

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة  
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية الهندسة - دائرة الإلكترونيك  
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER**

OPTION : RÉSEAUX ET TÉLÉCOMMUNICATIONS.

**ETUDE ET SIMULATION D'UNE FIBRE  
COMPENSATRICE DE DISPERSION  
CHROMATIQUE**

Présenté par:

**MEDDI Dounia**

Proposé par :

***Mr. NACER Said***

Session : Juillet 2013  
**2012/2013**

## Remerciements

---

Je remercie tout d'abord, Allah qui a donné moi la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.

Je remercie profondément mon promoteur Mr S.NACER, pour avoir proposé un sujet de recherche passionnant, pour son aide, ses encouragements, ses remarques, ses conseils, et ses critiques pertinentes et constructives. Qu'il trouve ici l'expression de me profondes gratitude.

Mon remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je remercie également ma famille (ma Mère et mon Père et mes sœurs) et qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Un dernier merci, un des plus importants, à mon mari pour son soutien sans relâche durant ces années d'étude et en particulier durant la période de thèse.

Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.



---

## ملخص:

في الوقت الراهن القيد الرئيسي لأنظمة الإرسال عبر الألياف الضوئية هو التوهين والتشتت للإشارة الناجمة عن الانتشار في الألياف البصرية. يركز هذا العمل على دراسة آثار التشتت التي تحدث في الألياف البصرية وتأثيرها على الإرسال الرقمي عالية السرعة خلال مسافات طويلة و أيضا دراسة مختلف تقنيات التعويض الممكنة لهذا التشتت. في هذه الدراسة المحاكاة تم تأديتها بمساعدة برنامج COMSOL من أجل رؤية تغيرات التشتت الوني بدلالة الطول الموجي لألياف بصرية معوضة للتشتت اللوني تعمل على الشكل الاساسي.

**كلمات المفاتيح :** الألياف الضوئية ,التبديد اللوني, ألياف تعويضية.

---

## Résumé :

La principale limitation des systèmes de transmission sur fibres optiques est aujourd'hui l'atténuation et la dispersion du signal occasionnées par la propagation dans la fibre optique. Ce travail porte sur l'étude d'un des effets dispersifs qui se manifestent dans la fibre optique et son influence sur une transmission numérique à haut débit et à longue distance, ainsi que les techniques de compensation possible. Aussi une simulation a été faite à l'aide du logiciel de simulation (COMSOL) pour voir l'évolution de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour une fibre compensatrice travaillant sur le mode fondamental.

**Mots clés :** Fibre optique, Dispersion chromatique, Fibre compensatrice.

---

## Abstract :

The main limitation of transmission systems on optical fiber today attenuation and dispersion caused by the propagation in the fiber optic signal. This work focuses on the study of dispersive effects occurring in the optical fiber and its influence on a high-speed digital transmission in long distance, as well as technical possible compensation. As a simulation was made using the simulation software (COMSOL) to see the evolution of chromatic dispersion as a function of wavelength for a compensating fiber working on the fundamental mode.

**Keywords:** Optical fiber, chromatic dispersion, fiber compensating.

---

# Introduction générale

---

Durant les dix dernières années, le monde a vu une croissance explosive des télécommunications optiques, alimentée en partie par l'expansion rapide d'internet. Non seulement les systèmes de télécommunications optiques cherchent constamment à améliorer leur performance et leur capacité, mais également se déploient de plus en plus au niveau de l'utilisateur final.

Dix ans auparavant, les systèmes optiques étaient principalement utilisés pour les liaisons point à point longues distances. Dans le futur, les réseaux de fibres optiques seront directement utilisés au niveau des quartiers, des maisons, voire même sur chacun des ordinateurs particuliers. Dans un futur plus lointain, on peut même envisager que les signaux qui se propagent entre les différents composants de l'ordinateur seront transmis et reçus optiquement.

Le besoin grandissant de vitesse de communication et cette répartition géographique élargie, nécessite continuellement d'entrevoir le haut débit à grande distance. Le transport de l'information à haut débit et à grandes distances qui se fait via la fibre optique -pour ses multiples avantages par rapport au câble coaxial rencontre quelques problèmes d'ordre technique, et parmi ces problèmes, les différents effets dispersifs que subit le signal optique dans la fibre, parmi eux la dispersion chromatique qui fait l'objet de cette étude.

Ce travail intitulé « Etude et simulation d'une fibre compensatrice de dispersion chromatique », sera reparti pour faciliter la compréhension en trois chapitres.

Au premier chapitre, on donnera quelques généralités sur les fibres. Puis au second, on va décrire les différentes dispersions (intermodale, chromatique), on parlera des différentes techniques de compensations de la dispersion chromatique ( $D_{ch}$ ),

Enfin, au troisième chapitre on fera une simulation sur le logiciel COMSOL Multiphysics pour voir la variation de la valeur maximale de dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour une fibre monomodale et une fibre compensatrice. On terminera par une conclusion générale.

# Chapitre 1 Généralités sur les fibres optiques

---

## 1.1 Historique

Les réseaux de télécommunication dans les années 70 reposent sur deux types de systèmes : le câble coaxial et les faisceaux hertziens.

Le réseau hertzien est basé sur une infrastructure de relais (distant d'environ 50 km les uns des autres) et utilise diverses bandes de fréquences essentiellement autour de 6/7 GHz et 11 GHz. De 1975 à 1985, la recherche se concentre sur les problèmes que pose l'augmentation de la bande passante liée au passage de l'analogique au numérique, et des développements importants voient le jour. Ainsi, des faisceaux hertziens permettant la transmission de 8 canaux (7 plus un canal de secours) à 140 Mbit/s, soit environ 1 Gbit/s sur un lien sont disponibles dès la fin des années 80. Le rendement spectral, qui représente l'efficacité dans l'utilisation du spectre, atteint alors environ 4 bit/s/Hz, grâce à des schémas de modulation performants.

Les lignes de transmission utilisant le câble coaxial possèdent, quant à elles, une longueur du pas de régénération beaucoup plus faible du fait de la très forte atténuation du milieu. Le système de base de ces réseaux a une capacité de 140 Mbit/s avec un espacement entre chaque répéteur de l'ordre de 2 km. Les derniers développements sur ces lignes de transmission ont permis d'obtenir une capacité de 560 Mbit/s avec le même espacement entre répéteurs. Comme à l'époque les câbles interurbains disposaient typiquement de 8 à 12 paires, la capacité d'une ligne atteignait 2 ou 3 Gbit/s.

C'est vers la fin des années 80 que vont apparaître les premiers systèmes de transmission optique : une période de coexistence commence avec les autres réseaux. Ce développement commercial est l'aboutissement de plus de deux décennies de

recherche de base pour obtenir des composants et dispositifs (en particulier des sources), mais aussi des fibres dont l'atténuation est compatible avec les exigences d'un réseau de télécommunication : en 1970, la compagnie Corning Glass Works de New York, produit la première fibre optique avec des pertes suffisamment faibles (20dB/km) pour être utilisée dans les réseaux de télécommunication (actuellement les pertes sont de l'ordre de 0,2 dB/km).

Les premières années de l'optique sont marquées par des évolutions importantes :

- Le passage de la fibre multimode, utilisée dans les premières expérimentations, à la fibre monomode dont la connexion est plus problématique mais, qui propose des débits sans rapport avec la première. La fibre multimode conserve cependant sa pertinence dans d'autres domaines tels que l'aéronautique par exemple.
- Le passage successif de la première fenêtre de transmission autour de 850 nm (fibre multimode) à la deuxième autour de 1310 nm (minimum d'atténuation d'environ 0,3 à 0,4 dB/km), puis à celle autour de 1550 nm (minimum d'atténuation de 0,2 dB/km) qui est la norme aujourd'hui en matière de réseau. Ces changements de fenêtre de transmission ont été rendus possibles par l'amélioration des techniques de fabrication des préformes et au développement des sources optiques.

Si, dans les premières années, le réseau optique a un débit qui ne surpasse pas encore celui des lignes de transmission utilisant le câble coaxial, il présente quand même un avantage indéniable face à ce dernier : l'espacement entre chaque répéteur est plus important, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres (par exemple environ 70 km pour un système à 560 Mbit/s à 1550 nm). [1]

On peut résumer les différentes générations des fibres optiques :

- **G1 (Première génération): 1989 – 1991**

Les premiers systèmes à fibres optiques utilisaient des répéteurs en ligne basés sur une technologie silicium pour régénérer optoélectroniquement le signal affaibli après passage par chaque section de câble. La capacité de ces systèmes de transmission était de 0,28 Gbit/s par paire de fibre et ils opéraient dans la fenêtre à 1310 nm.

- **G2 (Seconde Génération): 1992 – 1995**

La technologie G2 constitua une amélioration par rapport à G1 puisque la capacité transmise devint alors de 0,565 Gbit/s par paire de fibres. Ces progrès furent rendus possibles par de meilleures performances des circuits au silicium du répéteur, ainsi que par l'utilisation de la fenêtre à 1550 nm.

• **G3 (Troisième Génération): 1995 – 1997**

Cette génération correspond à une évolution majeure dans le domaine de la transmission optique : l'amplification optique par fibre dopée à l'erbium (Erbium Doped Fibre Amplifier - EDFA). Cette technique d'amplification, qui évite la régénération du signal dans chaque répéteur et donne accès au « tout optique », est beaucoup plus économique, efficace et fiable, et autorise l'accès à des bandes passantes de ligne considérables. Les limitations provenant de l'utilisation de circuits au silicium dans les répéteurs n'existent alors plus et la capacité passe à 5 Gbit/s par paire de fibres.

• **G4 (Quatrième Génération): 1998 – 2000**

La technologie EDFA est améliorée, ce qui permet des bandes passantes optiques plus importantes. Ces progrès, associés à d'autres progrès dans le domaine des techniques de filtrage optique, permettent de mettre en œuvre une première génération de systèmes WDM (Wave Division Multiplexing ou multiplexage à répartition de longueur d'onde). La capacité transmise s'élève alors à 20 ou 40 Gbit/s (8 ou 16 couleurs à 2,5 Gbit/s) par paire de fibres.

• **G5 (Cinquième Génération): 2000 – 2002**

La bande passante des EFDA est à nouveau améliorée, et la capacité par couleur passe à 10 Gbit/s. Ces systèmes fournissent des capacités de l'ordre de 160 Gbit/s par paire de fibres (16 couleurs à 10 Gbit/s).

• **G6 (Sixième Génération): Depuis 2001**

Cette génération a une base de conception semblable à la génération précédente, les caractéristiques des EFDA sont améliorées et les équipements terminaux, toujours à 10 Gbit/s, présentent de meilleures performances. Ainsi, tout en conservant des terminaux à 10 Gbit/s, ces systèmes peuvent multiplexer jusqu'à 100 couleurs par paire de fibres, offrant des capacités de l'ordre de 1 Tbit/s.

Certains Centres de Recherche et Développement annoncent leurs avancées dans la conception de systèmes DWDM utilisant une technologie à 40 Gbit/s par couleur,

avec environ 40 couleurs par fibre. D'autres centres de recherche pensent que la prochaine génération ne sera qu'une amélioration de G6 pour laquelle on accroîtra encore le nombre de couleurs à 10 Gbit/s (soit 150-200x10 Gbit/s). La spécification de cette génération est délicate car on approche des limites physiques de la bande passante de la technologie EFDA. Les problèmes de distorsion de couleurs à 40 Gbit/s sont également difficiles à résoudre. [2]

## **1.2 Multiplexage en longueur d'onde :(WDM : Wavelength Division Multiplexing**

Pendant de nombreuses années le seul moyen d'augmenter la capacité d'un réseau de télécommunication optique était de rajouter des fibres, ceci induisant des coûts très importants pour un débit maximum par fibre n'excédant pas plus de 2,4 Gbit/s.

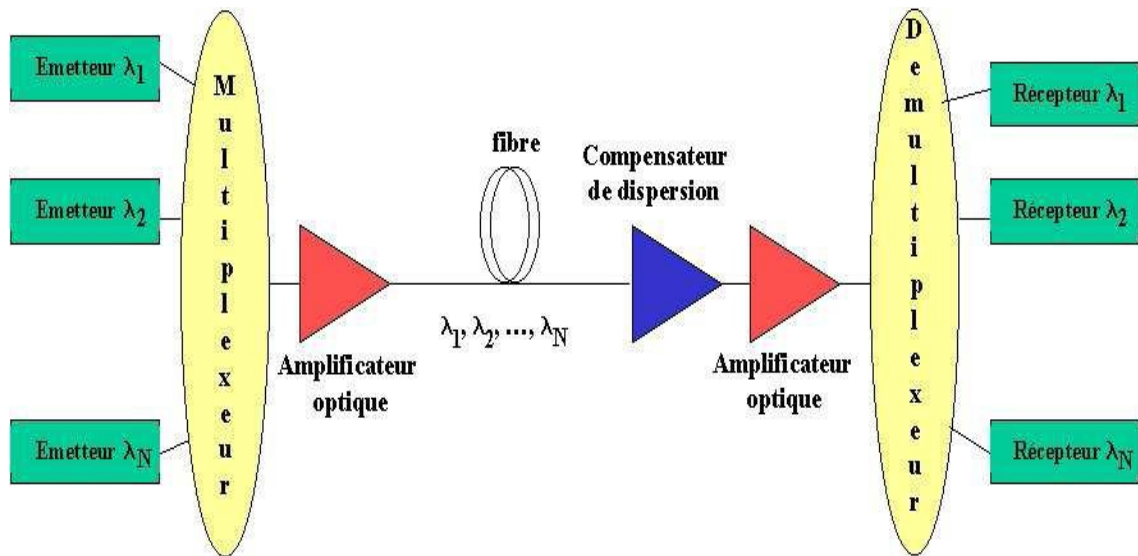
Par la suite, l'idée du multiplexage qui consiste à transmettre simultanément un certain nombre de signaux sur une seule ligne s'est imposée. Le gain visé est simple : économiser le milieu de transmission en le partageant entre plusieurs signaux.

Tout d'abord, on a eu la possibilité d'investir dans la technologie TDM (Time Division Multiplexing) : cette technique permet une division des signaux selon des périodes de temps. Ainsi, on transmet quelques signaux distincts sur une seule fibre en employant des segments de temps préalablement définis. On peut alors atteindre des débits de 10 Gbit/s mais la nécessité de réaliser de gros investissements dans de nouvelles infrastructures la rend trop coûteuse.

De plus, les demandes de débits étant toujours croissantes et comme des développements ont permis l'augmentation de la bande passante des fibres optiques, on s'est tourné vers la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing). Le multiplexage en longueur d'onde est une technique qui consiste à injecter simultanément sur une même fibre des signaux lumineux à des longueurs d'onde distinctes. La bande passante de la fibre optique étant de l'ordre de 45 THz, elle présente alors un fort potentiel au multiplexage de très nombreux canaux sur de longues distances.

La figure 1.1 nous montre un système classique basé sur la technique WDM. A l'émission, on multiplexe N canaux au débit nominal D, à la réception, on démultiplexe

le signal global  $N \times D$  en  $N$  canaux : la fibre transporte un multiple de  $N$  canaux ce qui est par conséquent équivalent en terme de capacité à  $N$  fibres transportant chacune un canal. Cette approche permet par conséquent d'augmenter la capacité d'un réseau de manière importante sans modifier son infrastructure physique.



**Figure 1.1 :** Principe d'une liaison WDM.

La technologie WDM est dite dense (DWDM pour Dense WDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 100 GHz. Des systèmes à 50 GHz (0,4 nm) et à 25 GHz (0,2 nm) ont déjà été testés et permettent de multiplexer des centaines de longueurs d'onde, on parlera alors de U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing).

Les premiers systèmes WDM apparus vers 1995 offraient des débits de 10 Gbit/s (soit 4 canaux multiplexés sur la bande C ayant une capacité nominale de 2,5 Gbit/s). Le premier réseau longue distance à avoir bénéficié de cette technique est le réseau sous-marin Sea-Me-We 3 mis en service en 1998 avec un débit de 20 Gbit/s (soit 8 x 2,5 Gbit/s).

Les systèmes WDM / DWDM commercialisés aujourd'hui comportent de 4 à 80, voire 160 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 10 à 200 voire 400 Gb/s en prenant un débit nominal de 2,5 Gb/s. Des débits nominaux de 40 Gb/s ont été atteints et ont permis d'obtenir 3,2 Tb/s avec 80 canaux optiques multiplexés



sur la bande C. En 2000, le réseau transatlantique FLAG ATLANTIC-1 est le premier réseau haut débit – longue distance avec une capacité de 1,28Tbit/s.

Les premiers réseaux optiques étaient auparavant optimisés pour fonctionner à 1310 nm et non à 1550 nm. A cette longueur d'onde, la SSMF (pour Standard Single Mode Fiber). possède une dispersion chromatique non nulle (autour de 17 ps/(nm.km)) dans la bande C, dispersion qui varie en fonction de la longueur d'onde et donc en fonction du canal du signal. Cette dispersion chromatique se traduit par un allongement temporel du signal qui doit être corrigé afin de pouvoir récupérer celui-ci. Ce travail est réalisé par le compensateur de dispersion dont nous verrons plus loin quelques exemples ainsi qu'une définition plus complète.

Il est à noter que la technologie WDM, et en particulier la DWDM, du fait des fortes puissances optiques guidées va introduire des effets non linéaires qui en dégradent les performances :

- La modulation de phase croisée ou diaphonie entre canaux appelée XPM (Cross Phase Modulation).
- Le mélange à quatre ondes noté FWM (Four Wave Mixing) qui crée de l'intermodulation optique entre les différents canaux,
- La diffusion Raman stimulée ou SRS (Stimulated Raman Scattering) qui augmente les écarts de puissance reçue entre canaux et par conséquent produit une trop grande dispersion du rapport signal/bruit. [1]

## **1.3 Utilisation des fibres optiques**

### **1.3.1 Télécommunications**

- Liaisons urbaines et interurbaines (grande capacité), liaisons sous-marines sur des tronçons de plus de 200 km sans amplification optique ou répéteurs.
- Câbles sous-marins : exemple Flag Atlantic 1 (Un milliard de dollars), entre les USA et l'Europe à 1,28 Tbps. A comparer avec 2500kbps des premiers câbles sous-marins en cuivre.

### **1.3.2 Vidéocommunications**

- De nombreuses expériences ont été essayées mais leur développement était ralenti par le coût ; la plupart des liaisons restent en coaxial.

### **1.3.3 Liaison et réseaux de données**

- L'insensibilité aux perturbations électromagnétiques, peut être un avantage décisif. Les fibres optiques commencent à être couramment utilisées pour des liaisons point à point compatibles avec les standards classiques (RS 232, IEEE 488...), dans des sections de réseaux en anneau (type Token Ring) ou en tant que passerelles entre réseaux ; la faible atténuation de la fibre permet d'augmenter la portée de ces réseaux, et de constituer des réseaux fédérateurs de grandes dimensions. Grâce aux différents composants optiques (coupleurs, répartiteurs...) les fibres optiques permettent aussi de constituer des réseaux multi-terminaux. Les nouveaux réseaux sont conçus dès le départ pour l'utilisation de la fibre optique.

### **1.3.4 Liaisons industrielles**

- Ce sont des applications variées (télémessures, télécommandes, surveillance vidéo, bus de terrain) où l'insensibilité de la fibre aux parasites est un avantage essentiel.

### **1.3.5 Capteurs et instrumentation**

- Les fibres sont de plus en plus présentes dans l'instrumentation optique, où elles permettent d'effectuer des mesures à distance en des points difficiles d'accès. Les capteurs utilisent la fibre optique elle-même comme élément sensible servant en même temps de support de transmission.

### **1.3.6 Transport de lumière**

- Les applications classiques (éclairage, visualisation, endoscopie) ou plus récentes (transport de faisceaux laser pour l'industrie, la mesure, la médecine)

ont vu leurs performances s'améliorer, et leur coût baisser, grâce au développement des technologies des fibres optiques. [2]


## **1.4 Avantages**

La fibre optique est une des plus grandes avancées technologiques en matière de câblage puisqu'elle perd tous les inconvénients des câbles en cuivre (puissance, impédances,...). Son but est de transporter de la lumière dont la source est soit un laser, soit une DEL (diode électroluminescente, LED en anglais).

La fibre optique présente, en termes de transmission, une faible atténuation, une très grande bande passante, multiplexage de plusieurs signaux, un faible poids, une très petite taille, une grande souplesse.

Un câble optique peut négocier des transferts allant jusqu'aux Téra bps. Les distances dépassent alors plusieurs kilomètres, ce qu'aucun câble de cuivre ne permet de faire. Aujourd'hui, c'est la meilleure solution pour des grandes distances et des débits élevés. Le gros avantage de ce type de câble est qu'il est indifférent aux perturbations électromagnétiques puisqu'il transporte de la lumière. De plus, il échappe complètement aux écoutes clandestines, puisqu'en l'occurrence il faudrait se ponter directement sur le câble ce qui couperait la connexion.

Le tableau suivant met en relief ces divers avantages :

Support	Câble coaxial	Ondes radio	Fibres optiques
<b>Propagation</b>	Guidée	libre/dirigée	Guidée
<b>Matériau</b>	Cuivre		Silice
<b>Bande passante</b>	MHz	GHz	THz
<b>Atténuation</b>	Forte avec fréquence	Variable	très faible
<b>Sensibilité aux perturbations EM</b>	Faible	Forte	Nulle
<b>Confidentialité</b>	Correcte	Nulle	Elevée
<b>Applications</b>	Réseaux locaux haut débit, vidéo	Mobiles, satellites, Hertzien	Haut débit longues distances, réseaux locaux

**Tableau 1.1 :** Comparatif des caractéristiques de différents supports de propagation.

## 1.5 Inconvénients

La fibre n'est pas dénuée d'inconvénients. Les plus fréquemment mentionnés sont:

- la complexité de la connectique associée, la limitation en température pour certaines fibres (+85°C pour les fibres en plastique -rarement utilisées-);
- la difficulté d'éviter les désalignements des cœurs dans le cas des épissures.

**Le coût :** La fibre permet de parcourir de très grandes distances sans être obligée d'amplifier le signal. Le coût de la fibre optique ne cesse de baisser mais elle demeure beaucoup plus chère que les câbles à paires torsadées. Elle se manipule moins

facilement en cas de coupure ; En effet, lorsque la fibre est coupée, on doit la faire fondre puis la fusionner. On se doute que cela est plus compliqué que d'utiliser de simple pince avec les paires torsadées. Donc la fibre optique, malgré ces nombreux avantages, reste encore une solution adaptée selon les besoins et les moyens et non une solution de référence. [3]

## 1.6 Propagation optique

L'étude de la propagation de la lumière dans une fibre optique nécessite la résolution des équations de Maxwell qui s'écrivent :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1-1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (1-2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1-3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1-4)$$

Avec :  $\vec{E}$  : Champ électrique (V/m)

$\vec{H}$  : Champ magnétique (A/m)

$\vec{B}$  : Champ d'induction magnétique (Tesla)

$\vec{D}$  : Champ d'induction électrique (C/m<sup>2</sup>). [4]

Les composantes du champ électromagnétique sont indépendantes de y, et deux familles de solutions peuvent vérifier les équations de Maxwell, les modes TE (Transverse Electric) de composantes non nulles  $E_y$ ,  $H_x$  et  $H_z$  et TM (Transverse Magnétique) avec  $H_y$ ,  $E_x$  et  $E_z$ .

TE mode :

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + (K_0^2 n^2 - \beta^2) E_y = 0$$

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y$$

$$H_z = -\frac{1}{j\omega \mu_0} \frac{dE_y}{dx}$$

TM mode :

$$\frac{d^2 H_y}{dx^2} + (K_0^2 n^2 - \beta^2) H_y = 0$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 n^2} H_y$$

$$E_z = \frac{1}{j\omega \varepsilon_0 n^2} \frac{dH_y}{dx}$$

Avec :  $\varepsilon_0$  : permittivité du vide (F/m)

$\mu_0$  : perméabilité du vide (H/m).

Les équations différentielles, associées à des conditions aux limites au niveau des plans de séparation, conduisent à un problème de valeurs propres où les valeurs propres sont les constantes de propagation  $\beta$  élevées au carré, des modes TE et TM possibles. Les vecteurs propres sont les profils des champs correspondants.

