2 positive, le phénomène conduit à l'autofocalisation, mais pour une liaison optique possédant une partie réelle n_2 négative, cela conduit à l'autodéfocalisation. La partie imaginaire de l'indice représentée par la **Figure 9** est en revanche associée au phénomène de l'absorption.

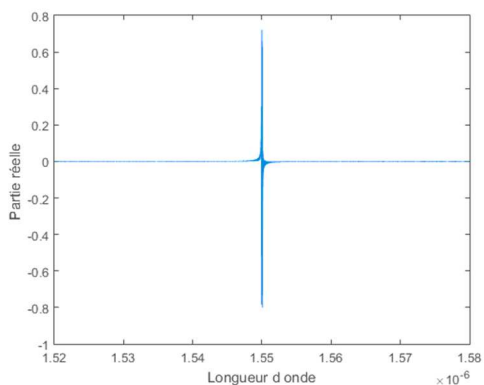


Figure 10 : *Partie réelle du réseau en fonction de la longueur d'onde*

La grandeur physique qui permet de calculer la vitesse des ondes électromagnétiques dans la fibre optique à partir de la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide est l'indice de réfraction n du matériau. Il est défini comme le quotient de la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide, notée c , par la vitesse de ces mêmes ondes dans le matériau. D'après la **Figure 11** suivante, l'indice de réfraction varie légèrement en fonction du dopage et du réseau de Bragg.

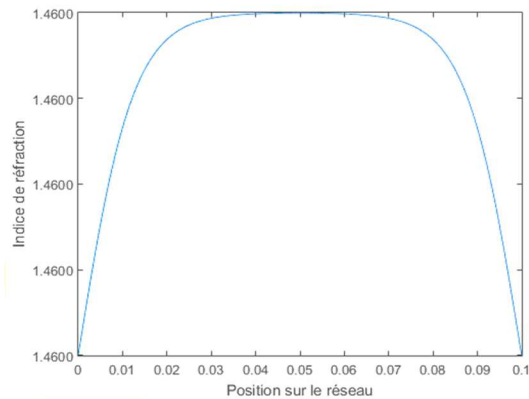


Figure 11 : *L'indice de réfraction en fonction de la position du réseau*

La **Figure 11** montre la variation de cet indice en fonction de la position ou de la distance du réseau. Cette figure permet de mettre en évidence l'efficacité du réseau de Bragg dans notre réseau car l'indice de réfraction atteint la valeur 1,46 dans la quasi-totalité de notre réseau.

Notons que la valeur idéale de l'indice est $n = 1,467$.

Démonstration :



Les angles sont toujours repérés par rapport à la normale à l'interface (la normale à l'interface est représentée en trait discontinu sur le schéma ci-dessus). La réflexion se fait avec un angle réfléchi θ_3 égal à l'angle d'incidence θ_1 .

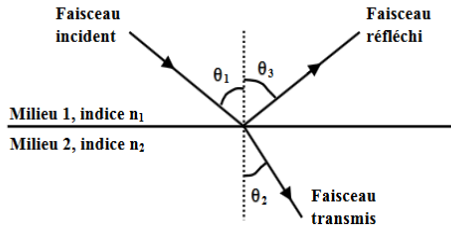


Figure 12 : Illustration des indices dans la fibre optique

Les angles sont toujours repérés par rapport à la normale à l'interface (la normale à l'interface est représentée en trait discontinu sur le schéma ci-dessus). La réflexion se fait avec un angle réfléchi θ_3 égal à l'angle d'incidence θ_1 . [8]

Illustration : les indices de réfraction $n_1 = 1,467$ et $n_2 = 1,461$ donnent, pour $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 45,24^\circ$ et $\theta_3 = 45^\circ$.