L'indice effectif  $n_{eff} = \beta/k_0$  caractérise la propagation possible - sa vitesse (de phase) et sa forme- dans le guide étudié, en fonction de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  de l'excitation lumineuse. [5]

Dans la pratique, pour obtenir l'indice effectif pour un mode donné on doit utiliser un logiciel de simulation qui fait la résolution des équations de maxwell numériquement.

## **1.7 La fibre optique :**

Pour comprendre les phénomènes de dispersion que subit la transmission optique, on doit d'abord savoir ce qu'est la fibre optique, ce paragraphe est consacré pour l'expliquer.

### **1.7.1 Définition**

La fibre optique est un guide d'onde diélectrique qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine, souvent protégée par un revêtement. [6]

### **1.7.2 Description**

La fibre optique se présente sous forme d'un cylindre de verre de quelques dizaines de micromètres. Il existe plusieurs types de fibres mais tous sont constitués de la même façon : un milieu diélectrique appelé cœur de la fibre (core) recouvert d'un matériau appelé gaine (cladding). L'ensemble est lui-même entouré d'une enveloppe, généralement en plastique, qui a le double rôle de protéger la fibre mécaniquement et de piéger la lumière qui se propage dans la gaine optique, en général indésirable.

**(Figure 1.2).**

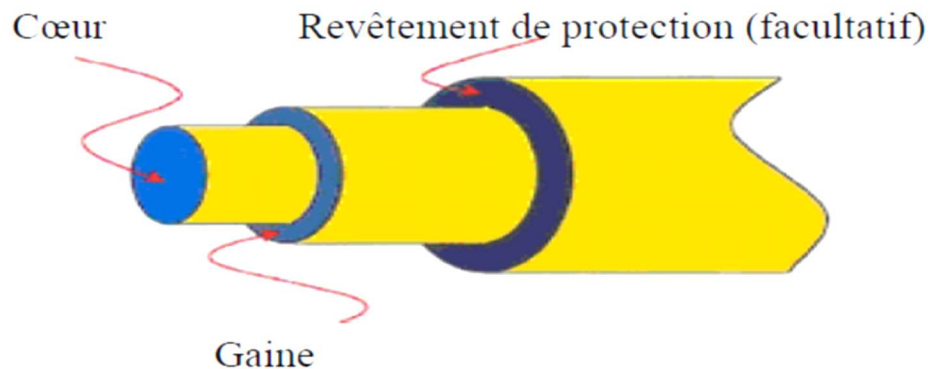
Les signaux lumineux vont transiter dans le cœur, tandis que la gaine va empêcher qu'ils ne s'échappent de la fibre. Pour ce faire, le cœur et la gaine sont fabriqués de

telle sorte qu'ils disposent d'indices de réfraction légèrement différents. L'indice de réfraction d'un matériau correspond au rapport :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-5)$$

Où:  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide ;

$v$  est la vitesse de la lumière dans le matériau étudié.



**Figure 1.2** : Structure d'une fibre optique.

### 1.7.3 Principe de guidage

L'indice de réfraction doit avoir une valeur supérieure à 1 et plus cette valeur est grande, plus la vitesse dans le matériau étudié est faible. Pour que les photons ne s'échappent pas de la fibre, l'indice de réfraction du cœur doit être légèrement plus grand que l'indice de réfraction de la gaine. Dans ce cas, lorsque le signal lumineux arrive sur la gaine avec un angle plus petit que l'angle critique, il est totalement réfléchi dans le cœur. S'il atteint la gaine avec un angle plus grand que l'angle critique, alors seule une faible partie du signal est réfléchi. L'angle critique se calcule par la formule suivante :

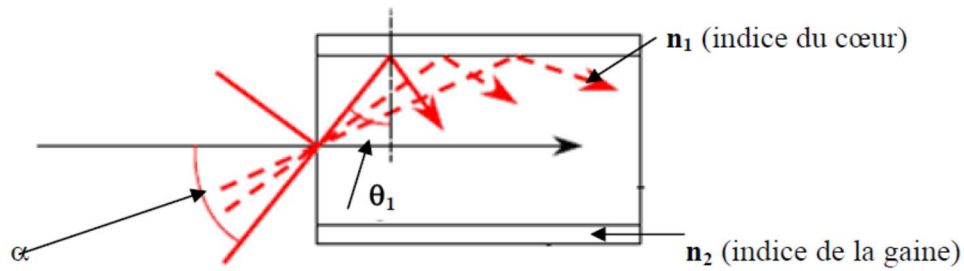
$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-6)$$

Où :

$\theta_1$  est l'angle critique (Figure 1-3);

$n_2$  est l'indice de réfraction de la gaine ;

$n_1$  celui du cœur.



**Figure 1.3 :** Propagation dans une Fibre optique.

On voit donc que l'indice de réfraction de la gaine doit être inférieur à celui du cœur et plus le rapport des indices de réfraction ( $n_2/n_1$ ) est grand, plus l'angle critique sera important. L'indice de réfraction d'un matériau (le cœur ou la gaine) peut être ajusté précisément grâce à l'adjonction de dopants dans le verre. Ces dopants vont avoir pour effet soit d'accélérer légèrement soit de ralentir la vitesse de propagation du signal dans celui-ci.

C'est l'utilisation de ces dopants qui permet d'affecter un indice de réfraction différent au cœur et à la gaine, et par la même occasion de fixer l'angle critique de la fibre en dessous duquel la réflexion totale interne du signal est assurée. [2]

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans qu'une partie du rayon optique ne traverse la gaine. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée. Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

- Le premier est **la différence relative d'indices**, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1-7)$$

- Le second est **l'ouverture numérique** de la fibre (N.A. pour Numerical Aperture). Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans qu'une partie du rayon optique ne traverse la gaine. Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre :



$$N.A = ON = \sin \alpha_{\max} = n_1 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_{1\lim} \right) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-8)$$

### 1.7.4 Modes dans une fibre

#### *a Mode de gaine :*

Un rayon incident en dehors du cône d'acceptance de la fibre frappe l'interface à un angle inférieur à l'angle critique, il peut pénétrer dans la gaine, et éventuellement se propager par réflexions totales à la surface extérieure de la gaine, donnant ainsi naissance à un mode de propagation parasite, appelé mode de gaine (cladding mode). Ces modes sont généralement rapidement atténués, mais ils peuvent néanmoins être à l'origine de perturbations sur la fibre optique. Pour les éliminer, on peut entourer la gaine d'une enveloppe dont l'indice est supérieur à celui de la gaine (on évite ainsi la réflexion totale à l'interface gaine/air).

Une telle enveloppe est appelée cladding mode stripper.

#### *b Modes de propagation*

La nature ondulatoire de la lumière, associée aux très petites dimensions des fibres optiques, ne va pas permettre aux rayons lumineux de se propager n'importe comment à l'intérieur de la fibre. Même à l'intérieur du cône d'acceptance, seuls certains angles particuliers seront admis. Chacun correspondra à ce que l'on appelle un mode de propagation. [4]

### 1.7.5 Matériau pour les fibres optiques :

Dans les fibres optiques, l'indice de réfraction du cœur  $n_1$  est légèrement supérieur à celui de la gaine  $n_2$ . Le matériau qui constitue la fibre optique est la silice  $SiO_2$ . On a deux possibilités pour avoir  $n_1 > n_2$ .

- On augmente l'indice du cœur en  $SiO_2$  en le dopant avec le germanium ( $Ge$ ) ou le phosphore.
- On diminue l'indice de la gaine en le dopant avec le bore ( $Br$ ) ou le fluor. [4]

## 1.7.6 Atténuations dans la fibre optique :

### *a Atténuation*

Les causes des pertes dans les fibres sont multiples. Il y a :

- l'absorption par les impuretés,
- la diffusion par les impuretés ou par les défauts d'interface cœur-gaine et la diffusion Rayleigh qui est la diffusion de la lumière sur les molécules du matériau (la silice),
- les courbures et les micro-courbures de la fibre,
- la diffusion et la réflexion aux épissures,

Ces effets combinés contribuent à détériorer les informations transmises dans la fibre.

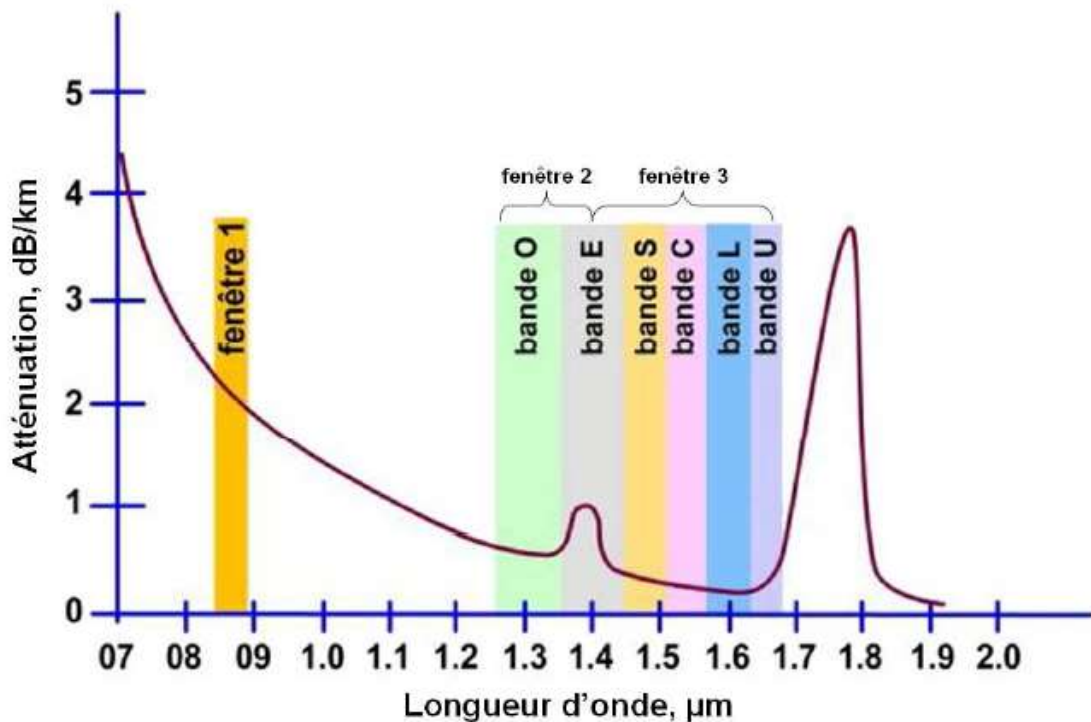


Figure 1.4 : Courbe d'atténuation de la silice incluant les fenêtres de transmission.

### *b Fenêtre de transmission*

On distingue les trois fenêtres de transmission suivantes :

- La première fenêtre de 800 à 900 nm,
- La deuxième fenêtre s'étend de 1280 à 1330 nm,

- La troisième fenêtre de 1525 à 1625 nm. Elle est constituée de deux sous bandes : Sous bande C de 1525 à 1565 nm et sous bande L de 1565 à 1625nm. [3]

La fenêtre dite conventionnelle (notée bande C) c'est La fenêtre de choix pour quasiment toutes les applications modernes, sera celle par la suite que l'on retiendra pour nos calculs.

### 1.7.7 Types de fibres optiques

Il existe deux grandes familles de fibres optiques : les fibres monomodes et multimodes. Une fibre est dite monomode si un seul chemin optique est envisageable pour la lumière et à l'inverse, une fibre est dite multimode si plusieurs chemins sont possibles.

#### *a Quelques paramètres de la fibre optique*

Nous présenterons tout d'abord deux paramètres, la fréquence normalisée et la longueur d'onde de coupure qui permettent de connaître si une fibre optique est monomode ou multimode. Puis nous introduirons la notion d'aire effective d'une fibre.

1. Un paramètre appelé fréquence réduite et noté  $v$  permet de définir la catégorie dans laquelle se situe la fibre :

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} (\sqrt{n_1^2 - n_2^2}) \quad (1-9)$$

Avec  $a$  le rayon du cœur de la fibre et  $\lambda$  la longueur d'onde

Le critère de sélection est alors très simple :

- lorsque  $V < 2,405$  la fibre (à saut d'indice) est dite monomode ou unimodale.
  - Si  $V > 2,405$ , plusieurs modes peuvent se propager, la fibre est dite multimode.
2. Pour déterminer le mode de fonctionnement de la fibre, il est donc possible de définir la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$ , longueur d'onde au delà de laquelle le régime de la fibre est monomode :

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-10)$$

Lorsque la longueur d'onde est inférieure à  $\lambda_c$ , la fibre est multimode, plusieurs modes sont guidés.

3. L'aire effective (ou surface effective) d'une fibre optique est calculée à partir de la répartition transverse du champ modal se propageant dans la fibre. Soit  $E_0$  la distribution de ce champ. Par intégration sur toute la section droite de la fibre, l'aire effective  $A_{eff}$  est définie par :

$$A_{eff} = \frac{[\iint |E_0|^2 ds]^2}{\iint |E_0|^4 ds} \quad (1-11)$$

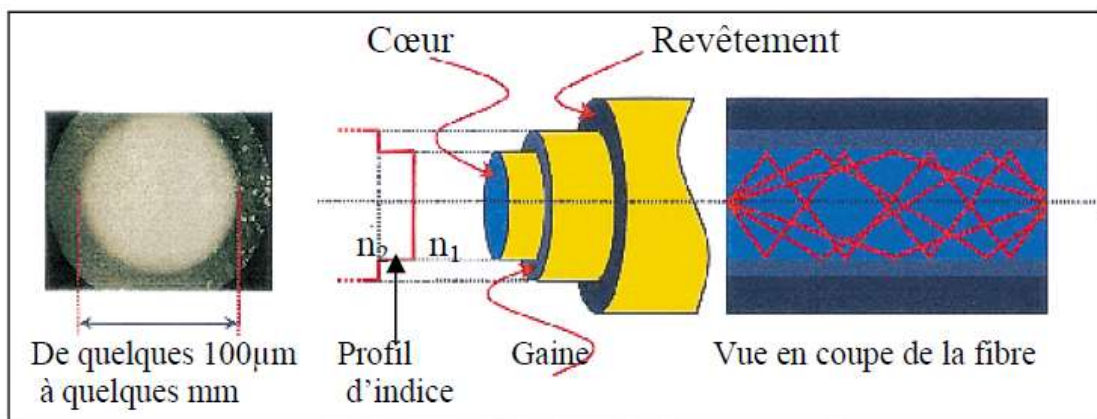
Ce terme est introduit afin d'évaluer entre autres les effets non linéaires car d'un point de vue théorique ceux-ci sont proportionnels au rapport de la puissance d'entrée sur l'aire effective. Par conséquent, pour diminuer leurs influences à puissance constante, il faut des fibres à forte aire effective. [1]

### ***b Les fibres optiques multimodales***

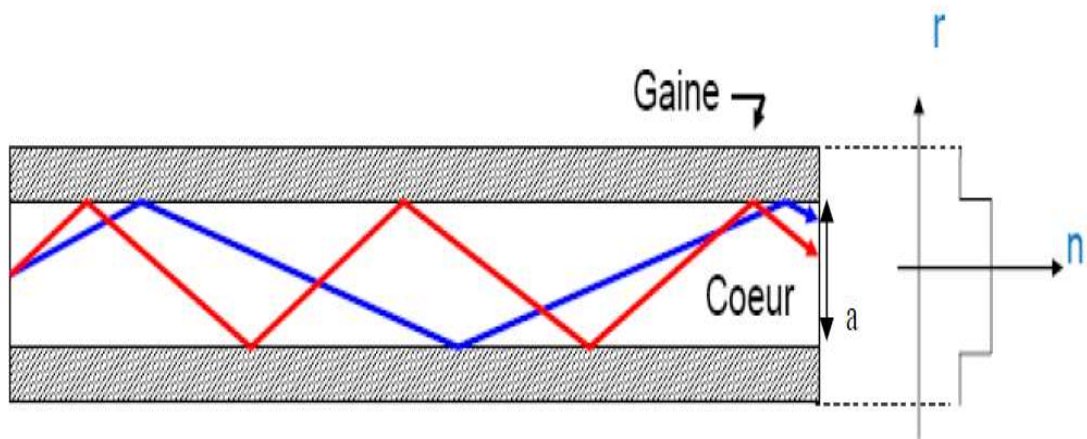
Les fibres multimodales, dans lesquelles les rayons peuvent suivre différents chemins optiques dans le cœur suivant la valeur de l'indice de réfraction ; il en existe deux types:

#### **b.1 Fibres optiques multimodes a saut d'indice**

Ces fibres sont caractérisées par un indice de cœur constant et un indice de gaine légèrement inférieur pour assurer les conditions de guidage de la lumière dans le cœur. Un faisceau lumineux qui pénètre dans le cœur de la fibre s'y propage, sous réserve de certaines conditions angulaires d'injection (définition de l'ouverture numérique), en ligne droite par principe de réflexion totale à l'interface cœur-gaine (**Figure 1.5**)



**Figure 1.5 :** Fibre optique multimodale à saut d'indice.



**Figure 1.6 :** Propagation de la lumière selon la loi de l'optique géométrique dans une fibre optique à saut d'indice.

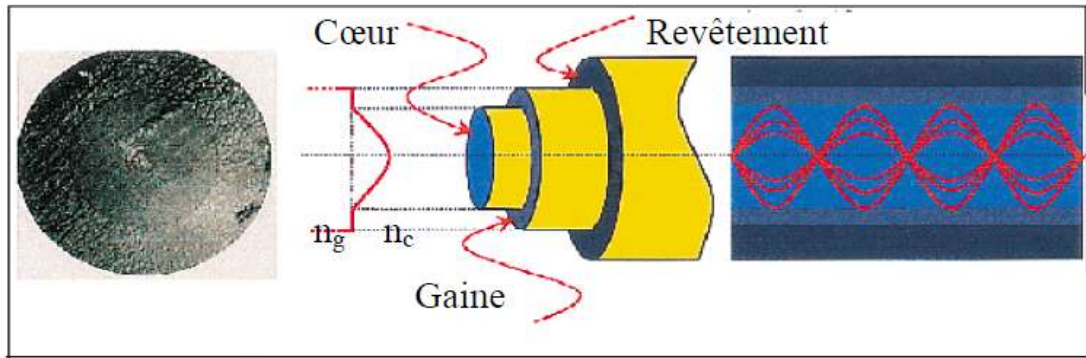
### **b.2 Fibres optiques multimodes a gradient d'indice**

Dans la fibre à gradient d'indice, la variation d'indice est beaucoup plus progressive. Les fibres à gradient d'indice sont caractérisées par une variation régulière de l'indice dans le cœur entre l'axe de propagation et l'interface cœur-gaine. Dans ces conditions, un rayon lumineux injecté à l'entrée de la fibre optique ne s'y propage plus de manière rectiligne mais suivant une trajectoire qui dépend de la variation d'indice dans le cœur (**Figures 1-7 et 1-8**). La loi de variation de l'indice du cœur est donnée par l'équation suivante:

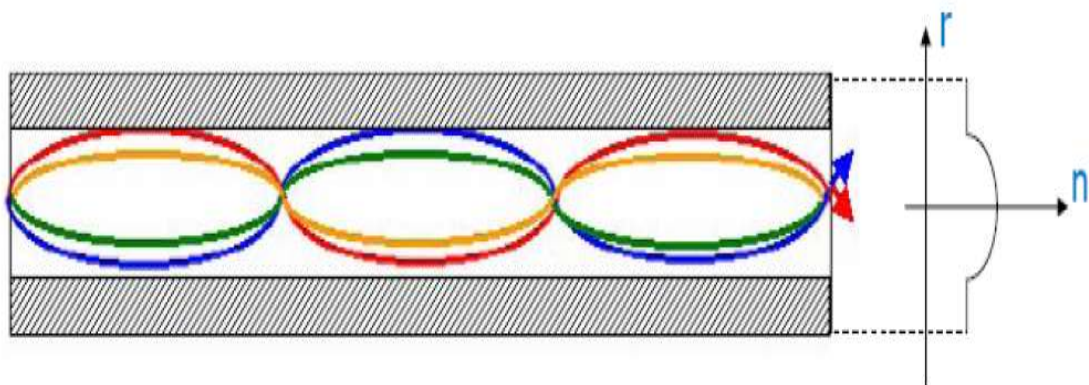
$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \quad (1-12)$$

$r$ : distance à l'axe ( $r < a$  rayon du cœur).

$\alpha$ : exposant de profil d'indice, proche de la valeur 2.



**Figure 1.7 :** Fibre optique multimodale à gradient d'indice.



**Figure 1.8 :** Propagation de la lumière selon la loi de l'optique géométrique dans une fibre optique à gradient d'indice.

### **b.3 Les caractéristiques techniques des fibres optiques multimodales**

Les fibres multimodales ont un diamètre de cœur important (de 50 à 85 microns). Un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre, à l'une de ses extrémités, se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le verre de cœur et le verre de gaine.

Quelques caractéristiques de la fibre multimode :

- Le nombre de modes  $N \approx \frac{v^2}{2}$
- A été la première utilisée.
- Est facile à utiliser (gros cœur ~ tolérances élevées) mais a une limitation intrinsèque de bande passante.
- Réservée aux courtes distances : réseaux informatiques locaux.

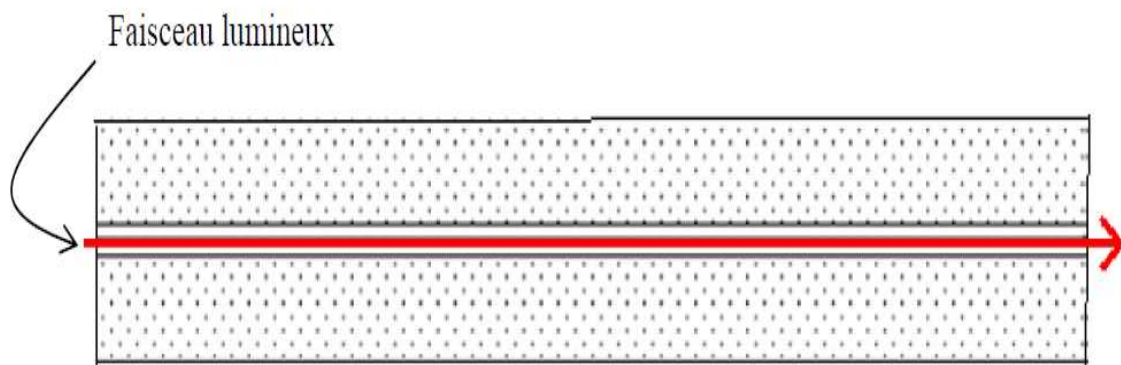
### ***c Les fibres optiques monomodes***

Si le rayon du cœur est suffisamment petit, la fibre accepte seulement le mode fondamental de propagation, ce qui est le cas des fibres monomodes.

Lorsque le diamètre de cœur est petit (moins de 10  $\mu\text{m}$ ) et la différence d'indice faible (moins de 0,5 %) il est possible de sélectionner un seul mode qui se propage au voisinage de l'axe. La condition de propagation monomode s'écrit :

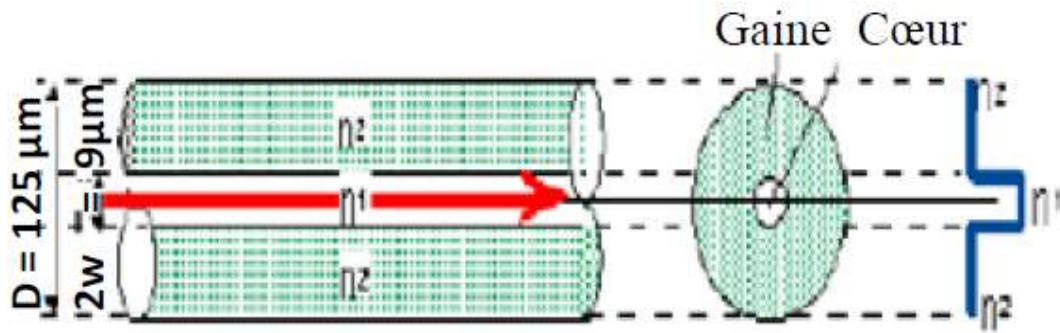
$$v < 2.405 \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405$$
$$\rightarrow \lambda > \frac{2\pi a}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \lambda_c$$

A l'heure actuelle les fibres monomodales présentent la bande passante la plus large et le niveau de pertes le plus bas, puisqu'il n'y a pas de dispersion intermodale. C'est pourquoi elles sont universellement utilisées pour la transmission de signaux à haut débit et sur de longues distances. Elles ont aussi des applications en instrumentation car elles conservent la cohérence de la lumière et, pour certains types de fibres, sa polarisation.



**Figure 1.9:** Propagation dans une fibre optique monomode.

La figure 1.10, illustre la topologie d'une fibre monomode.



**Figure 1.10 :** Topologie d'une fibre monomode.

### c.1 Les caractéristiques techniques des fibres optiques monomodes

Les fibres monomodales ont un diamètre de cœur (10 microns), faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée. L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion intermodale. Le petit diamètre du cœur des fibres monomodales nécessite l'utilisation des diodes laser comme source d'émission.

Le tableau suivant compare les caractéristiques de ces deux familles de fibres optiques et en donne les champs d'application :

Fibre unimodale	Fibre multimode
ON faible (connexion délicate)	ON forte (connexion facile)
Très faible atténuation	Faible atténuation
Faible dispersion	Forte dispersion
⇒ <i>Haut débit longues distances</i>	⇒ <i>Réseaux locaux</i>

**Tableau 1.2 :** Caractéristiques générales des fibres monomodes et multimodes avec leurs applications pratiques.



En résumé, la fibre monomodale a une bande passante pratiquement infinie (en théorie) mais requiert des composants chers et des tolérances faibles. Elle est devenue la solution universelle des systèmes de télécommunications. [2]

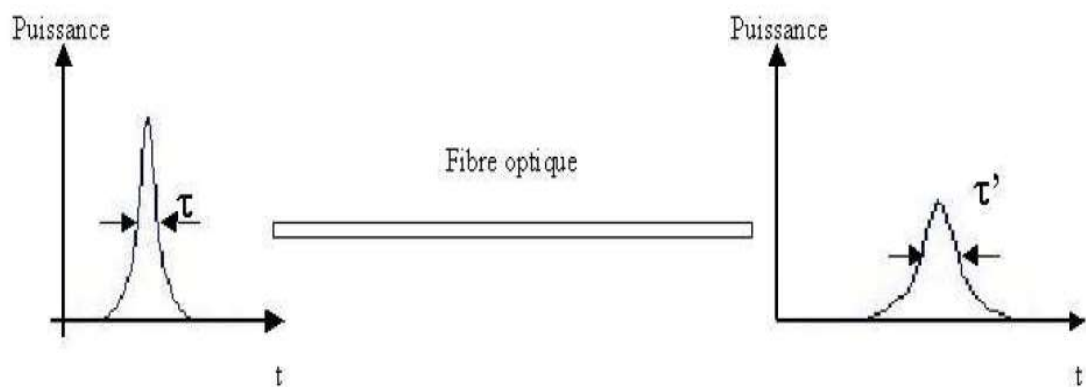
## **1.8 Conclusion**

C'est pour toutes ces raisons que la fibre est depuis de nombreuses années la technologie principale constituant les réseaux longues distances internationaux et nationaux. Elle est utilisée dans le cadre de réseaux numériques de communications sous-marines en raison de son débit et de sa portée bien supérieure aux autres types de câbles.

A la lecture de ce premier chapitre, nous pouvons dire que la fibre optique utilisée en tant que support de propagation pour la lumière est devenue un élément clé des télécommunications d'aujourd'hui.

### 2.1 Introduction

Lorsqu'une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci (figure 2.1).



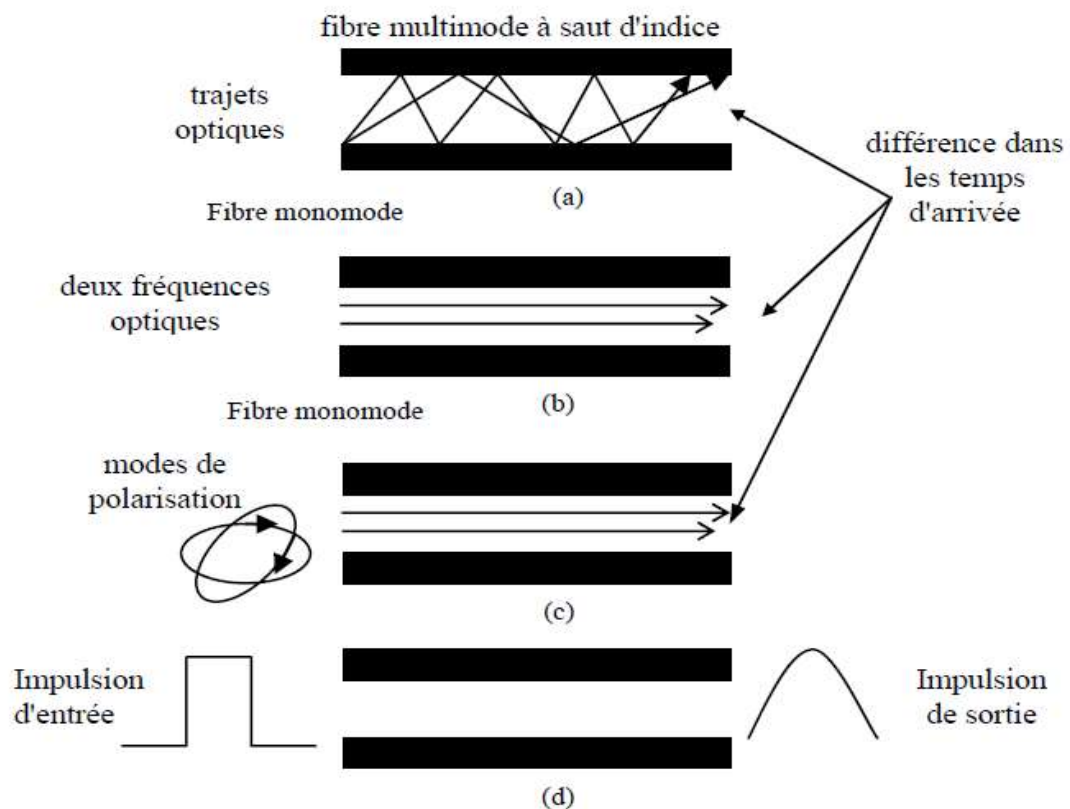
**Figure 2.1 :** Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.

Toutes les formes de dispersion dégradent la phase des signaux lumineux modulés, entraînant par la suite la réduction de la capacité du transport de l'information par l'élargissement de l'impulsion émise dans les réseaux numériques ou bien par la distorsion des systèmes analogiques. Les concepteurs des systèmes de transmission à fibres optiques doivent confronter trois types de dispersion, illustrés dans la **figure 2.2.**

- La dispersion intermodale, limitant le débit des données dans les systèmes utilisant la fibre multimode, est causée par le fait que le signal lumineux se

divise en plusieurs modes qui empruntent des trajets de distance légèrement différente.

- La dispersion chromatique est présente dans les fibres monomodes et multimodes. Elle résulte de la variation du temps de propagation avec la longueur d'onde. Ce type de dispersion est une interaction de deux types de dispersion : la dispersion matérielle et la dispersion du guide.
- la dispersion de polarisation : La dispersion modale de polarisation (PMD) est exprimée en  $\text{ps/km}^{1/2}$  et caractérise l'étalement du signal. Ce phénomène est dû à des défauts dans la géométrie des fibres optiques qui entraînent une différence de vitesse de groupe entre les modes se propageant sur différents axes de polarisation de la fibre. [6]



**Figure 2.2** : Différentes représentations des dispersions dans la fibre:

- a) dispersion intermodale, b) dispersion chromatique, c) dispersion de polarisation,  
d) effet de la dispersion sur l'impulsion d'entrée.

## 2.2 Définitions

Le temps de groupe, ou délai de groupe  $t_g$ , est défini comme étant le temps nécessaire pour qu'une impulsion se propage dans une fibre de longueur  $L$ .

$$t_g = \frac{L}{V_g} \quad (2-1)$$

Où  $V_g$ , la vitesse de groupe associée, est définie par :

$$V_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (2-2)$$

Avec  $\omega$ , la pulsation et  $\beta$  la constante de propagation axiale, projection sur l'axe de propagation du module du vecteur d'onde  $k$  dont la définition est la suivante :

$$\|\vec{K}\| = n_1 \|\vec{K}_0\| = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \quad (2-3)$$

Avec  $\vec{K}_0$  vecteur d'onde dans le vide,

Et

$$\beta = K_0 n_1 \cos(\theta) = n_1 \frac{\omega}{c} \cos(\theta) \quad (2-4)$$

Si on travaille à une pulsation  $\omega$  autour de  $\omega_0$ , on peut déterminer  $t_g$  par son développement limité :

$$t_g = L \left[ \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} + (\omega - \omega_0) \left. \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \right] \quad (2-5)$$

Tel que :

- le premier terme est une constante pour un mode donné, mais change d'un mode à l'autre ; on l'appelle la dispersion intermodale qui est évidemment nulle dans une fibre monomode.
- le deuxième terme représente la dispersion chromatique due aux différents temps de propagation des composantes spectrales de l'impulsion. [1]

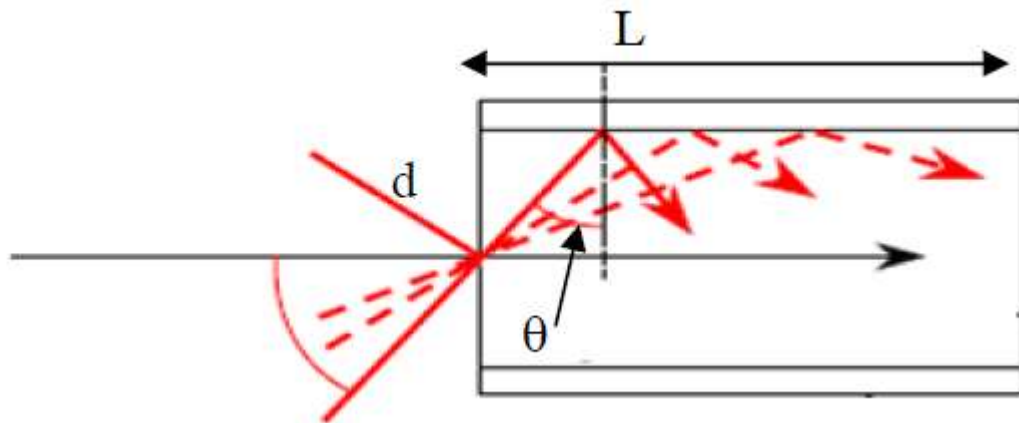
## 2.3 Dispersion intermodale

La cause principale de l'élargissement des impulsions dans les fibres optiques multimodes est la dispersion intermodale. Cet élargissement est provoqué par les différences des temps de parcours des rayons (ou des modes). La dispersion intermodale  $D_i$  est l'élargissement temporel maximum d'une impulsion par unité de longueur de fibre.

$$D_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \text{ (Ps/Km)} \quad (2-6)$$

Avec  $t_{max}$  et  $t_{min}$  respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide.

Dans une fibre à saut d'indice, le rayon le plus rapide est celui dont le trajet est parallèle à l'axe de la fibre.



Avec

$$d = \frac{L}{\sin \theta} \quad \text{et donc} \quad t = \frac{n_1}{c} \frac{L}{\sin \theta}$$

On exprime la dispersion intermodale par :

$$D_i = \frac{n_1 \Delta}{c} \quad (2-7)$$

Avec  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$  différence relative d'indice.

$c$  : la vitesse de la lumière dans le vide.

L'obtention d'une dispersion intermodale réduite se fait en minimisant  $\Delta$  ou en utilisant une fibre à gradient d'indice. En effet, dans ce cas là, l'indice de réfraction  $n_1$

du cœur décroît avec le rayon de celui-ci de sorte que les rayons axiaux (à trajet court) voient un indice élevé (leur vitesse  $c/n$  est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas (vitesse accrue). [2]

Dans le cas d'une fibre optique monomode, cette dispersion est nulle et ne sera donc pas prise en compte.

## **2.4 Dispersion chromatique**

### **2.4.1 Introduction**

L'absence de différence de temps de propagation entre modes ne suffit pas à remédier à tout phénomène d'élargissement des impulsions lumineuses car il convient de prendre aussi en considération les phénomènes de dispersion chromatique liés à la largeur spectrale de la source.

En effet, le matériau et la structure guidante dans laquelle se propage la lumière, présentent des comportements différents en fonction des diverses composantes spectrales de la source.

### **2.4.2 Les causes de la dispersion chromatique dans les fibres**

La dispersion chromatique d'un mode d'une fibre résulte de la combinaison de deux contributions :

#### ***a Dispersion du matériau***

$D_{\text{mat}}$  (dispersion du matériau) : Elle résulte du fait que la silice qui compose majoritairement la fibre optique, possède un indice optique, l'indice de réfraction, qui varie en fonction de la longueur d'onde. Cette dépendance de l'indice en fonction de la longueur d'onde induit une modification de l'indice de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide. [1]

La dispersion du matériau s'écrit alors :

$$D_{\text{mat}} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad [\text{ps}/(\text{nm.km})] \quad (2-8)$$

Avec :  $n$  l'indice du matériau.

Nous nous intéressons à la dispersion de la silice qui est le matériau utilisé pour fabriquer les fibres optiques.

Les propriétés optiques d'un matériau diélectrique transparent comme la silice sont dépendantes de la fréquence optique du rayonnement qui le traverse. La dispersion chromatique est la dépendance en pulsation de l'indice de réfraction linéaire  $n(\omega)$ , traduisant la présence des bandes de résonance de la silice dans l'ultraviolet et l'infrarouge lointain. Loin des résonances du matériau, l'indice de réfraction peut s'exprimer à partir de l'équation de Sellmeier :

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (2-9)$$

Avec  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , donc notre équation peut s'écrire aussi sous la forme:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \quad (2-10)$$

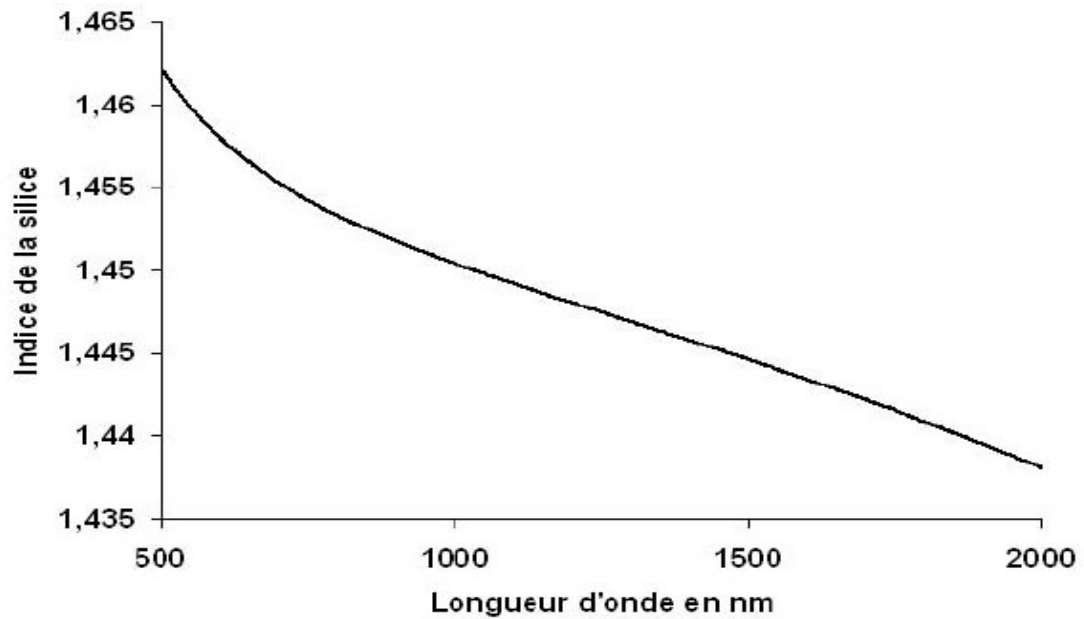
Où  $\lambda$  est en micromètres.

Pour la propagation de la lumière visible et proche infrarouge dans la silice, la solution de l'équation (2-10) par les mesures expérimentales de l'indice de réfraction pour  $m = 3$  donne :

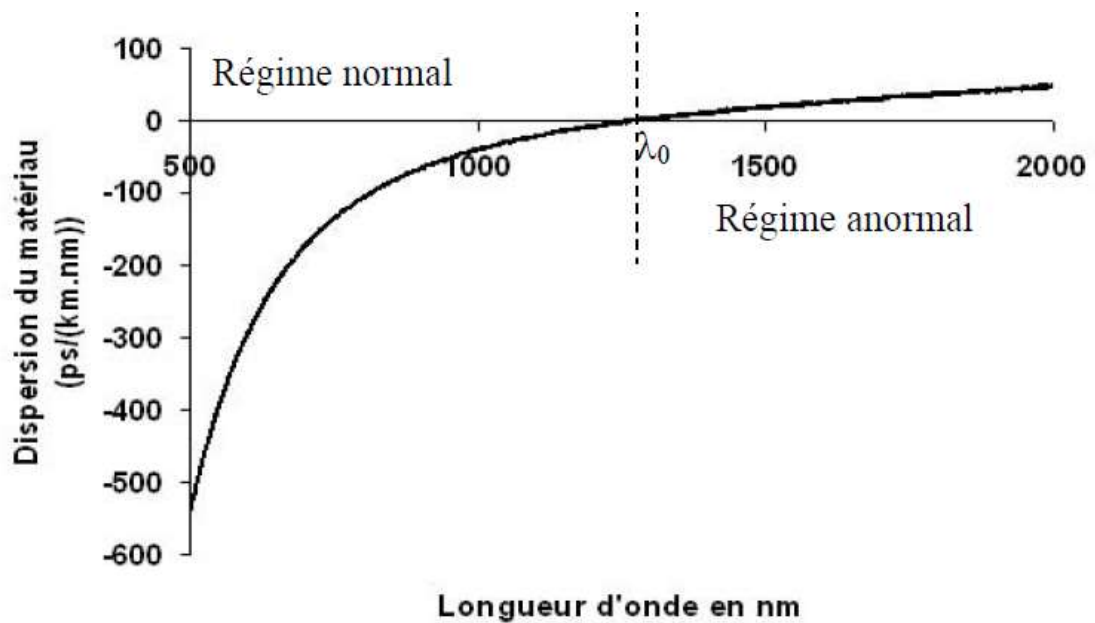
$$B_1 = 0.69616630, B_2 = 0.40794260, B_3 = 0.89747940.$$

$$\text{Et } \lambda_1 = 0.06840430\mu\text{m}, \lambda_2 = 0.11624140\mu\text{m}, \lambda_3 = 9.896161\mu\text{m}.$$

La figure 2.3 illustre les variations spectrales de l'indice de la silice, entre 500 et 2000 nm. La dispersion du matériau correspondante est représentée sur la figure 2.4.



**Figure 2.3 :** variation spectrale de l'indice de la silice.



**Figure 2.4 :** dispersion de la silice.

La dispersion de la silice est une fonction continûment croissante. Elle est fortement négative aux courtes longueurs d'onde car la courbure de l'indice est significative dans cette zone spectrale. Elle s'annule pour  $\lambda = 1,27 \mu\text{m}$ . A  $1,55 \mu\text{m}$ , elle vaut  $22 \text{ ps}/(\text{km.nm})$ . [7]



### ***b Dispersion du guide***

$D_{\text{guide}}$  (dispersion du guide) : Elle résulte du fait que les ondes se propagent dans un guide d'onde et non dans un milieu illimité ce qui leur donne un indice effectif dépendant de la longueur d'onde ; cette influence du guidage entraîne une nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de propagation.

La dispersion du guide s'écrit :

$$D_{\text{guide}}(\lambda_0) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda_0^2} \quad [\text{ps}/(\text{nm.km})] \quad (2-11)$$

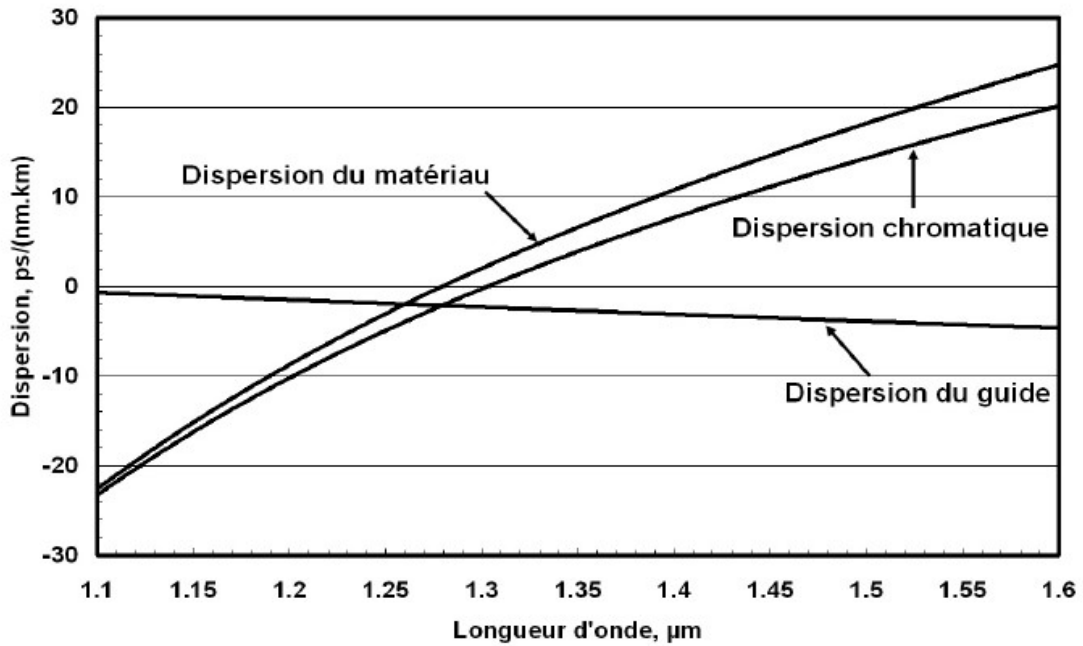
La dépendance spectrale de  $n_{\text{eff}}$  (l'indice effectif), prend en effet en compte l'influence du guidage via le lien entre  $n_{\text{eff}}$  et la constante de propagation  $\beta$ , ( $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$ ).

La dispersion chromatique  $D_{ch}$  d'un mode d'une fibre résulte des deux contributions que nous venons de décrire. En négligeant la contribution croisée du matériau et du guide à la dispersion chromatique on peut écrire :

$$D_{ch} = D_{\text{mat}} + D_{\text{guide}} \quad (2-12)$$

Le paramètre de dispersion chromatique ( $D_{ch}$ ) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1km, on le donne généralement en ps/(nm.km), les picosecondes correspondant à l'élargissement temporel, les nanomètres à la largeur spectrale et les kilomètres à la longueur de fibre. [1]

On a représenté sur la Figure 2.5 la dispersion de la silice (déjà présentée) ( $D_m$ ), la dispersion du guide pour le mode fondamental d'une fibre à saut d'indice ( $D_g$ ), et la dispersion chromatique ( $D_{ch}$ ) de ce mode correspondant à la somme des deux premières. La dispersion du guide légèrement négative fait que la longueur d'onde d'annulation de la dispersion chromatique (1,3  $\mu\text{m}$ ) est légèrement supérieure à la longueur d'onde d'annulation de la dispersion du matériau (1,27  $\mu\text{m}$ ). Dans la fenêtre de plus faible atténuation des fibres, à 1,55  $\mu\text{m}$ , la dispersion chromatique du mode fondamental d'une fibre à saut d'indice en régime monomode est typiquement de 17 ps/(km.nm).