D'où la loi de la réflexion qui est vérifié :

$$\text{Loi de la réflexion: } \theta_3 = \theta_1$$

$$\begin{aligned} \text{loi de la réfraction : } n_1 \sin \theta_1 \\ = n_2 \sin \theta_2 \end{aligned}$$



L'évolution de la dispersion et de la bande passante en fonction du pas du réseau de Bragg de 5 cm de long ont alors été exposées avec des pas variants de 6 nm/cm à 0.0125 nm/cm. La dispersion et la bande passante de ces réseaux ont pu être évaluées

et comparées aux résultats prévus par la simulation. Les résultats de la bande passante et la dispersion sont reportés sur la **Figure 13**.

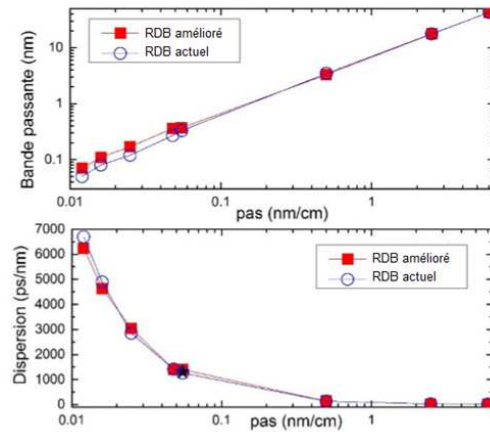


Figure 13 : Bande passante et dispersion de RDB actuel et amélioré sur fibre de 5 cm de long avec différents pas de réseau

Comme prévu par la simulation, une diminution de la dispersion ainsi qu'une augmentation de la bande passante sont constatées lorsqu'on diminue le pas du réseau. Une dispersion maximale de 6200 ± 120 ps/nm est obtenue avec une bande passante de 0.07 nm pour un pas de 0.0125 nm/cm, tandis qu'une dispersion de 11.5 ps/nm et une bande passante de 50 nm sont obtenues pour un pas de réseau de 6 nm/cm. Nous pouvons noter également, que l'on obtient une dispersion de 1402 ps/nm pour un pas de réseau de 0.055 nm/cm, ce qui rejoint la valeur mesurée de 1311 nm/cm pour un réseau semblable avec un réseau de Bragg amélioré. Nous constatons également un léger écart entre le Réseau de Bragg

actuel et la technique proposée pour diminuer la dispersion.

Dans la prochaine étape de notre simulation, nous allons étudier le temps de retards du réseau de Bragg en fonction de la longueur de la fibre optique et du pas du réseau de Bragg. Le pas d'un réseau de Bragg peut alors être défini par l'équation suivante :

$$p = \frac{\Lambda_2 - \Lambda_1}{L} \quad (4.53)$$

Avec

- Λ_1 et Λ_2 : les périodes aux extrémités du réseau
- L : la longueur.

Ainsi il est possible de modéliser un réseau avec des valeurs de pas diversifiés sans pour autant augmenter le temps de simulation. Afin d'élargir la bande passante, l'exposition de réseaux plus longs est nécessaire, tel que décrit par l'équation précédente sur le réseau de Bragg. Pour la simulation, nous allons utiliser des réseaux de 10 cm et 15 cm avec notre plus petit pas de réseau possible. Cela dans l'objectif d'obtenir des bandes passantes plus larges. Nous pouvons voir sur la **figure 14** suivante l'évolution de la réflexion, de la transmission et du temps de retard en fonction de la longueur d'onde de RDB de longueur 5, 10 et 15 cm avec un pas de 0.0125 nm/cm.