**Figure 2.5 :** Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre unimodale standard.

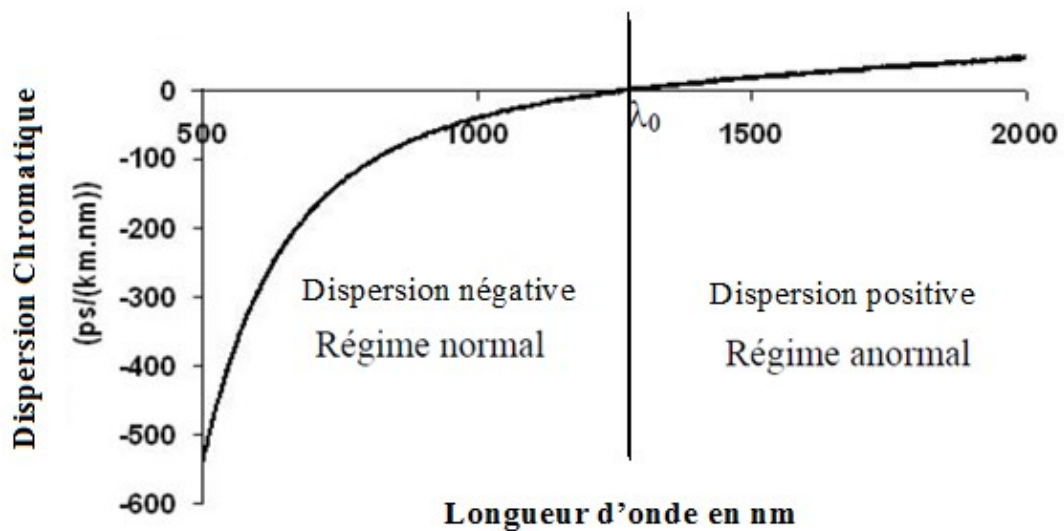
Dans une fibre unimodale standard de type SMF-28, la dispersion chromatique à  $1,55\mu\text{m}$  est de l'ordre de  $16,5\text{ps}/(\text{nm.km})$  et nulle autour de  $1,3\mu\text{m}$  d'après la norme ITU-T G.652. [3]

Considérons deux paquets d'onde  $p_1$  et  $p_2$  dont les spectres sont centrés respectivement autour de  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  proches, avec  $\lambda_2 < \lambda_1$ . Leurs vitesses de groupe respectives sont

$V_g(\lambda_1)$  et  $V_g(\lambda_2)$ . Une dispersion chromatique positive traduit le fait que le temps de groupe du paquet  $p_1$  est plus grand que celui du paquet d'onde  $p_2$ , c'est-à-dire que

$V_g(\lambda_1) < V_g(\lambda_2)$ . Inversement  $V_g(\lambda_1)$  est supérieure à  $V_g(\lambda_2)$  avec  $\lambda_2 < \lambda_1$  lorsque la dispersion chromatique est négative.

Comme cette situation est celle qui prévaut dans le visible, c'est celle qui a été observée en premier. La dispersion négative est appelée "dispersion normale", par opposition à la dispersion positive observée plus tard dans l'infrarouge qui avait été qualifiée "d'anormale". [2]



**Figure 2.6 :** Dispersion chromatique d'une fibre standard.

### 2.4.3 La pente de dispersion chromatique

Sachant que les systèmes du WDM travaillent sur toute une bande de longueur d'onde, il est primordial de connaître l'évolution de la dispersion chromatique sur tout le spectre. C'est pourquoi une caractéristique importante pour ces réseaux est la valeur de la pente de dispersion chromatique. Elle est exprimée en  $\text{ps}/(\text{nm}^2.\text{km})$ . Des gros efforts de conception sont mis en œuvre pour gérer ce phénomène de plus en plus critique avec la montée en débit. [3]

## 2.5 La compensation de la dispersion chromatique

Les réseaux de télécommunication installés utilisent des fibres optiques monomodes optimisées à 1310 nm, longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est nulle, mais qui travaillent à 1550 nm, longueur d'onde pour laquelle elles présentent une dispersion chromatique de l'ordre de 17  $\text{ps}/(\text{nm.km})$ . Afin de pouvoir garantir des débits de communication importants, il est donc indispensable de compenser cet élargissement temporel par l'ajout, au sein du réseau, de systèmes actifs ou passifs.

La SSF (Standard Single Mode Fiber) limite la distance de transmission pour une longueur d'onde de 1550 nm à moins de 100 km pour des réseaux fonctionnant à un débit de 10 Gbit/s. Pour des systèmes WDM ayant le même débit mais des distances plus grandes, on doit non seulement compenser la dispersion chromatique mais aussi

la pente de cette dispersion. Il en est de même pour les lignes dont le débit est de 40 Gbit/s ou plus [2].

De nombreuses techniques peuvent être employées. Nous allons présenter quelques unes des méthodes les plus utilisées dans les applications WDM.

### **2.5.1 Les différentes solutions**

Dans cette partie nous avons cherché dans la littérature quelles sont les principales méthodes qui permettent de compenser la dispersion chromatique afin de dresser un tableau comparatif. Leur fonctionnement ne fera pas l'objet d'études détaillées. Pour plus de détails le lecteur pourra se reporter aux références [1], [2] et [8]. Six manières différentes de compenser la  $D_{ch}$  se distinguent avec plus ou moins d'attrait pour les applications du WDM :

Les méthodes de Compensation	La mise en Œuvre	Infrastructure existante	La compensation/ aspect WDM
Réseau de Bragg Photoinscrit (chirpé ou à pas variable)	Simple mais problème de la dérive en température	utilisable	Compenser 1 $\lambda$ . Compenser plusieurs $\lambda$ sur 10nm, sur 25nm, pour le haut débit
Tableau cohérent d'image virtuelle (VIPA)	Structure du VIPA Complexe	utilisable	Compenser plusieurs $\lambda$ sur 50nm à 10Gbit/s, sur bande C et L à 40Gbit/s
Conjugaison des phases optiques (OPC)	Convertisseur basé sur un mélangeur à 4 ondes à insérer	utilisable	Compenser 1 $\lambda$ ou plusieurs sur 12nm à 40Gbit/s
Conversion modale (LP <sub>11</sub> , LP <sub>02</sub> )	Convertisseur modal à insérer + bonne connaissance des longueurs de fibres	utilisable	Compensation à 20Gbit/s, 10nm à 10Gbit/s, 15,6nm à 10Gbit/s sur 9072km
Fibre travaillant sur le mode fondamental	Simple mais insertion de la fibre compensatrice (notion d'A <sub>eff</sub> importante)	utilisable	Compenser 1 $\lambda$ ou plusieurs sur 30nm à 40Gbit/s, sur toute la Bande C Dch »- 800ps/(nm.km)

**Tableau 2.1** : Comparatif des différentes méthodes de compensation.

A la vue de ce tableau, il ressort que l'insertion d'une fibre compensatrice travaillant sur le mode fondamental permet assez aisément de limiter la Dch des fibres de ligne. Sa simplicité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux éléments extérieurs (pas besoin d'asservissement) sont des atouts majeurs. C'est pourquoi aujourd'hui, cette solution est très clairement celle qui est retenue dans les systèmes. Il faut aussi remarquer que l'utilisation des autres méthodes peut être couplée à cette dernière de façon à accroître les performances : exemple d'une amélioration de 50% de la

transmission grâce à l'ajout en entrée d'une conjugaison de phase optique dans un système 40Gbit/s de 4800km.

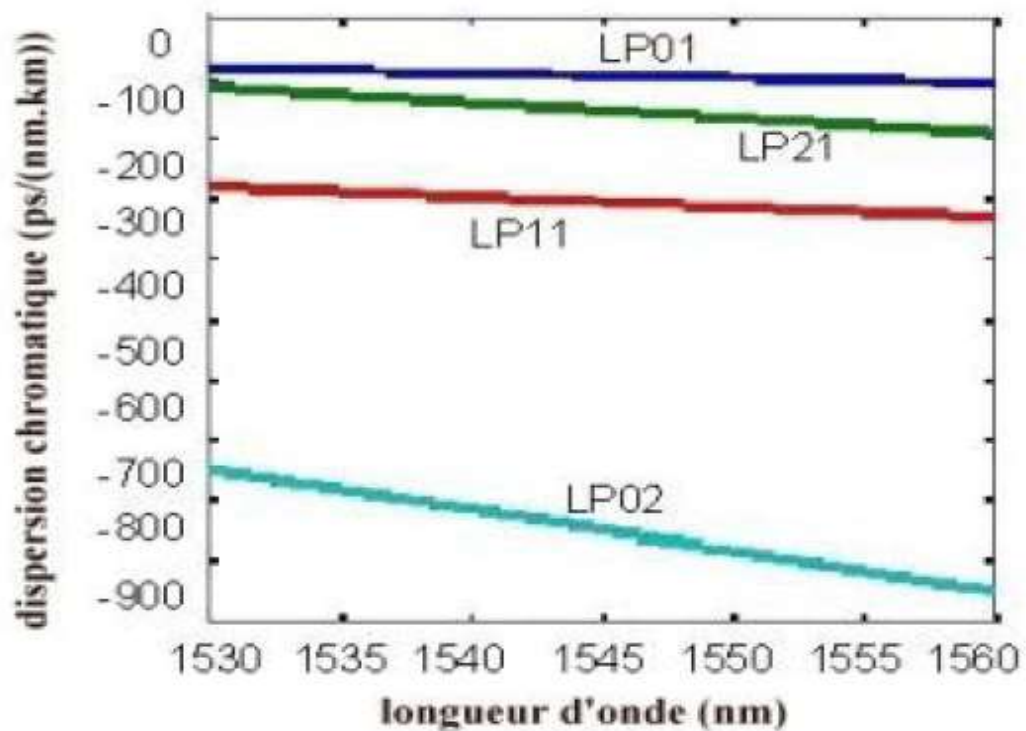
### **2.5.2 La solution retenue pour l'étude**

Parmi les différentes techniques permettant de corriger le phénomène de la dispersion, j'ai opté pour la solution innovante « fibre compensatrice » communément appelée DCF (pour Dispersion Compensating Fiber).

Ce sont des fibres qui sont conçues pour avoir de fortes dispersions négatives grâce à des modifications de leurs paramètres opto-géométriques. On peut utiliser aussi bien le mode fondamental que des modes d'ordre supérieur.

#### ***a Fibre utilisant un mode d'ordre supérieur***

Les modules de compensation de dispersion par mode d'ordre supérieur (HOM-DCF pour Higher-order-mode Dispersion Compensating Fiber) utilisent la propriété de forte dispersion négative des modes d'ordre élevés se propageant dans une fibre optique (figure 2.7). La propagation du signal est réalisée par un mode d'ordre supérieur et pas par le mode fondamental. Cette technique permet d'obtenir une grande pente de dispersion relative  $P$  (par exemple  $P = -5,4 \text{ ps/nm}^2$  au lieu de  $-1,4 \text{ ps/nm}^2$  dans le cas d'une fibre compensatrice de dispersion utilisant le mode fondamental).



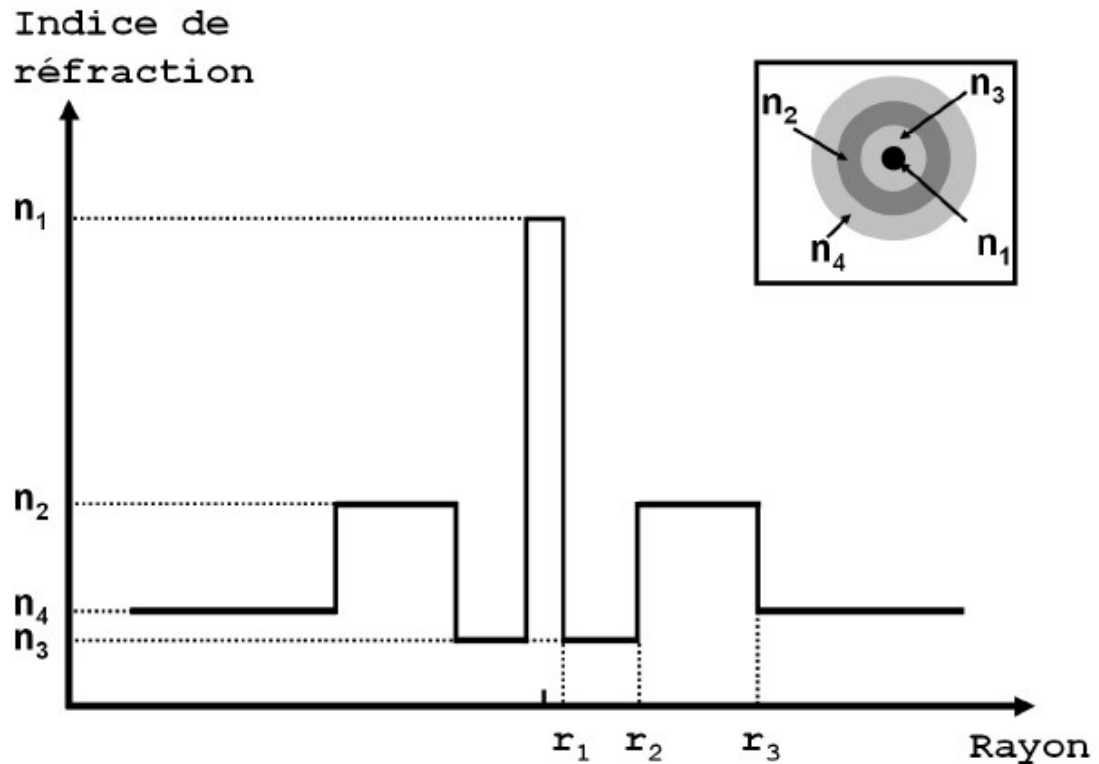
**Figure 2.7 :** Dispersion chromatique d'un compensateur de dispersion HOM utilisant le mode  $LP_{02}$ .

Cependant, ne travaillant pas au mode fondamental, cette technologie nécessite l'ajout de convertisseurs de modes en entrée et sortie, ce qui augmente le coût du module de compensation aussi bien que ses pertes de puissance.

#### ***b Fibre utilisant le mode fondamental***

Dans le but d'accroître les performances des DCF en termes de valeur de  $D_{ch}$ , nous allons travailler sur une structure de fibre particulière : une fibre à deux cœurs concentriques.

Il est possible, par l'emploi de fibres à profil d'indice de réfraction particulier, comme les fibres à deux cœurs concentriques (figure 2.8) d'obtenir à une longueur d'onde donnée une dispersion chromatique fortement négative (appelée longueur d'onde d'accord de phase).

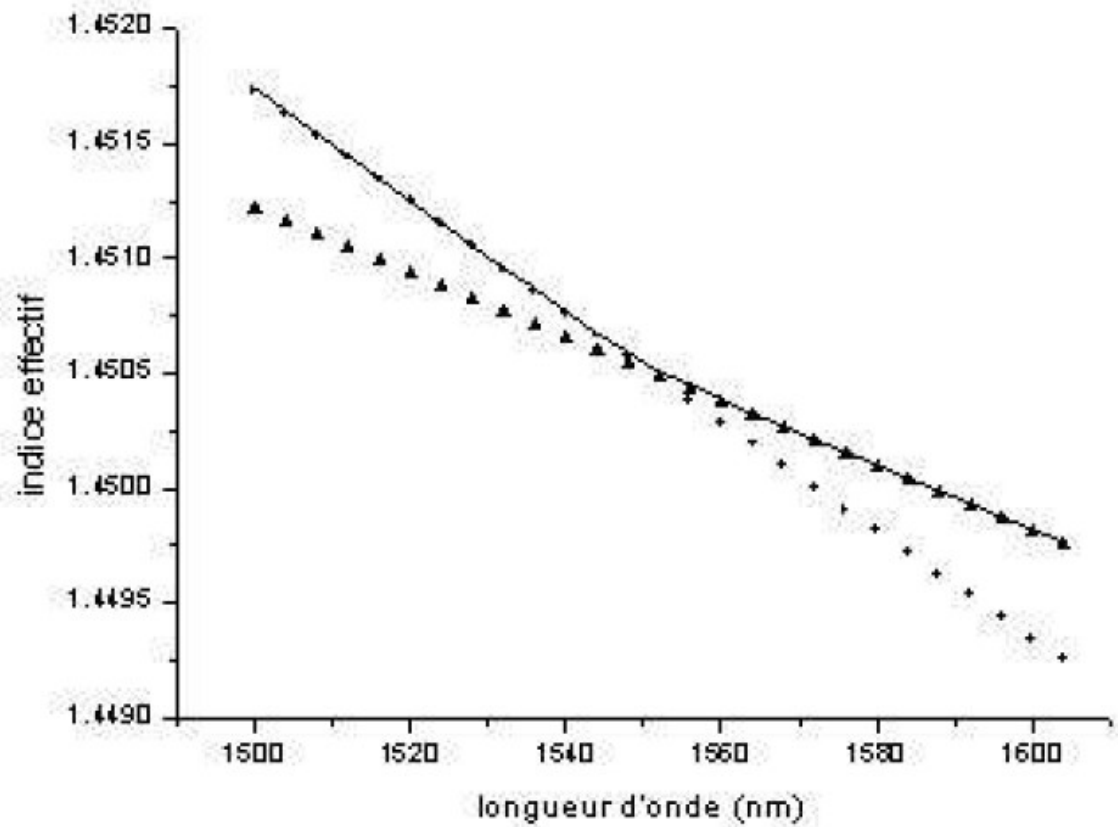


**Figure 2.8** : Profil d'indice de réfraction idéal d'une fibre à deux cœurs concentriques.

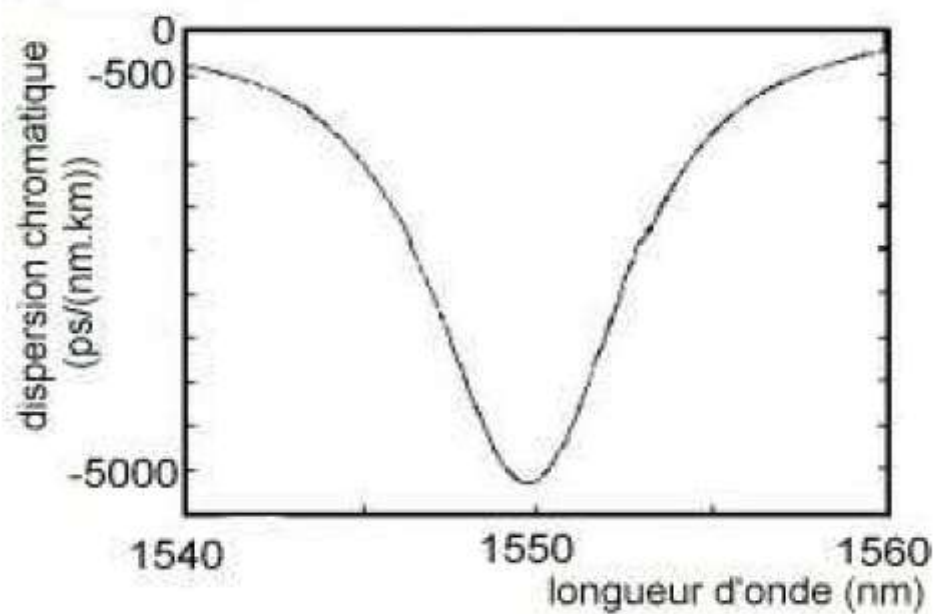
Ces fibres présentent un cœur central de faible rayon, dont l'indice de réfraction est important, et un cœur externe annulaire plus large entourant le premier et d'indice beaucoup plus faible. Cette forte dissymétrie entre les deux cœurs constituant la fibre optique est essentielle car elle permet d'obtenir un comportement singulier de la fibre.

La figure 2.9 représente les évolutions des indices effectifs du mode du guide élémentaire formé par le cœur central et la gaine (points) et du mode de la structure composée par le cœur externe et la gaine (triangles). On constate que les indices effectifs de ces deux modes sont égaux à une longueur d'onde donnée. Il y a couplage entre les deux modes. Selon une approche supermodale, le mode fondamental de la structure complète (trait plein) est une combinaison des modes des deux structures élémentaires. L'indice effectif de ce mode subit une très forte inflexion autour de la longueur d'onde de couplage.





**Figure 2.9 :** Évolution de l'indice effectif du mode de la structure (trait plein) en fonction de la longueur d'onde



**Figure 2-10:** Évolution de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde dans le cas d'une fibre à deux cœurs concentriques.

La dispersion chromatique qui intervient comme la dérivée seconde de l'indice effectif du mode de la structure est alors fortement négative à 1550 nm (figure 2-10).

Ce type de profil permet donc d'obtenir théoriquement une dispersion chromatique fortement négative de l'ordre de  $-5000 \text{ ps}/(\text{nm.km})$  et sera étudié de manière approfondie dans les chapitres suivants.

### **2.5.3 Des exemples d'association fibre de ligne / fibre compensatrice travaillant sur le mode fondamental**

Nous allons regarder plus en détail cette technique notée DCF qui consiste à introduire dans une liaison un tronçon de fibre produisant une dispersion chromatique de signe opposée à la fibre de ligne (SMF ou NZ-DSF). Etant donné que la dispersion chromatique d'une fibre varie avec la longueur d'onde (variation appelée pente de la Dch), il n'est pas possible de ramener la dispersion chromatique cumulée à zéro périodiquement, simultanément sur toute une bande de plusieurs nanomètres en ajoutant simplement une seule et même valeur négative. Afin de résoudre ce problème, ce nouveau type de fibre appelé DCF (ou RDF pour Reverse Dispersion Fiber) est apparu dans la littérature.

La caractéristique principale de ces fibres est de présenter une dispersion chromatique et une pente de Dch de signe opposé à celui de la fibre de ligne.

L'idée est alors de combiner les deux fibres en utilisant le bon rapport de longueur donné par :

$$K = \frac{L_{\text{Fibre de Ligne}}}{L_{\text{DCF}}} = \left| \frac{D_{ch\text{DCF}}}{D_{ch\text{Fibre de Ligne}}} \right| \quad (2-13)$$

La dispersion chromatique totale (ou cumulée) notée  $D_{chT}$  est alors définie par :

$$D_{chT} = D_{ch\text{Fibre de Ligne}} L_{\text{Fibre de Ligne}} + D_{ch\text{DCF}} L_{\text{DCF}} \quad (2-14)$$

Cette valeur doit être ramenée à zéro (ou autour d'une valeur faiblement positive) avec une variation minimale (appelée aussi Dch résiduelle) en fin de chaque section

pour toutes les longueurs d'ondes de la bande étudiée. On comprend bien alors la nécessité d'obtenir une valeur de  $D_{ch}$  la plus négative possible pour limiter la longueur de fibre compensatrice à insérer. La grandeur RDS (pour Relative Dispersion Slope) a alors été introduite pour traduire l'efficacité de la compensation large bande. Elle est calculée généralement à  $\lambda=1,55\mu\text{m}$  et définie par :

$$RDS = \frac{\text{pente de la dispersion chromatique}}{\text{valeur de la dispersion chromatique}} \quad (2-15)$$

Pour une bonne compensation il faut respecter le rapport de longueur mais aussi vérifier l'équation suivante :

$$RDS_{\text{Fibre de Ligne}} = RDS_{DCF} \quad (2-16)$$

La figure 2.11 nous donne l'évolution spectrale de la dispersion chromatique du mode se propageant dans la fibre à deux cœurs concentriques. On peut voir que dans la bande C, la dispersion chromatique peut être approximée par une droite (figure 2.12). Celle-ci a une pente de l'ordre de  $-0,52 \text{ ps}/(\text{nm}^2.\text{Km})$  soit 9,4 fois plus grande que celle de la fibre monomode standard ( $0,055 \text{ ps}/(\text{nm}^2.\text{Km})$ ). Ce rapport des valeurs des pentes est identique à celui des valeurs de dispersion. Si on utilise 1 km de cette fibre à deux cœurs concentriques pour compenser 9,4 km de fibre monomode standard, on obtient une dispersion résiduelle sur l'ensemble de la bande C inférieure à  $0,02 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ . [1]

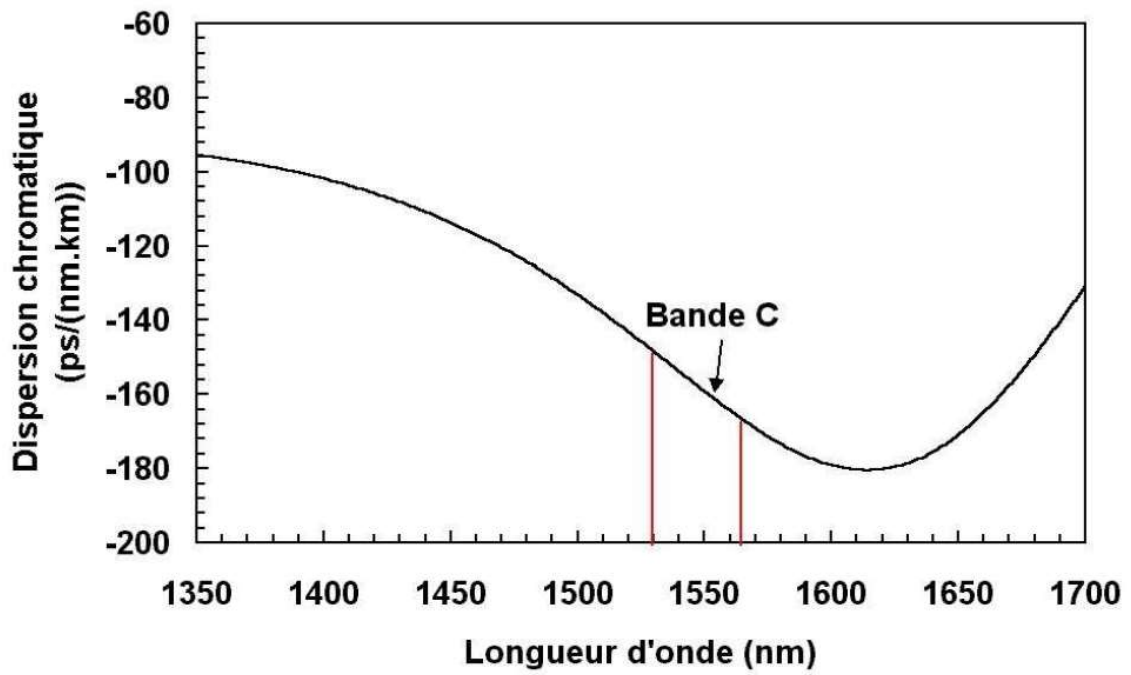


Figure 2.11 : Évolution spectrale de la dispersion chromatique.

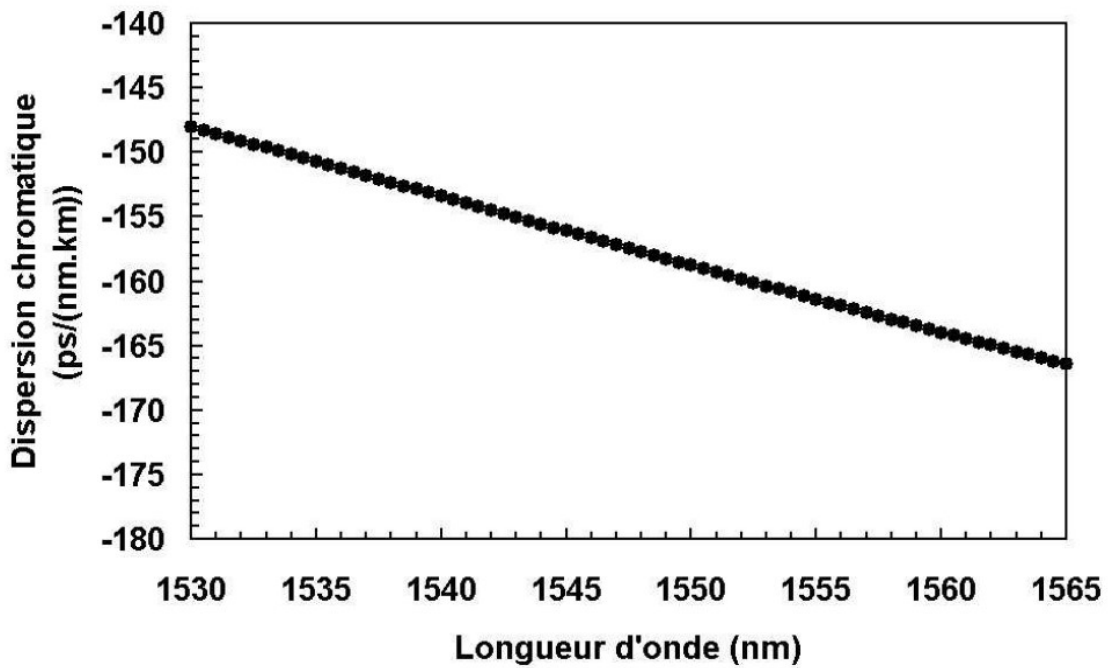


Figure 2.12 : Dispersion chromatique sur la bande C.

De plus, il est nécessaire de limiter les pertes de propagation pour obtenir de fortes figures de mérite (notées FOM) définies à une longueur d'onde par :

$$FOM = \frac{\text{dispersion chromatique}}{\text{pertes de propagation}} \text{ [ps / (nm.dB)]} \quad (2-17)$$

## 2.6 Conclusion

Dans cette partie on a vu d'abord que la dispersion chromatique est causée par deux effets dispersifs : la dispersion du guide et celle du matériau. On a vu aussi qu'elle est positive pour les longueurs d'ondes usuelles pour les transmissions optiques, cela veut dire que les plus petites longueurs d'ondes se propagent plus vite et causent un élargissement des impulsions émises, ce qui limite le débit (et/ou la longueur de la fibre à utiliser) à une certaine valeur, pour éviter leurs chevauchement. Cela oblige à chercher de différentes techniques pour la compenser.

Les efforts dans le domaine des télécommunications optiques pour réduire les effets des différentes dispersions ont donné naissance à de multiples techniques de contrôle et de compensation. Ces techniques diffèrent l'une de l'autre et chacune a ses avantages et inconvénients. Après comparaison, nous avons choisi de retenir l'insertion d'une fibre à deux cœurs concentriques que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

## Chapitre 3 Simulations et Interprétations des résultats

---

### 3.1 Introduction

La méthode expérimentale est très coûteuse, les outils de simulation et modélisation constituent une solution très intéressante et très économique.

Afin de simuler la dispersion chromatique des fibres optiques, nous choisissons un outil de simulation basé sur les éléments finis compatible avec Matlab, COMSOL Multiphysics.

Nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour déterminer les caractéristiques de la fibre suivantes :

- les modes guidés présents,
- leur indice effectif,
- la forme des champs,

### 3.2 Présentation générale de COMSOL Multiphysics

Le logiciel Comsol Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques (l'électrostatiques, électromagnétiques, thermiques...etc.)

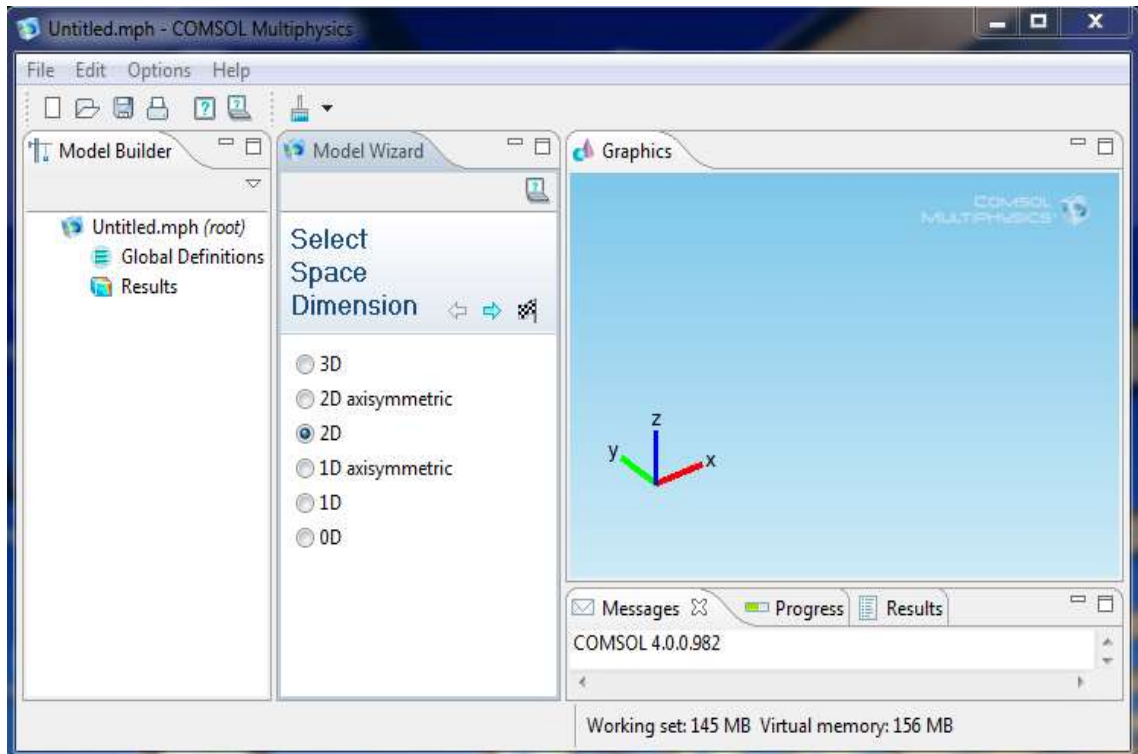
En effet, cet outil de simulation numérique permet de traiter de nombreux problèmes couplés grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées

(électrothermique, thermo-fluidique...etc.). Décrits par les équations aux dérivées partielles. Cette approche autorise une simulation numérique au plus près des systèmes réels. [9]

Le logiciel Comsol Multiphysiques possède un environnement de programmation (Comsol Script) dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits <<solveurs>>, pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendants du temps. En effet, les différentes étapes proposées par cet outil sont :

1. La construction de la géométrie : la première étape est d'extruder une géométrie 2D,
2. Le Maillage de la géométrie : le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée,
3. Définition de la physique : définition des constantes et des expressions,
4. Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est à disposition dans Comsol Multiphysics,
5. Les conditions aux limites : on impose des conditions sur certaines frontières,
6. Exploitation des résultats post-traitement : Lorsque le programme est convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de postprocessing, qui permet d'analyser les résultats.

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de spécifier le ou les modèles physiques qui seront utilisés.



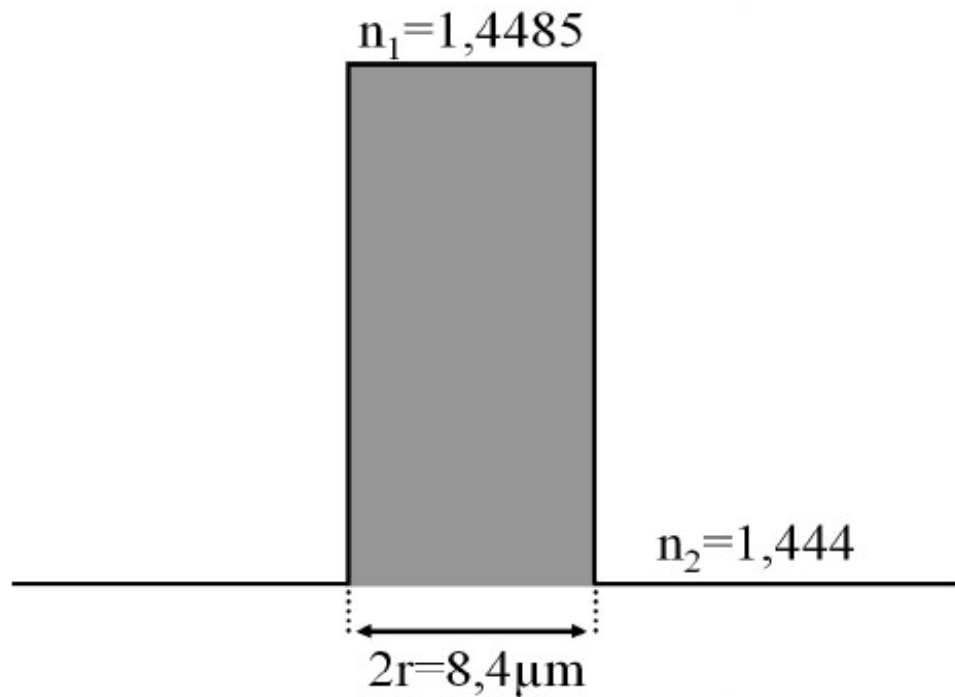
**Figure 3.1 :** Fenêtre principal de Comsol (le navigateur de modèle).

### **3.3 Application à la fibre monomodale**

#### **3.3.1 Caractéristiques de la fibre optique**

Nous avons choisi une fibre optique monomodale. Elle présente, par rapport à la fibre multimode, l'avantage d'avoir une bande passante plus élevée. La fibre multimode est généralement réservée pour les liaisons courte distance et faible débit. La fibre qui va nous servir pour ce test est une fibre optique monomode standard du type SMF-28 (ON=0,115) dont les paramètres opto-géométriques sont donnés sur le graphique suivant :

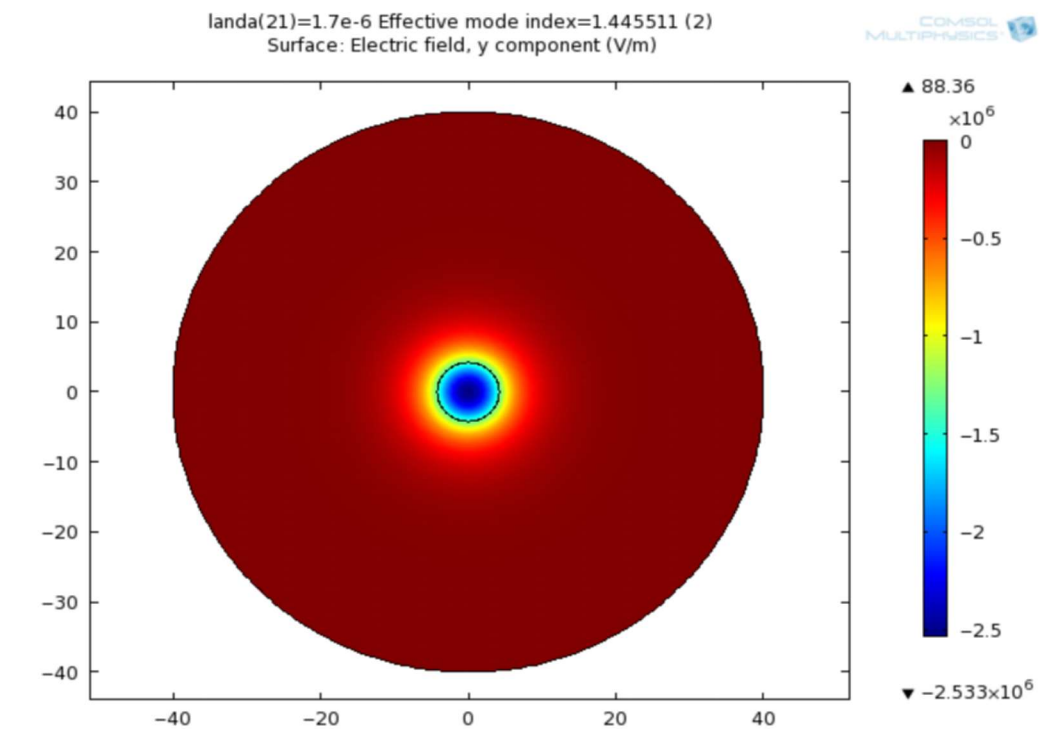




**Figure 3.2 :** Profil d'indice de réfraction d'une fibre du type SMF-28 à 1550nm.

### 3.3.2 Simulation de la fibre SMF-28 :

Dans la figure 3.3 nous avons représenté le profil du mode fondamental de la fibre SMF-28 obtenu par Comsol.

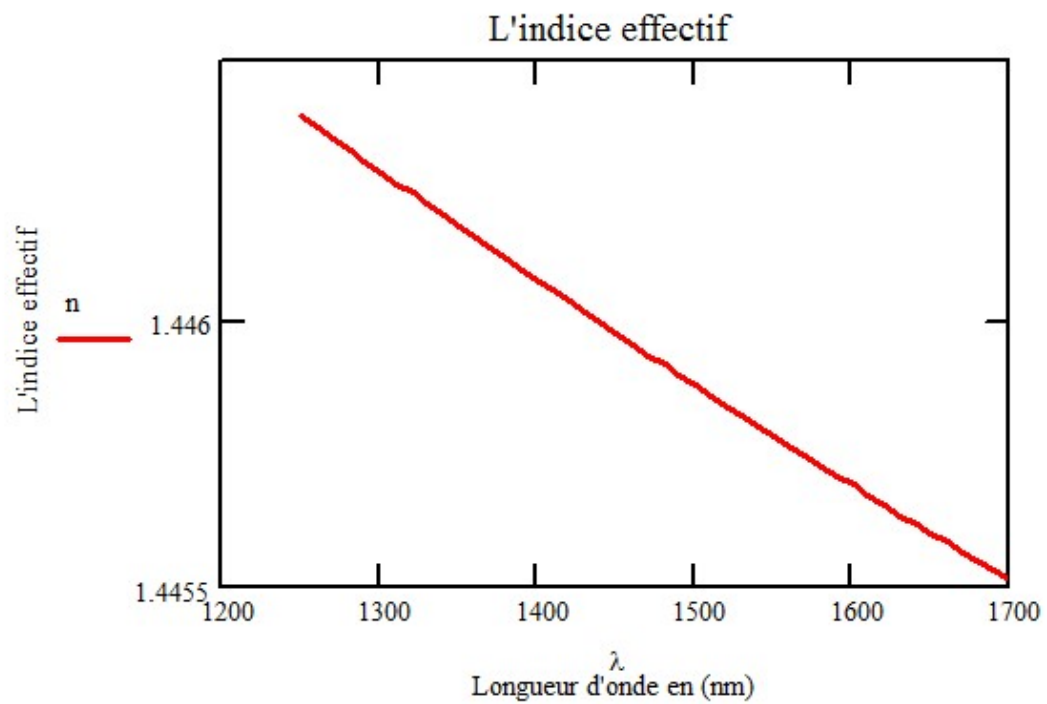


**Figure 3.3:** Le profil transversal du mode fondamental de la fibre optique SMF-28.

### 3.3.3 Résultats de simulation :

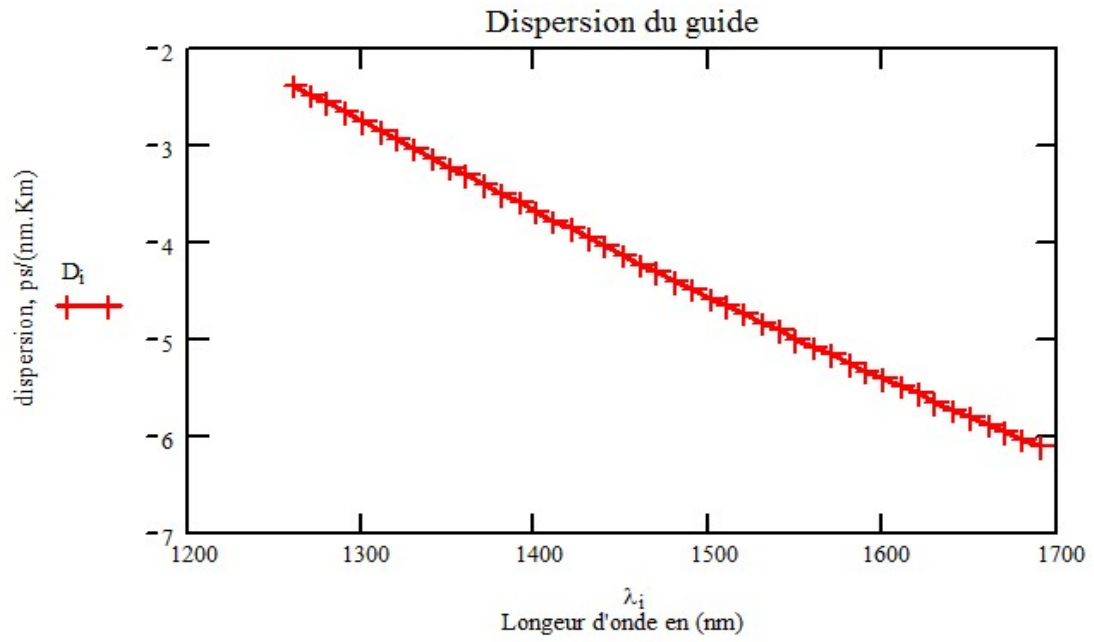
D'après les équations qui sont illustrées dans le deuxième chapitre, nous avons calculé la dispersion chromatique et nous avons obtenu les résultats suivant :

La figure 3.4 représente la variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.

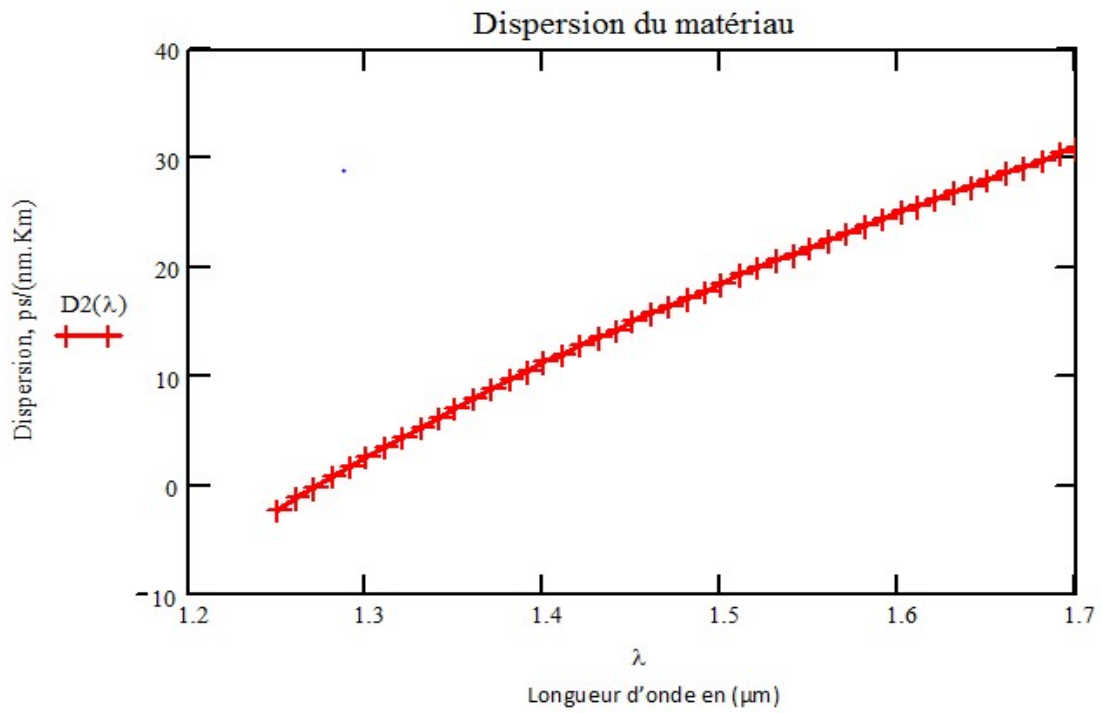


**Figure 3.4 :** variation spectrale de l'indice de la fibre SMF-28.

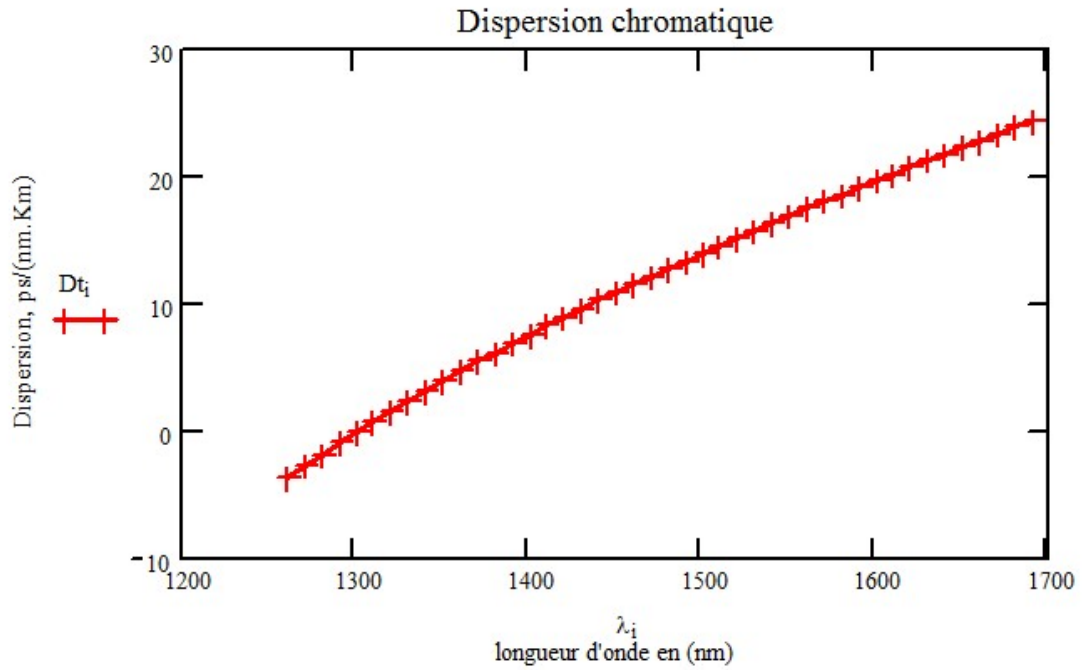
Sur les figures 3.5, 3.6, 3.7, sont représentées la variation de la dispersion du guide, du matériau et de la dispersion chromatique respectivement.