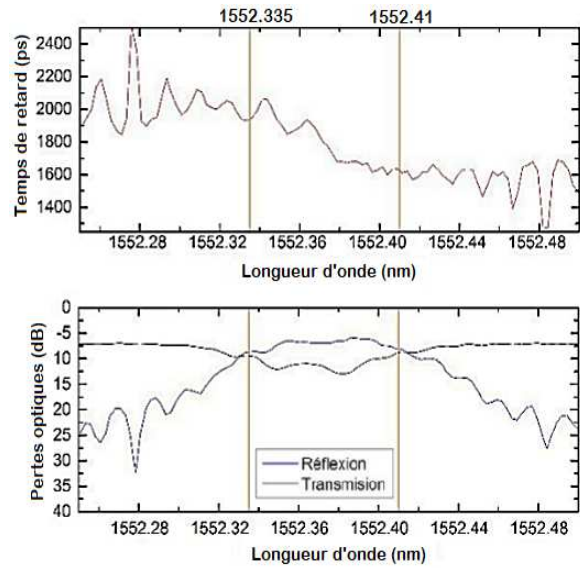


Figure 14 : Temps de retard et réflexion d'un RDB sur fibre de 5cm de long et avec un pas de 0.0125 nm/cm

La **Figure 15** suivante représente l'évolution de la réflexion dans notre transmission optique. Les paramètres de la simulation sont les pertes optiques, le temps de retard en fonction de la longueur d'onde du réseau de Bragg de longueur 10 cm avec un pas de 0.0125 nm/cm.

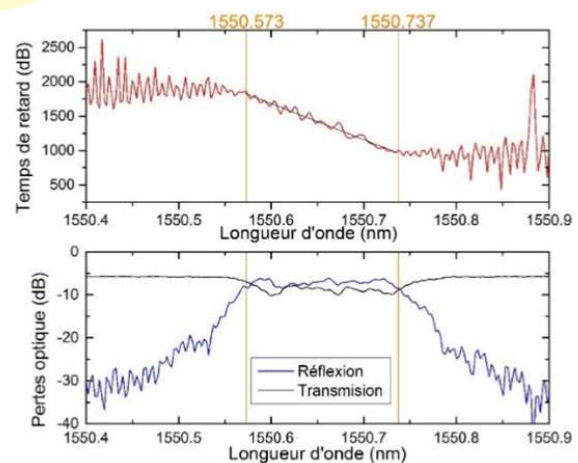


Figure 15 : Temps de retard et réflexion d'un RDB sur fibre de 10cm de long et avec un pas de 0.0125 nm/cm

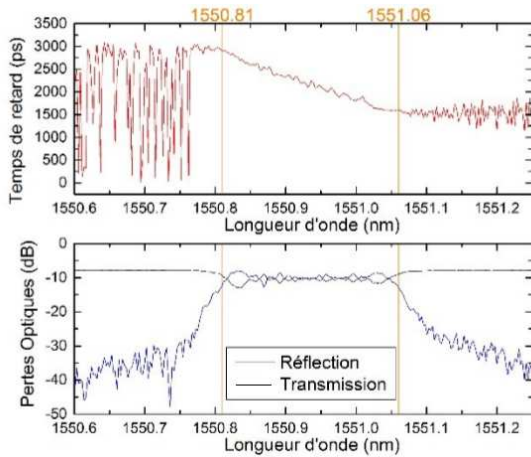


Figure 16 : Temps de retard et réflexion d'un RDB sur fibre de 15 cm de long et avec un pas de 0.0125 nm/cm

Chaque réseau a été inscrit sur fibre optique avec un même masque de phase, à savoir 2 mJ/mm. Les valeurs de dispersions et de bandes passantes correspondant à chacun de ses réseaux sont présentées sur la Figure 16 suivante, ensemble avec les valeurs actuelles et l'innovation obtenu par la simulation.

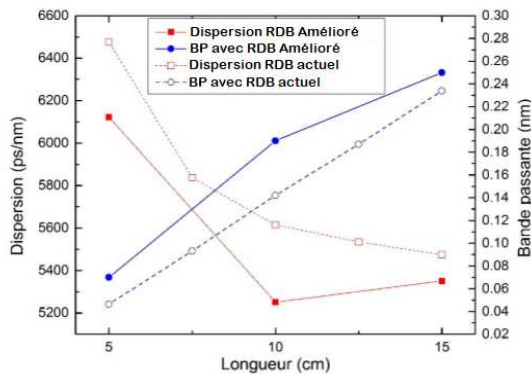


Figure 16 : Évolution de la dispersion et de la bande passante actuel et pour des RDB amélioré avec un pas de 0.0125 nm/cm et des longueurs variant de 5 à 15 cm

D'après la Figure 16, nous remarquons une amélioration de la bande passante du réseau grâce à la technique proposée, nous distinguons aussi une légère diminution de la dispersion dans la fibre optique. Mais notons que plus la longueur de la fibre optique les deux courbes se superposent l'une sur l'autre. La performance de notre technique est donc perçue que dans le cas d'une longueur de fibre optique limitée.