**Figure 3.5 :** la dispersion du guide pour le mode fondamental de la fibre SMF-28.



**Figure 3.6:** la dispersion du matériau pour la fibre SMF-28.



**Figure 3.7:** Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre unimodale SMF-28.

Le tableau suivant regroupe les résultats des éléments qui nous intéressent :

Longueur d'onde de Dch nulle (nm)	Dch à 1550nm [ps/(nm.km)]	Pente de Dch à 1550nm [ps/(nm <sup>2</sup> .km)]
1310	16.894	0.056

**Tableau 3.1 :** Résultat de simulation pour la fibre SMF-28 à 1550 nm.

### 3.3.4 Interprétation des résultats :

On voit sur ces courbes, que la fibre monomode standard SMF-28 présente :

- une variation décroissante de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde,
- une dispersion de guide pour le mode fondamental qui est légèrement négative et est de -5 ps/(nm.Km) pour la longueur d'onde  $\lambda_0 = 1550$  nm,

- une dispersion de matériau continûment croissante. Elle est fortement négative aux courtes longueurs d'onde car la courbure de l'indice est significative dans cette zone spectrale. Elle s'annule pour  $\lambda = 1,27 \mu\text{m}$ .  
A  $1,55 \mu\text{m}$ , elle vaut  $21.897 \text{ ps}/(\text{km.nm})$ ,
- et aussi une dispersion chromatique croissante de  $16.8 \text{ ps}/(\text{nm.km})$  à  $1550 \text{ nm}$ .  
Dans la bande  $1200$  à  $1300 \text{ nm}$ , elle est négative de  $-10$  à  $-0.11 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ . Elle s'annule pour  $\lambda = 1310 \text{ nm}$ .

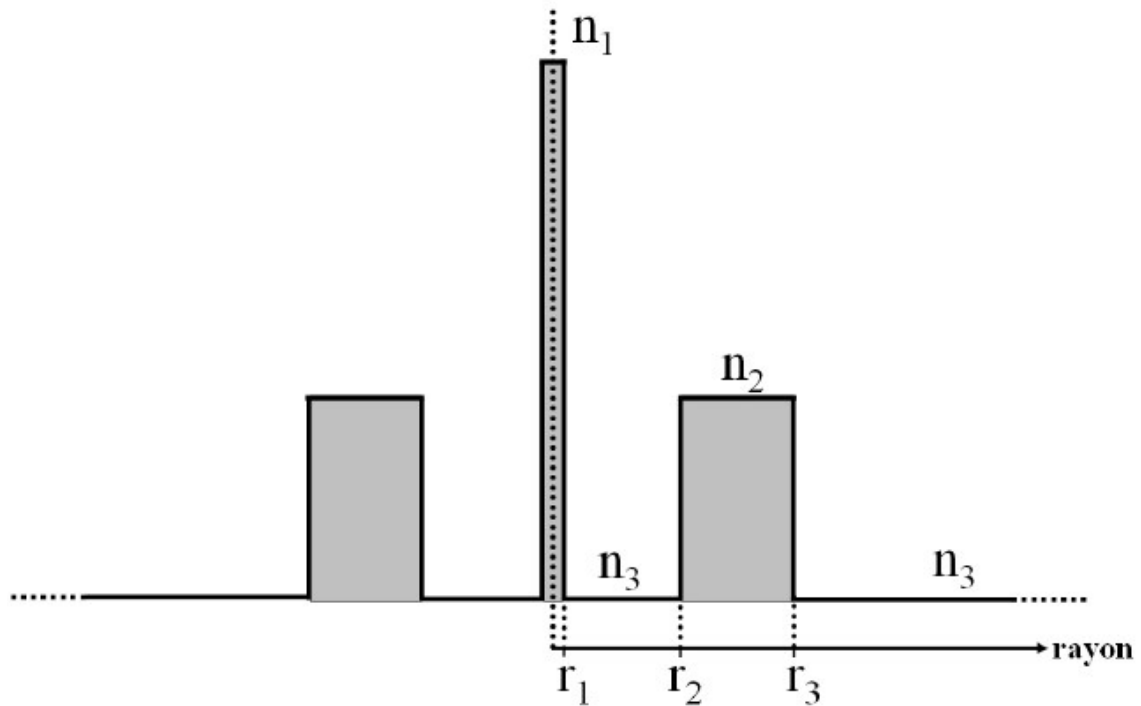
Par ces résultats on a la confirmation que la valeur de la dispersion chromatique pour la longueur  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  est d'environ  $17 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ .

### **3.4 Application à la fibre compensatrice de dispersion chromatique**

#### **3.4.1 Caractéristiques de la fibre compensatrice :**

Le type de fibre compensatrice qui sera l'objet de mon étude est les fibres à deux cœurs concentriques (FDCC), ce sont des fibres qui ont la particularité de présenter une dispersion chromatique fortement négative.

Le type de profil retenu présente de façon classique un cœur central entouré d'un cœur annulaire, tous deux dopés au germanium avec des gaines internes et externes (respectivement avant et après le cœur annulaire) constituées uniquement de silice pure.



**Figure 3.8** : Profil d'indice de réfraction classique d'une FDCC.

L'objectif de cette partie est de concevoir une fibre à deux cœurs concentriques capable de compenser la dispersion chromatique d'une fibre du type SMF-28 sur toute la bande C de longueur d'onde. Cette fibre devra répondre aux exigences suivantes :

- Une valeur de  $D_{ch}$  négative la plus forte possible (donc un fort rapport de longueur  $k$  supérieur à la dizaine (Eq. [2-13]) pour limiter la longueur de fibre compensatrice à insérer.
- Une faible dispersion chromatique résiduelle (Eq. [2-16]) sur toute la bande C : autour du dixième de ps/(nm.km).

Afin d'atteindre les meilleures performances en terme de compensation, divers profils d'indice de réfraction vont être réfléchis.

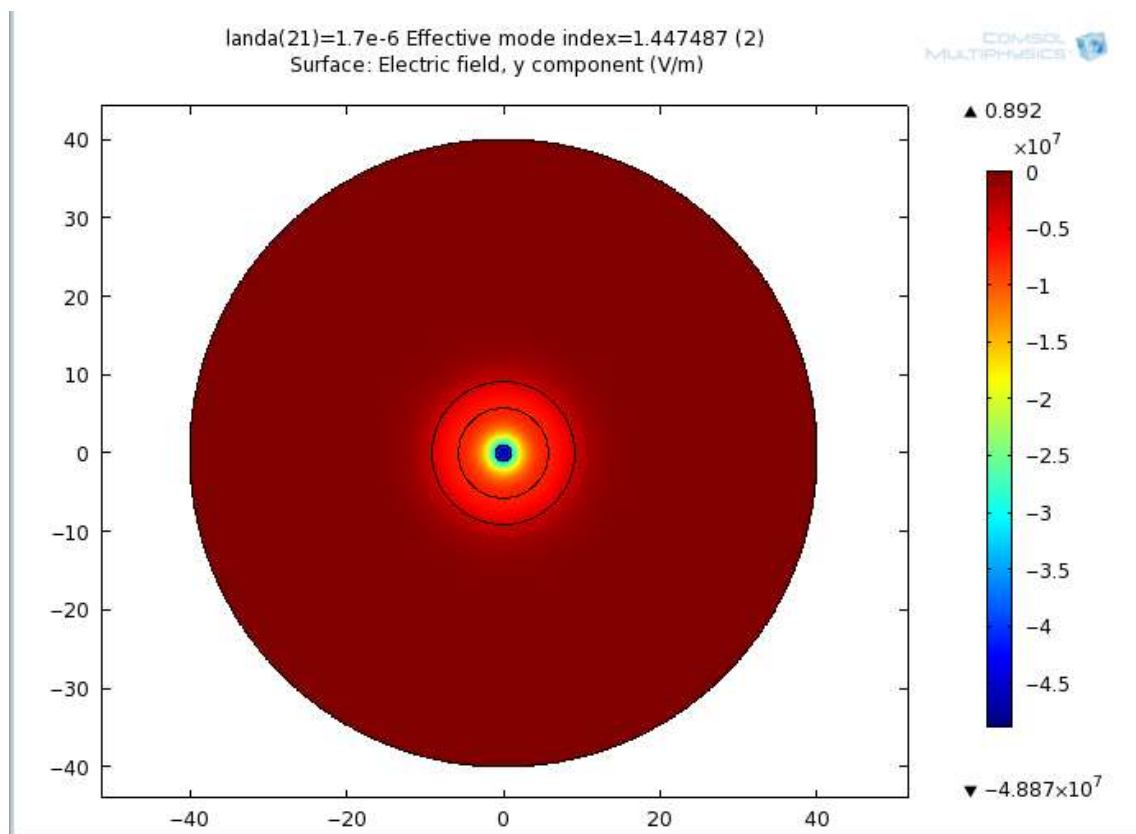
### 3.4.2 Simulation et résultats de la fibre FDCC

Nous avons simulé quatre fibres avec des caractéristiques opto-géométriques différentes.

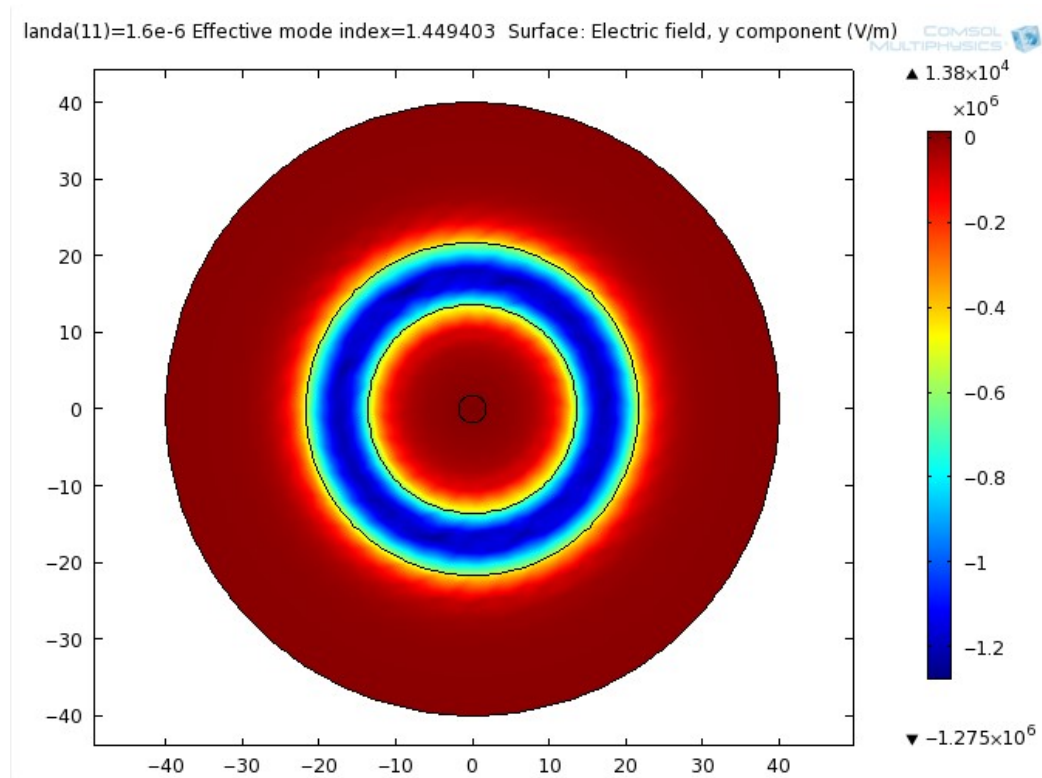
*a La première fibre FDCC aux caractéristiques suivantes :*

L'indice	Le rayon ( $\mu\text{m}$ )
$n_1 = 1.477$	$r_1 = 1.02$
$n_2 = 1.45$	$r_2 = 5.72$
$n_3 = 1.444$	$r_3 = 9.09$

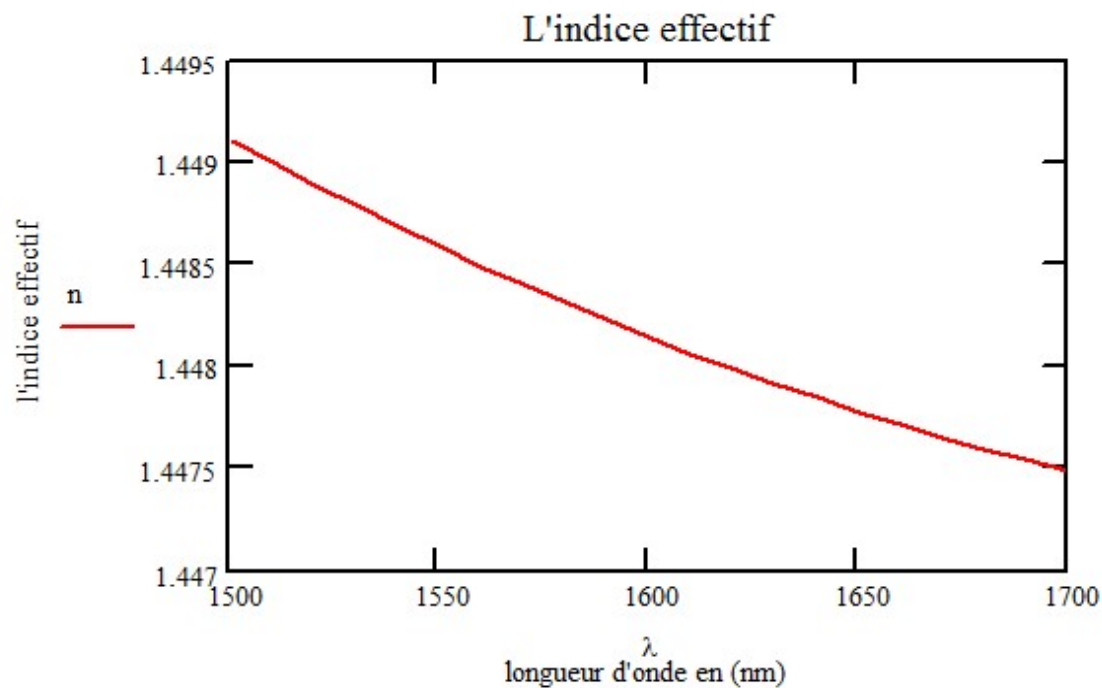
**Tableau 3.2 :** Caractéristiques de profils de FDCC(1) à 1550nm.



**Figure 3.9 :** Le profil transversal du mode fondamental pour le cœur central de la fibre optique FDCC.

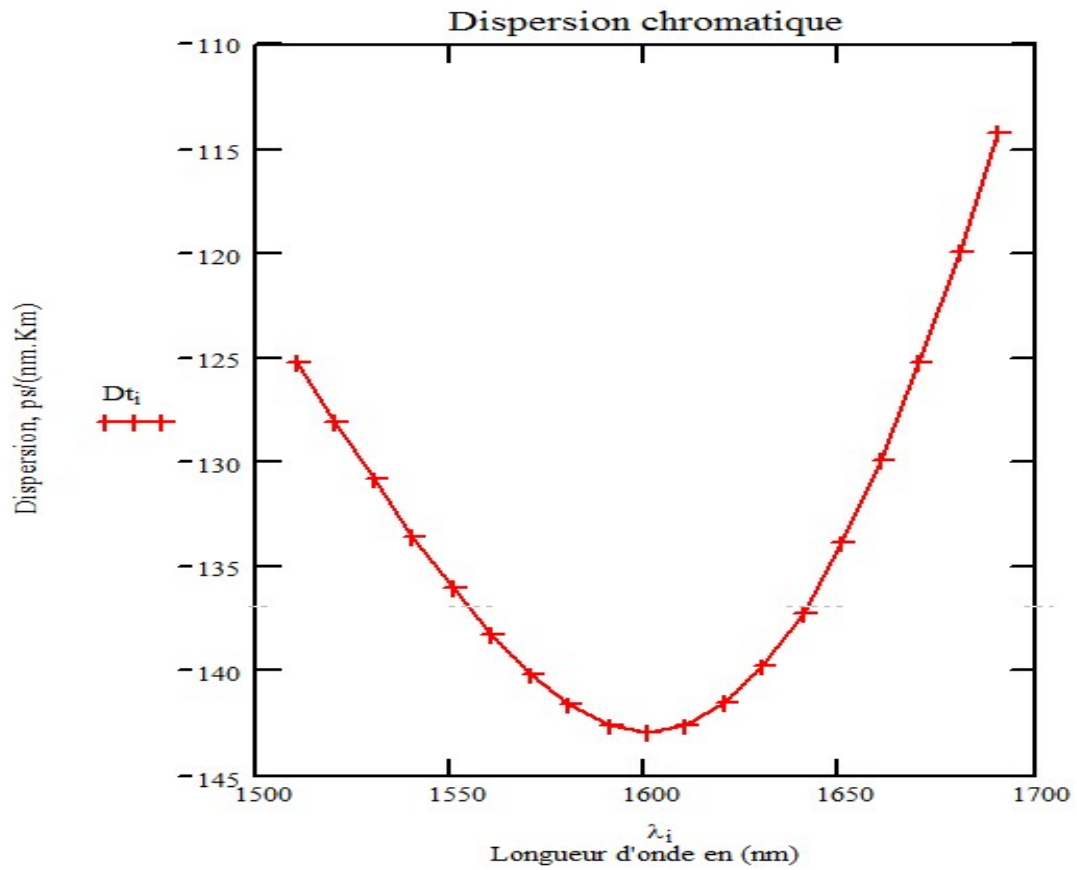


**Figure 3.10 :** Le profil transversal du mode fondamental pour le cœur annulaire de la fibre optique FDCC.



**Figure 3.11 :** variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(1).



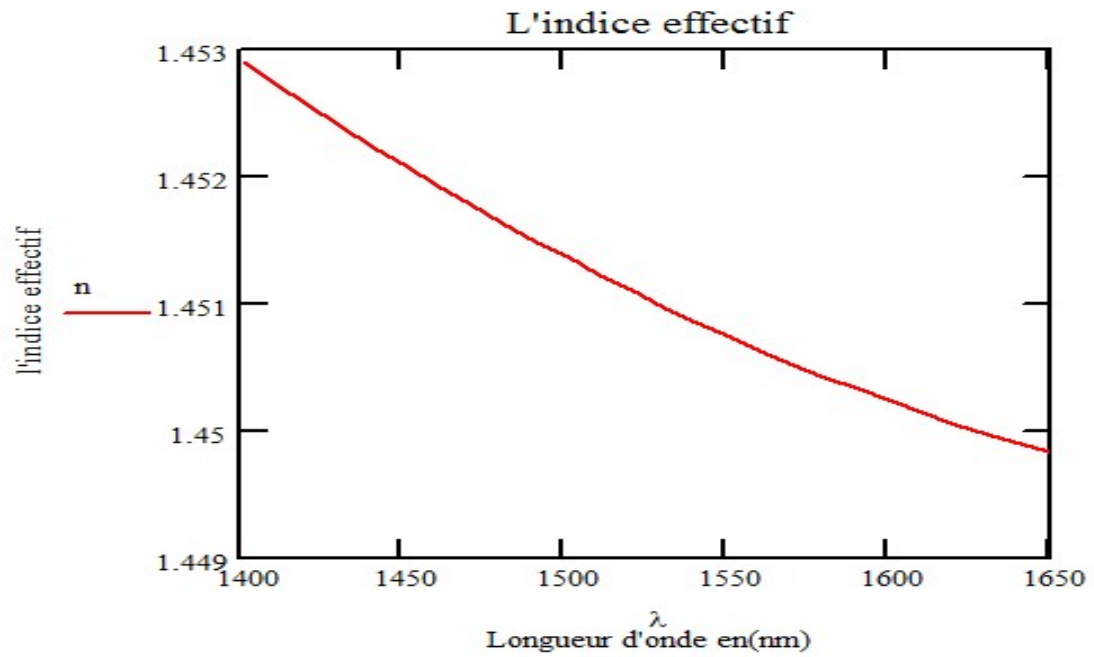


**Figure 3.12 :** Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(1).

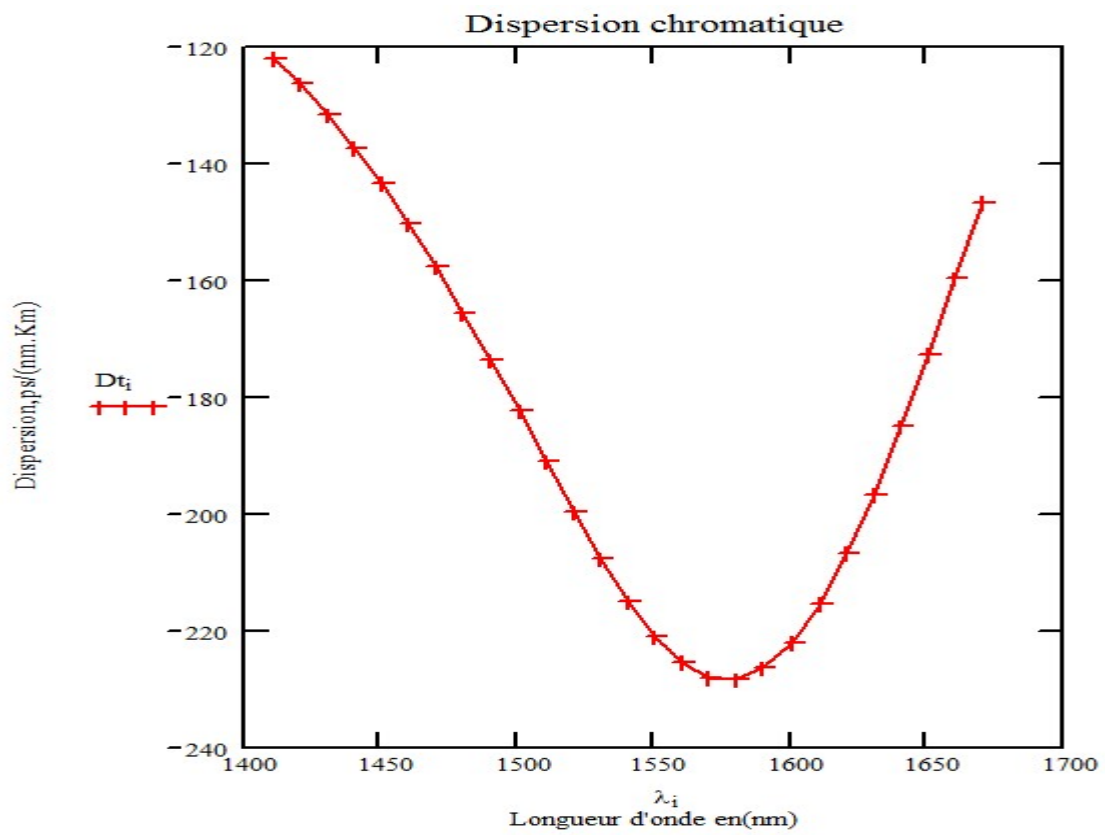
***b La deuxième fibre FDCC aux caractéristiques suivantes:***

L'indice	Le rayon ( $\mu\text{m}$ )
$n_1 = 1.4828$	$r_1 = 1$
$n_2 = 1.4573$	$r_2 = 5.58$
$n_3 = 1.444$	$r_3 = 7.69$

**Tableau 3.3 :** Caractéristiques de profils de FDCC(2) à 1550nm.



**Figure 3.13** : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(2).



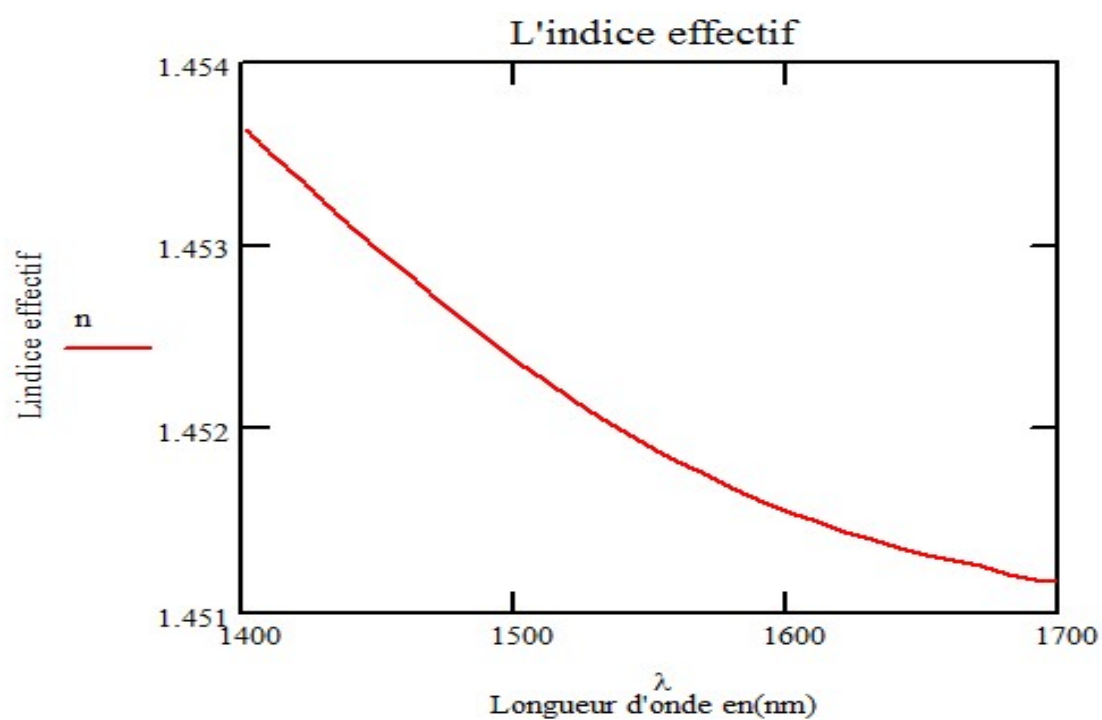
Fi

**Figure 3.14** : Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(2).

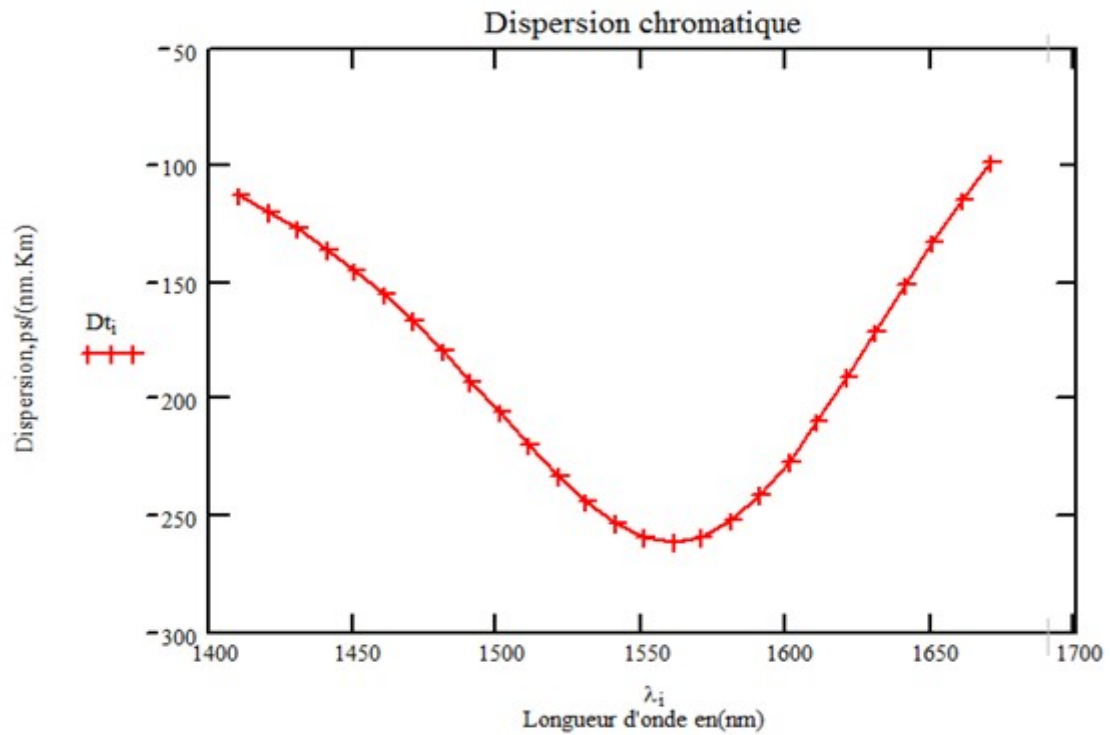
*c La troisième fibre a les caractéristiques suivantes :*

L'indice effectif	Le rayon ( $\mu\text{m}$ )
$n_1 = 1.4767$	$r_1 = 1.2$
$n_2 = 1.4522$	$r_2 = 3.92$
$n_3 = 1.444$	$r_3 = 12.67$

**Tableau 3.4 :** Caractéristiques de profils de FDCC(3) à 1550nm.



**Figure 3.15 :** variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(3).

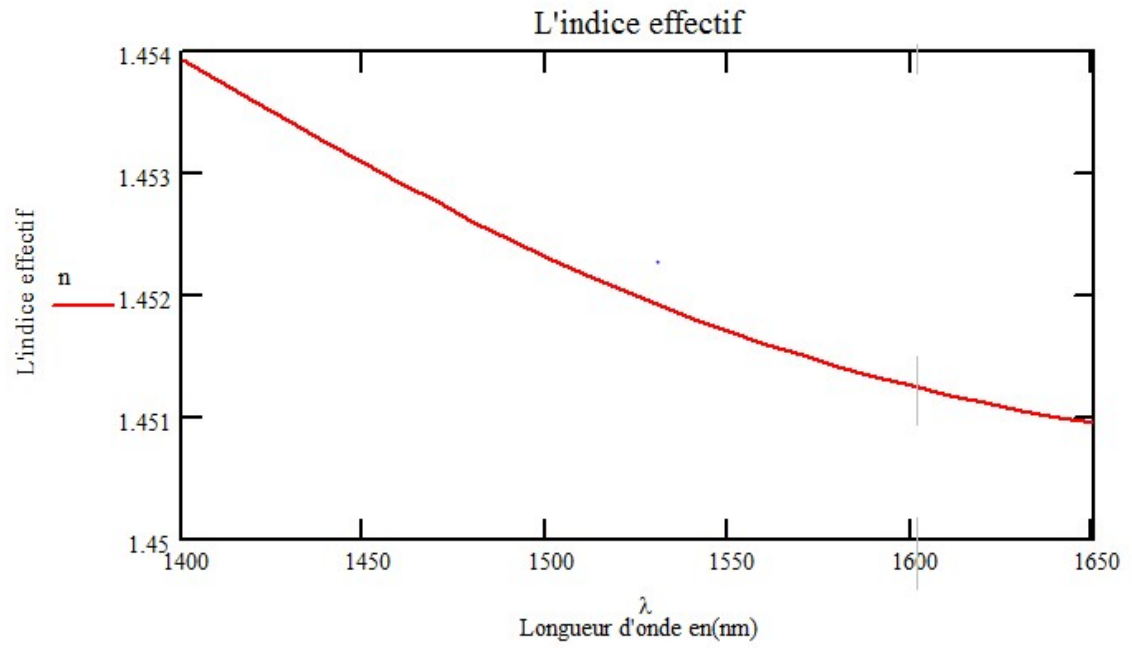


**Figure 3.16:** Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(3).

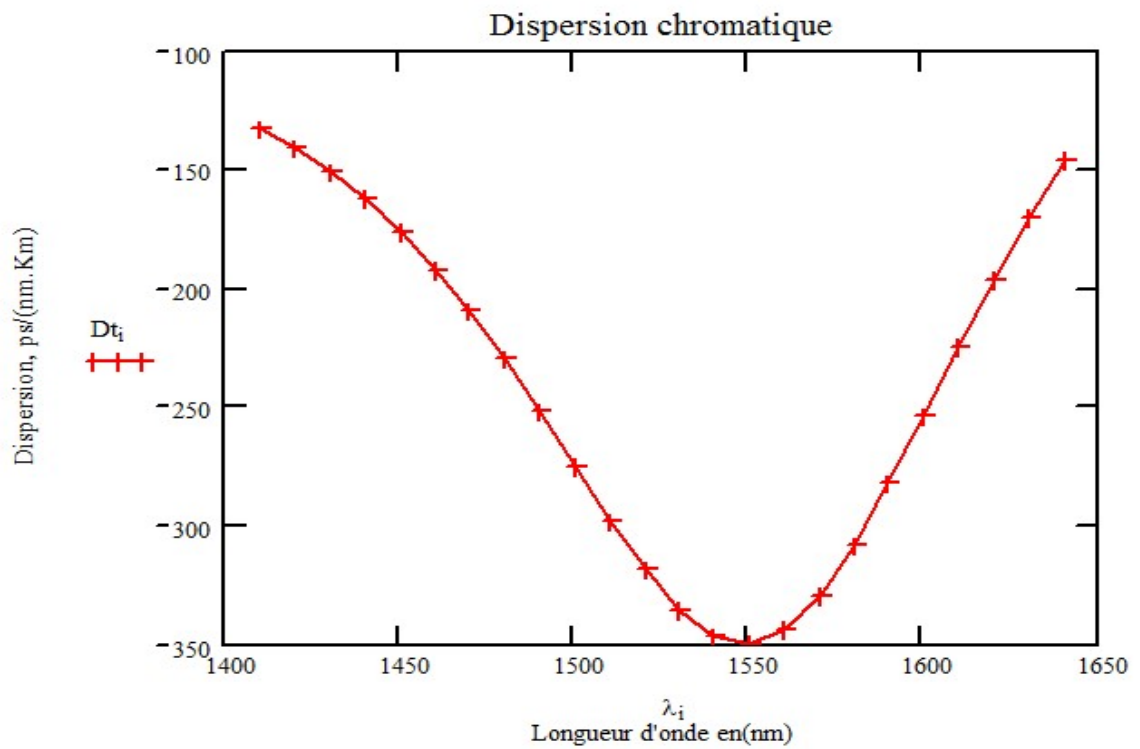
*d La quatrième dont les caractéristiques sont les suivantes :*

L'indice	Le rayon ( $\mu\text{m}$ )
$n_1 = 1.4847$	$r_1 = 1$
$n_2 = 1.4583$	$r_2 = 5.58$
$n_3 = 1.444$	$r_3 = 8.09$

**Tableau 3.5 :** Caractéristiques de profils de FDCC(4) à 1550nm.



**Figure 3.17** : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(4).



**Figure 3.18** : Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(4).

En suite pour chaque cas on a calculé le rapport de longueur K et la pente.

Le tableau suivant regroupe tous les résultats :

Cas :	Dch [ps/(nm.km)]	$\lambda_0$ (nm)	Pente de Dch à 1550nm [ps/(nm <sup>2</sup> .km)]	K (SMF/FDCC)
Cas 1	-142.899	1600	-0.473	8.051
Cas 2	-228.291	1580	-0.756	13.139
Cas 3	-261.597	1560	-0.867	15.359
Cas 4	-349.003	1550	-1.065	20.658

**Tableau 3.6** : Résultats de simulation pour la fibre FDCC à 1550 nm.

### 3.4.3 Interprétation des résultats :

Les quatre courbes mettent en évidence une évolution décroissante lente de la dispersion chromatique, évolution qui tend vers une valeur minimale :

- Cas 1 : de -142.9 ps/(nm.km) autour de 1,6μm avec une pente de -0.47 ps/(nm<sup>2</sup>.km) dans la Bande C.
- Cas 2 : de -228.3 ps/(nm.km) autour de 1,58μm avec une pente de -0.75 ps/(nm<sup>2</sup>.km) dans la Bande C.
- Cas 3 : de -261.6 ps/(nm.km) autour de 1,56μm avec une pente de -0.86 ps/(nm<sup>2</sup>.km) dans la Bande C.
- de -349.0 ps/(nm.km) autour de 1,55μm avec une pente de -1.065 ps/(nm<sup>2</sup>.km) dans la Bande C.

La dernière ligne du tableau indique un maximum de 20.658 au niveau du rapport de longueur (entre SMF-28/FDCC).

Pour résumer, les différents profils d'indice de réfraction simulés permettent d'atteindre dans le meilleur des cas des rapports de longueur plus de 20.

Il apparaît que le profil d'indice de réfraction autorisant un  $K=20.658$  est un bon candidat potentiel.

### 3.5 Application à la compensation de dispersion chromatique

Dans cette partie nous avons calculée La grandeur RDS pour traduire l'efficacité de la compensation large bande.

Fibre	Dch ps/(nm.km)	pen [ps/(nm <sup>2</sup> .km)]	RDS
SMF-28	16.894	0.056	$3.25 \times 10^{-3}$
FDCC	-349.003	-1.065	$3.05 \times 10^{-3}$

**Tableau 3.7** : Résultat, Caractéristique de la fibre monomode standard et de la fibre compensatrice FDCC.

Les données de simulation montrent que les RDS correspondants à la FDCC et à une fibre du type SMF-28 sont égaux en bande C.

Cette égalité est due au fait que nous travaillons le plus près du minimum de dispersion.

## Table des matières

<b>Introduction génération.....</b>	<b>1</b>
-------------------------------------	----------

### **Chapitre 1 : Généralités sur les fibres optiques**

1.1 Historique.....	3
1.2 Multiplexage en longueur d'onde(WDM).....	6
1.3 Utilisation des fibres optiques.....	8
1.3.1 Télécommunications.....	8
1.3.2 Vidéocommunications.....	9
1.3.3 Liaison et réseaux de données.....	9
1.3.4 Liaisons industrielles.....	9
1.3.5 Capteur et instrumentation.....	9
1.3.6 Transport de lumière.....	9
1.3 Avantages.....	10
1.5 Inconvénients.....	11
1.6 Propagation optique.....	12
1.7 La fibre optique.....	13
1.7.1 Définition.....	13
1.7.2 Description.....	13
1.7.3 Principe de guidage.....	14
1.7.4 Modes dans une fibre.....	16
a) Mode de gaine.....	16
b) Mode de propagation.....	16
1.7.5 Matériau pour les fibres optiques.....	16
1.7.6 Atténuations dans la fibre optique.....	17
a) Atténuation ....	17
b) Fenêtre de transmission.....	17



1.7.7 Types de fibres optiques.....	18
a) Quelques paramètres de la fibre optique.....	18
b) Les fibres optiques multimodes.....	19
b.1 Fibres optiques multimodes à saut d'indice.....	19
b.2 Fibres optiques multimodes à gradient d'indice .....	20
b.3 Les caractéristiques techniques des fibres optiques multimodes.....	21
c) Les fibres optiques monomodes.....	22
c.1 les caractéristiques techniques des fibres optiques monomode.....	23
1.8 Conclusion.....	24

## **Chapitre 2 : La dispersion chromatique**

2.1 Introduction.....	25
2.2 Définition.....	27
2.3 Dispersion intermodale.....	28
2.4 Dispersion chromatique.....	29
2.4.1 Introduction.....	29
2.4.2 Les causes de dispersion chromatique dans les fibres.....	29
a) Dispersion du matériau.....	29
b) Dispersion du guide.....	32
2.4.3 La pente de dispersion chromatique.....	34
2.5 La compensation de dispersion chromatique.....	34
2.5.1 Les différentes solutions.....	35
2.5.2 La solution retenue pour l'étude.....	37
a) Fibre utilisant un mode d'ordre supérieur.....	37
b) Fibre utilisant le mode fondamental.....	38
2.5.3 Des exemples d'association fibre de ligne / fibre compensatrice travaillant sur le mode fondamental.....	41
2.6 Conclusion.....	44

## **Chapitre 3 : Simulations et Interprétations des résultats**

3.1 Introduction.....	45
3.2 Présentation générale de COMSOL Multiphysics.....	45
3.3 Application à la fibre monomode.....	47
3.3.1 Caractéristiques de la fibre optique.....	47
3.3.2 Simulation de la fibre SMF-28.....	48
3.3.3 Résultats de simulation.....	49
3.3.4 Interprétation des résultats.....	51
3.4 Application à la fibre compensatrice de dispersion chromatique.....	52
3.4.1 Caractéristiques de la fibre compensatrice.....	52
3.4.2 Simulation et résultats de la fibre FDCC.....	53
a) La première fibre FDCC .....	54
b) La deuxième fibre FDCC.....	56
c) La troisième fibre FDCC.....	58
d) La quatrième fibre FDCC.....	59
3.4.3 Interprétation des résultats.....	61
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>63</b>
 Bibliographie.....	 65

## Liste des figures

### CHAPITRE I

<b>Figure 1.1 :</b> Principe d'une liaison WDM.....	7
<b>Figure 1.2 :</b> Structure d'une fibre.....	14
<b>Figure 1.3 :</b> Propagation dans une Fibre optique.....	15
<b>Figure 1.4 :</b> Courbe d'atténuation de la silice incluant les fenêtres de transmis.....	17
<b>Figure 1.5 :</b> Fibre optique multimodale à saut d'indice.....	19
<b>Figure 1.6 :</b> Propagation de la lumière selon la loi de l'optique géométrique dans une fibre optique à saut d'indice.....	20
<b>Figure 1.7 :</b> Fibre optique multimodale à gradient d'indice.....	21
<b>Figure 1.8 :</b> Propagation de la lumière selon la loi de l'optique géométrique dans une fibre optique à gradient d'indice .....	21
<b>Figure 1.9 :</b> Propagation dans une fibre optique monomode.....	22
<b>Figure 1.10 :</b> Topologie d'une fibre monomode.....	23

### CHAPITRE 2

<b>Figure 2.1 :</b> Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.....	25
<b>Figure 2.2 :</b> Différentes représentations des dispersions dans la fibre.....	26
<b>Figure 2.3 :</b> variation spectrale de l'indice de la silice.....	31
<b>Figure 2.4 :</b> dispersion de la silice.....	31
<b>Figure 2.5 :</b> Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre unimodale standard.....	33
<b>Figure 2.6 :</b> Dispersion chromatique d'une fibre standard.....	34
<b>Figure 2.7 :</b> Dispersion chromatique d'un compensateur de dispersion HOM utilisant le mode $LP_{02}$ .....	38
<b>Figure 2.8 :</b> Profil d'indice de réfraction idéal d'une fibre à deux cœurs	

concentriques.....	39
<b>Figure 2.9</b> : Évolution de l'indice effectif du mode de la structure (trait plein) en fonction de la longueur d'onde.....	40
<b>Figure 2.10</b> : Évolution de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde dans le cas d'une fibre à deux cœurs concentriques.....	40
<b>Figure 2.11</b> : Évolution spectrale de la dispersion chromatique.....	43
<b>Figure 2.12</b> : Dispersion chromatique sur la bande C.....	43

### **CHAPITRE 3**

<b>Figure 3.1</b> : Fenêtre principal de Comsol (le navigateur de modèle).....	47
<b>Figure 3.2</b> : Profil d'indice de réfraction d'une fibre du type SMF-28 à 1550nm.....	48
<b>Figure 3.3</b> : Le profil transversal du mode fondamental de la fibre optique SMF-28.....	48
<b>Figure 3.4</b> : variation spectrale de l'indice de la fibre SMF-28.....	49
<b>Figure 3.5</b> : la dispersion du guide pour le mode fondamental de la fibre SMF-28.....	50
<b>Figure 3.6</b> : la dispersion de matériau pour la fibre SMF-28.....	50
<b>Figure 3.7</b> : Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre unimodale SMF-28.....	51
<b>Figure 3.8</b> : Profil d'indice de réfraction d'une FDCC.....	53
<b>Figure 3.9</b> : Le profil transversal du mode fondamental pour le cœur central de la fibre optique FDCC.....	54
<b>Figure 3.10</b> : Le profil transversal du mode fondamental pour le cœur annulaire de la fibre optique FDCC .....	55
<b>Figure 3.11</b> : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(1).....	55
<b>Figure 3.12</b> : Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(1).....	56
<b>Figure 3.13</b> : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(2).....	57
<b>Figure 3.14</b> : Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(2).....	57

<b>Figure 3.15</b> : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(3).....	58
<b>Figure 3.16</b> : Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(3).....	59
<b>Figure 3.17</b> : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(4).....	60
<b>Figure 3.18</b> : Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice FDCC(4).....	60

## Bibliographie

---

- [1] **J. MAURY** « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique » *Thèse de doctorat* Université de LIMOGES (26 novembre 2003).
- [2] **I. OUALI** « Etude et simulation des effets dispersifs dans la fibre optique pour des transmissions a haut débit et longue distance » *Thèse d'Ingénieur d'Etat en Electronique* Ecole Nationale Polytechnique (Juin 2007).
- [3] **F. GEROME** « Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM » *Thèse de doctorat* Université DE LIMOGES (04 Novembre 2005).
- [4] **R. BOUDELAL** « Etude de couplage d'un guide d'ondes avec une fibre optique application en optique intégrée pour les télécoms optiques » *Thèse de magister* Université MENTOURI – CONSTANTINE (05 décembre 2010).
- [5] <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=95&fileid=72>
- [6] **L. CHERBI** « Propagation et caractérisation des fibres optiques » *Thèse de doctorat* Ecole Nationale Polytechnique (18 octobre 2007).
- [7] <http://www.univ-tlemcen.dz/~benouaz/memoires/bouchenak.pdf>
- [8] **J.-L. AUGUSTE** « Conception, réalisation et caractérisation d'une fibre à forte dispersion chromatique négative », *Thèse de doctorat*, Université de Limoges 2001.
- [9] <http://cfao30.ulb.ac.be/beams/teaching/meca-h-501/Notes/tp01-introductionComsol.pdf>

## Conclusion générale

---

Depuis l'apparition en 1995 des premiers systèmes multiplexés en longueur d'onde ou WDM (pour Wavelength Division Multiplexing) qui permettaient de transporter des débits de 10Gbit/s (4 signaux de longueurs d'onde différentes au débit nominal de 2,5Gbit/s) sur une seule fibre, les capacités offertes par ces liaisons optiques n'ont cessé d'augmenter jusqu'à nos jours. L'un des problèmes majeurs apparu avec la montée en débit réside dans la valeur de la dispersion chromatique des fibres de ligne dont la plupart qui n'ont pas été optimisées pour fonctionner dans les fenêtres actuelles de transmission situées autour des 1,55 $\mu$ m. L'étalement temporel est estimé à 16,5ps/(nm.km) pour une fibre du type SMF-28, et de ce fait les débits de transmission se retrouvent naturellement limités. C'est pourquoi, l'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de concevoir des fibres optiques spécifiques réalisant la fonction de compensation de dispersion chromatique.

Elles sont destinées à ramener autour du zéro la valeur de la dispersion cumulée tout au long de la propagation, et ceci simultanément pour les différentes longueurs d'onde mises en jeu dans les liaisons WDM. Pour cela, elles doivent présenter un coefficient et une pente de dispersion chromatique de signes opposés à ceux de la fibre de ligne.

Dans ce mémoire nous avons étudié le phénomène de dispersion qui régit les transmissions optiques à haut débit et à longues distances ainsi que la fibre qui compensé cette dispersion. Nous avons considéré les points suivants :

En premier lieu, on a décrit la fibre, ses types et leur caractéristiques ce qui nous a permis de comprendre pourquoi on utilise la fibre monomode pour ce type de transmission.