Nous considérons effectivement une nette diminution des oscillations du temps de retard lors de l'application de l'apodisation lors de l'exposition. Nous observons toutefois assez peu de différences pour les deux valeurs du coefficient a choisie : $a = 10$ étant la valeur communément utilisée lors d'apodisation au COPL et $a = 4$ étant celle reportée comme optimale.

Les valeurs de dispersions et de bandes passantes correspondantes pour ces réseaux ont été mesurées et répertoriées dans le tableau suivant. Les erreurs standards de chaque régression linéaire utilisée pour évaluer la dispersion sont également présentées dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Exemple de valeurs de dispersions en fonction de la bandes passantes des réseaux de Bragg de 10cm de long et avec un pas de 0125nm/cm

Valeur d'Apodisation (a)	Dispersion (ps/nm)	Bande passante (nm)
Pas d'apodisation	5221 \mp 124	0.19
4	4805 \mp 69	0.15
10	4781 \mp 74	0.15

5. Conclusion et discussion

Les performances des masques de phase innovée ont été comparées aux valeurs paramètre actuel. Notons que le masque de phase est l'un des éléments de base de la performance du réseau de Bragg. Une puissance minimale de 1.6%, combiné à 40% de puissance lumineuse dans les ordres ± 1 , a été effectivement obtenue. Ceci a permis alors de confirmer tout le travail d'optimisation pour une amélioration adéquate du réseau optique pour son implémentation dans la 5G.

En effet, une énergie trop élevée implique une réflexion quasi totale de la lumière, mais également une saturation du temps de retard. Il a fallu alors adapter l'énergie utilisée lors de l'exposition au pas du réseau à exposer. Ainsi un pas faible (< 1 nm/cm) impose de réduire l'énergie afin d'éviter le phénomène de saturation. Une dispersion supérieure à 5000 ps/nm avec une bande passante de 0.22 nm a été ainsi obtenue en réalisant un réseau de Bragg de longueur 15cm et avec un pas de 0.0125 nm/cm. À notre connaissance, il s'agit de la plus

grande dispersion obtenue pour un système optique, le paramètre de longueur 15cm et avec un pas de 0.0125 nm/cm est alors à éviter.

6. Références

- [1] B. Le Nguyen, « *Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second edition, p355-401,2017.
- [2] B. Le Nguyen, « *Ultra-fast fiber laser* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second Edition, p300-420, 2017.
- [3] B. J. Eggleton, T. Stephens, P. A. Krug, G. Z. Dhosi, Brodzeli, F. Ouellette, « *Dispersion compensation using a fibre grating in transmission* », Electronics Letters, vol. 32, n°17, p1610-1611, 2016.
- [4] E. Desurvire, « *Erbium-doped fiber amplifiers, principles and applications* », édition Wiley Interscience, 2015.
- [5] F. Gérome, « *Etude des télécommunications hautes fréquences* », rapport de DEA de l'Université de Limoges, juillet 2017.
- [6] F. X Olivier, C. Zugno, S. Thompson, « *L'évolution des réseaux d'infrastructure DWDM à haut débit* », Revue des Télécommunications d'Alcatel, p181-193, 3ème trimestre 2015.

[7] G. Huss, « *Interféromètres stellaires réalisés à partir de composants d'optique guidée et intégrée* », thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2011.

[8] J. L. Auguste, « *Conception, réalisation et caractérisation d'une fibre à forte dispersion négative* », Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2011.