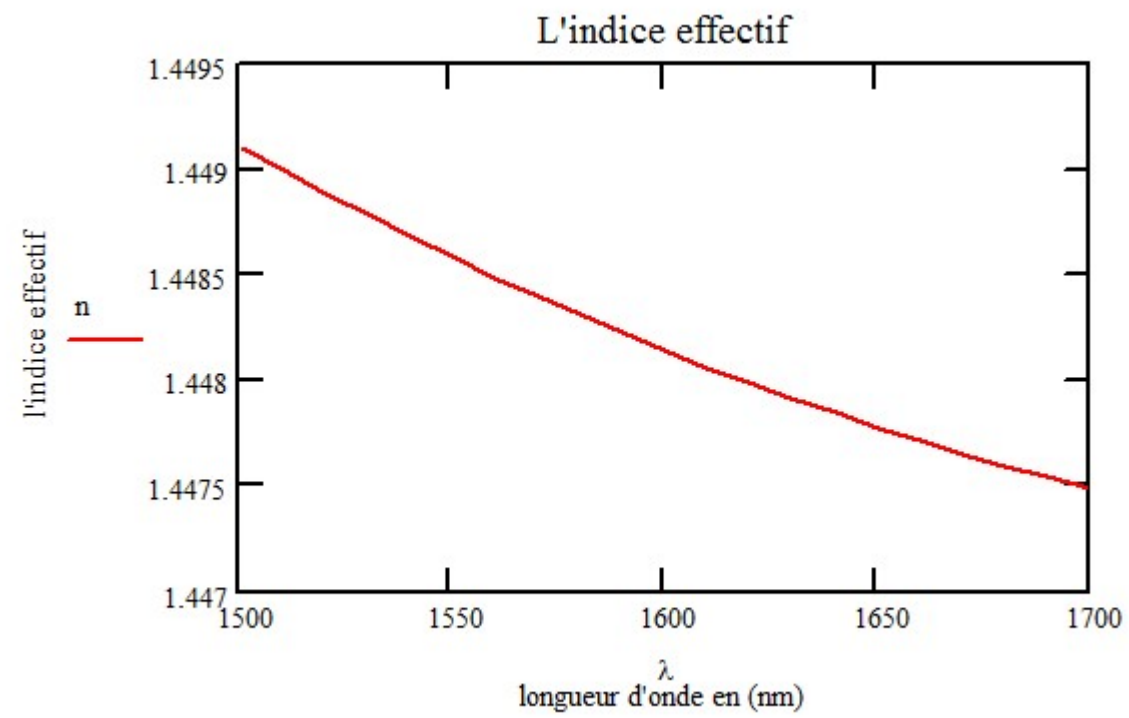
Dans un deuxième temps, on a étudié la dispersion chromatique et ses origines qui sont : la dispersion du guide et celle du matériau.

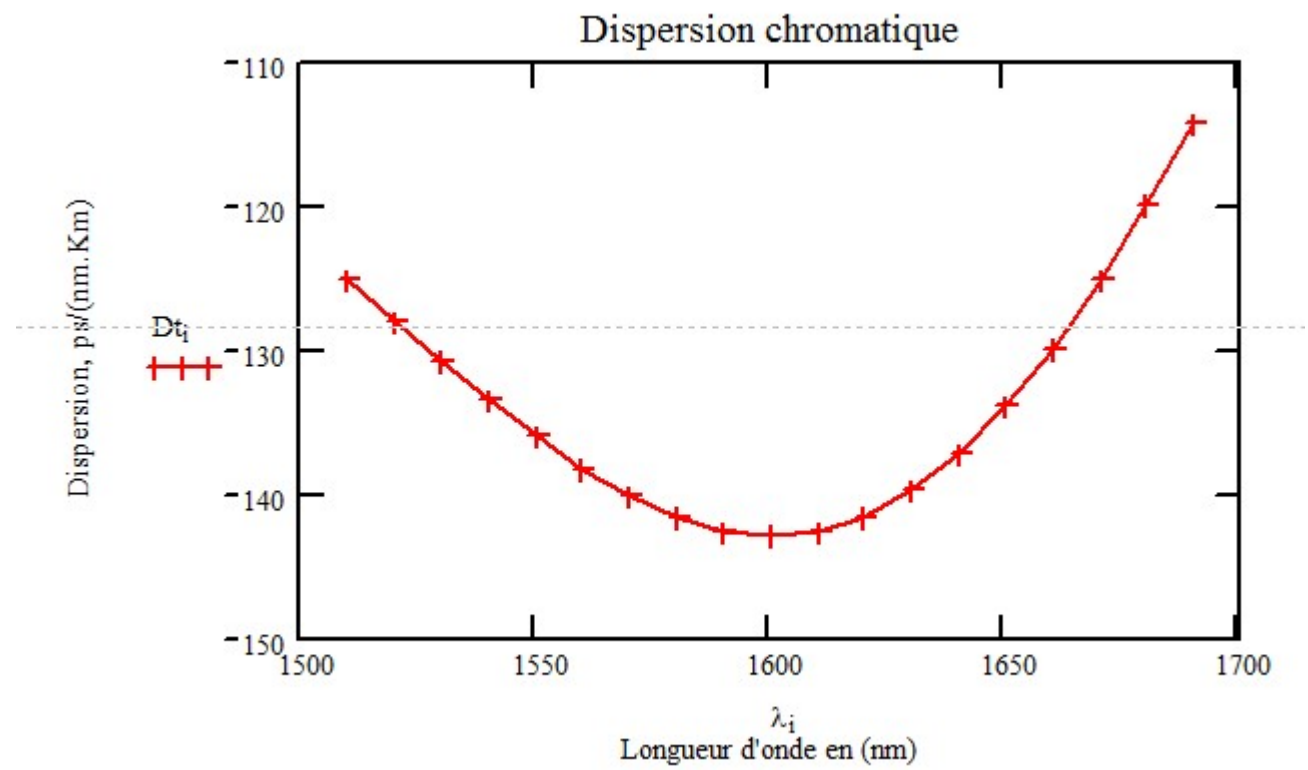
On a vu quelques techniques de compensation de la dispersion chromatique et on a fait une étude théorique sur une fibre compensatrice travaillant sur le mode fondamental.

Ensuite, nous avons fait une simulation sous COMSOL Multiphysics pour voir les évolutions de dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde pour la fibre monomode et pour la fibre compensatrice FDCC.

Finalement, on conclut que la dispersion chromatique est un paramètre important qui limite le débit de transmission, c'est pourquoi on doit le compenser.







بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

جامعة سعد دحلب البليدة  
**Université Saad dahleb de Blida**



**Projet de fin d'études**

ETUDE ET SIMULATION  
D'UNE FIBRE  
COMPENSATRICE DE DISPERSION CHROMATIQUE

**Présentée par:**  
**MEDDI Dounia**

**Encadré par:**  
**Mr: S. NACER**

Juin 2013

**PLAN**



## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *La dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

# Introduction

Le besoin grandissant de vitesse de communication et la Répartition géographique élargie, nécessite continuellement d'entrevoir le haut débit à grande distance.

Le transport de l'information à haut débit et à grandes distances qui se fait via la fibre optique pour ses multiples avantages par rapport au câble coaxial rencontre quelques problèmes d'ordre technique, et parmi ces problèmes, les différents effets dispersifs que subit le signal optique dans la fibre, parmi eux la dispersion chromatique qui fait l'objet de cette étude.



## Introduction

## Généralités sur les fibres optiques

## Dispersion chromatique

## Simulation et Interprétation des résultats

## Conclusion

**WDM**: **W**avelength **D**ivision **M**ultiplexing

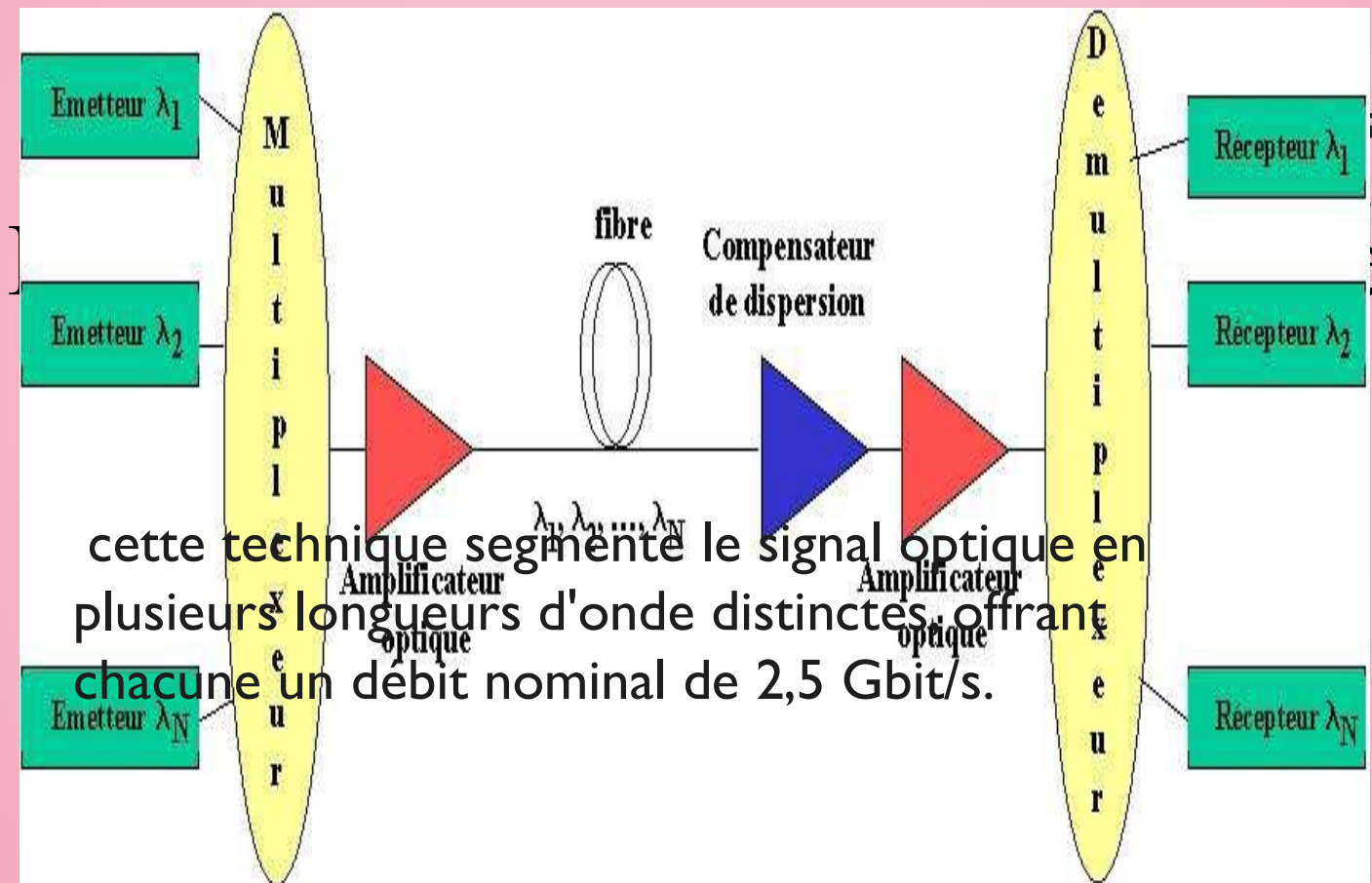


Fig1: Principe d'une liaison WDM.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

Les équations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

que



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

# Propagation optique

Les équations différentielles, associées à des conditions aux limites au niveau des plans de séparation, conduisent à un problème de valeurs propres où les valeurs propres sont les constantes de propagation  $\beta$  des modes TE et TM possibles.

Les vecteurs propres sont les profils des champs correspondants.

L'indice effectif  $n_{eff} = \beta/k_0$  caractérise la propagation possible, sa vitesse de phase et sa forme dans le guide étudié, en fonction de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  de l'excitation lumineuse.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## Définition:

La fibre optique est un guide d'onde diélectrique qui exploite les propriétés réfractrices de



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

# La fibre optique

**Description :**

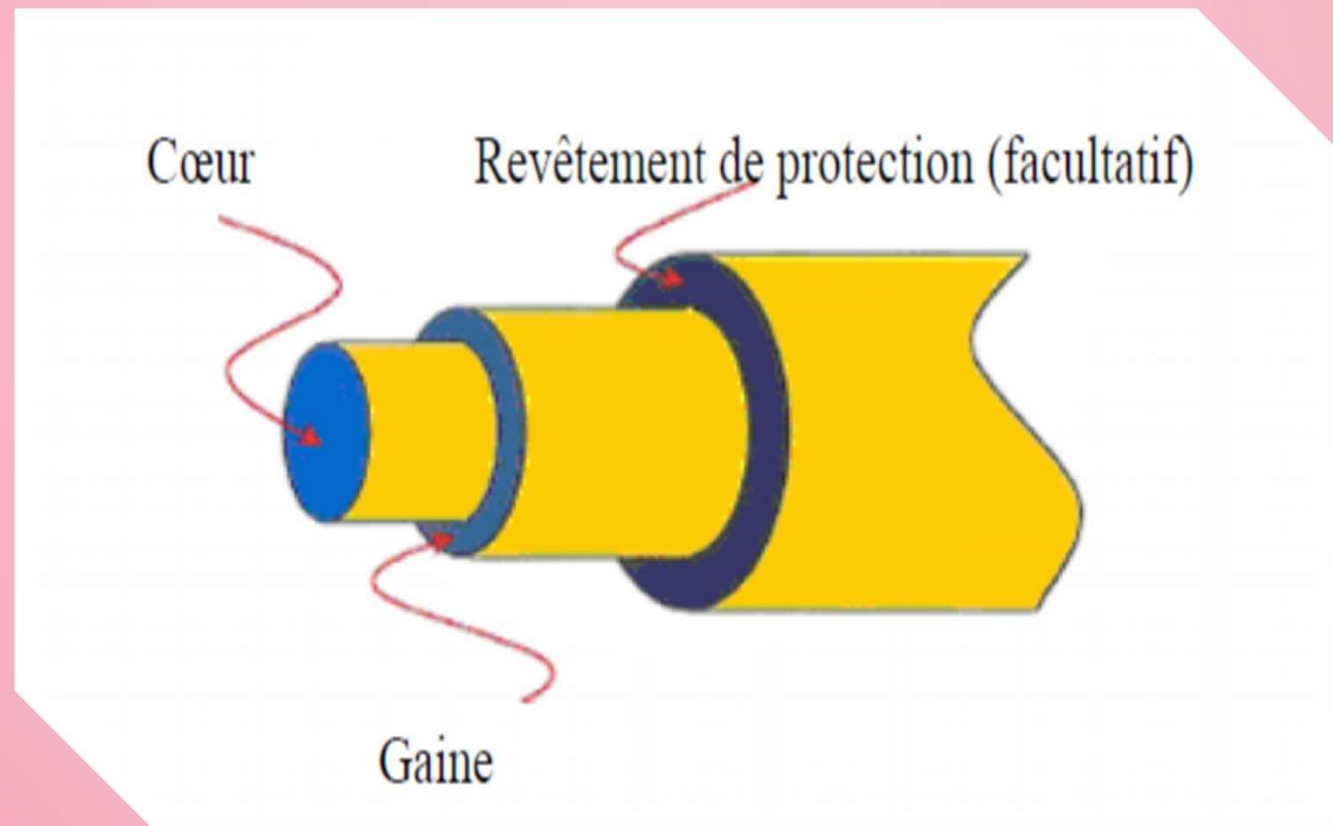


Fig2: Structure d'une fibre optique.



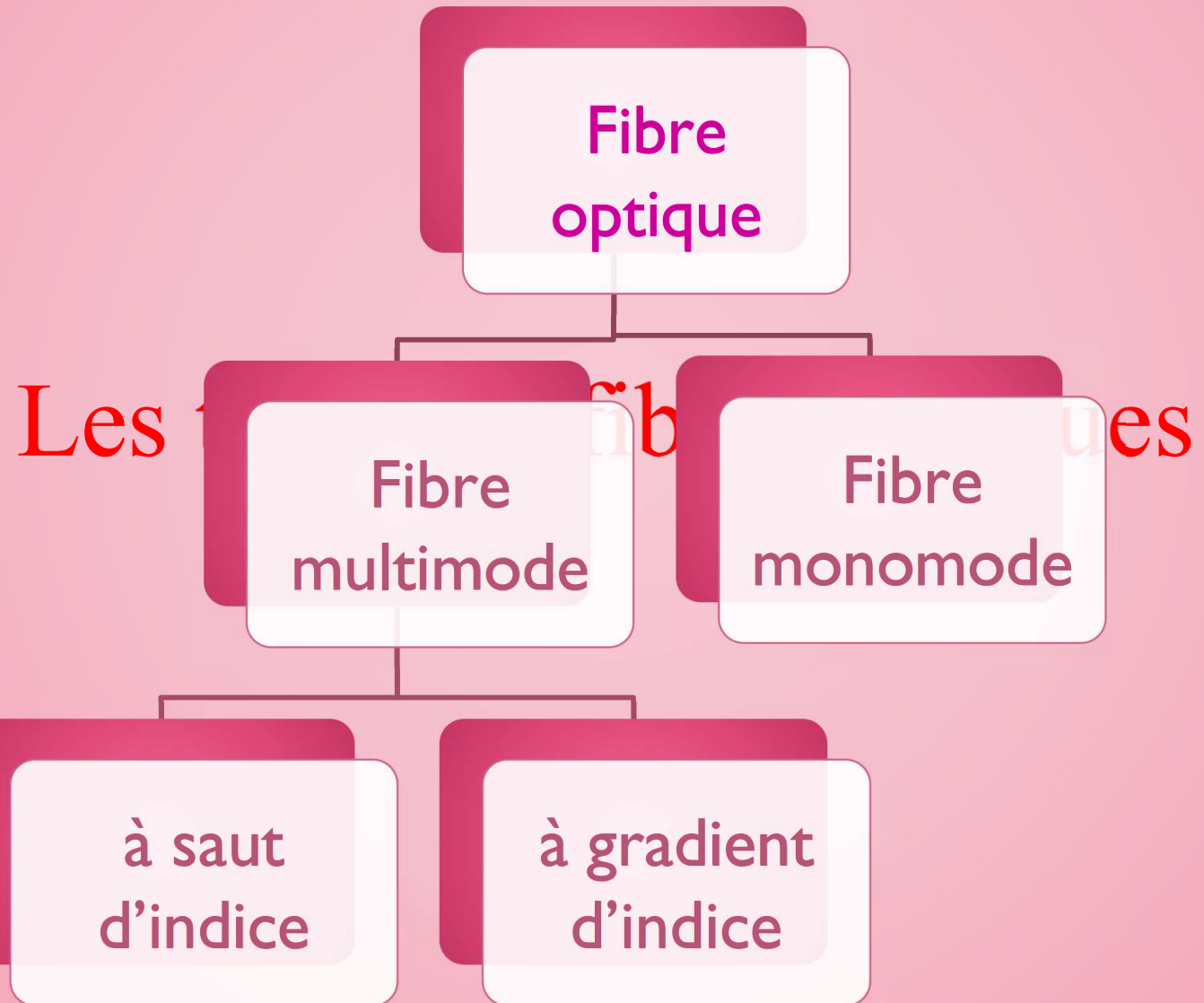
*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*



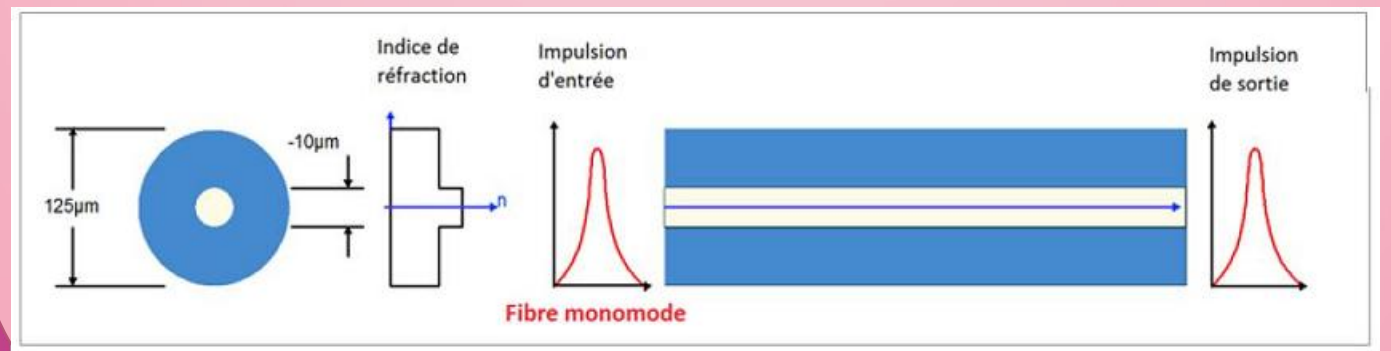
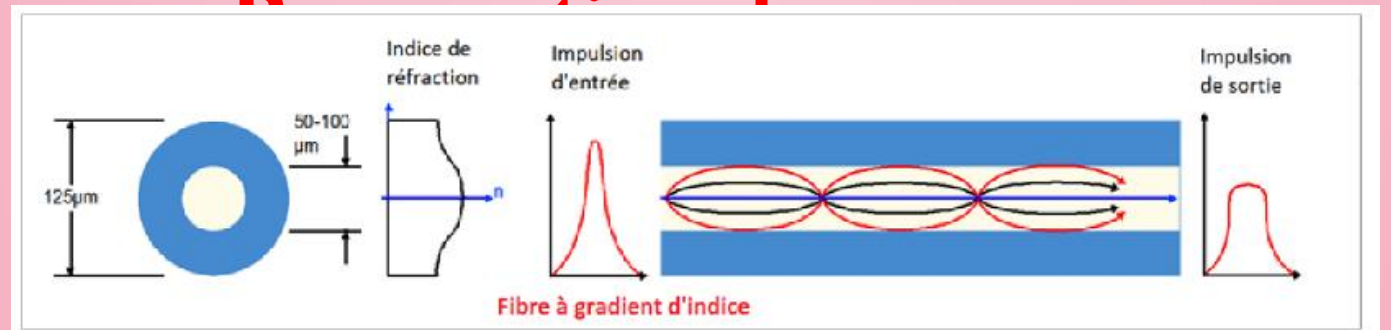
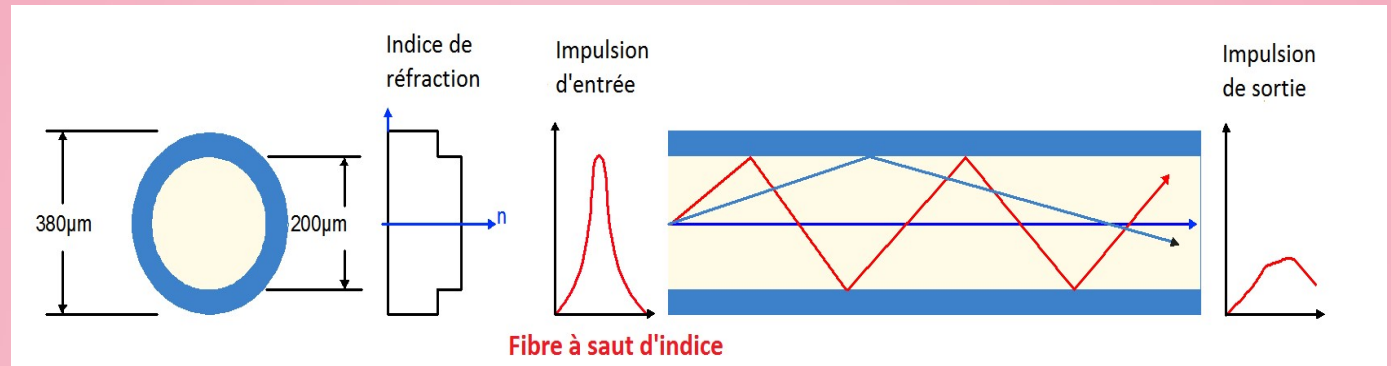
# Introduction

## Généralités sur les fibres optiques

## Dispersion chromatique

## Simulation et Interprétation des résultats

## Conclusion



## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

### **Fibre multimode**

- A un diamètre de cœur important (50 à 85  $\mu\text{m}$ ).
- le nombre de modes  $N = V^2/2$ .
- A été la première utilisée.
- Est facile à utiliser mais a une limitation intrinsèque de bande passante.

### **Les caractéristiques techniques des fibres optiques**

### **Fibre monomode**

- **Réseaux locaux**
- A un diamètre de cœur ( $< 10 \mu\text{m}$ ).
- Le petit diamètre du cœur nécessite l'utilisation des diodes laser comme source d'émission.
- Bande passante transmise est presque infinie ( $> 10\text{GHz}$ ).
- **Haut débit longues distances**



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## Généralités sur les fibres optiques

□ La fibre monomode a une bande passante pratiquement infinie mais requiert des composants chers et des tolérances faibles.

□ Elle est devenue la solution universelle des systèmes de télécommunications.

## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

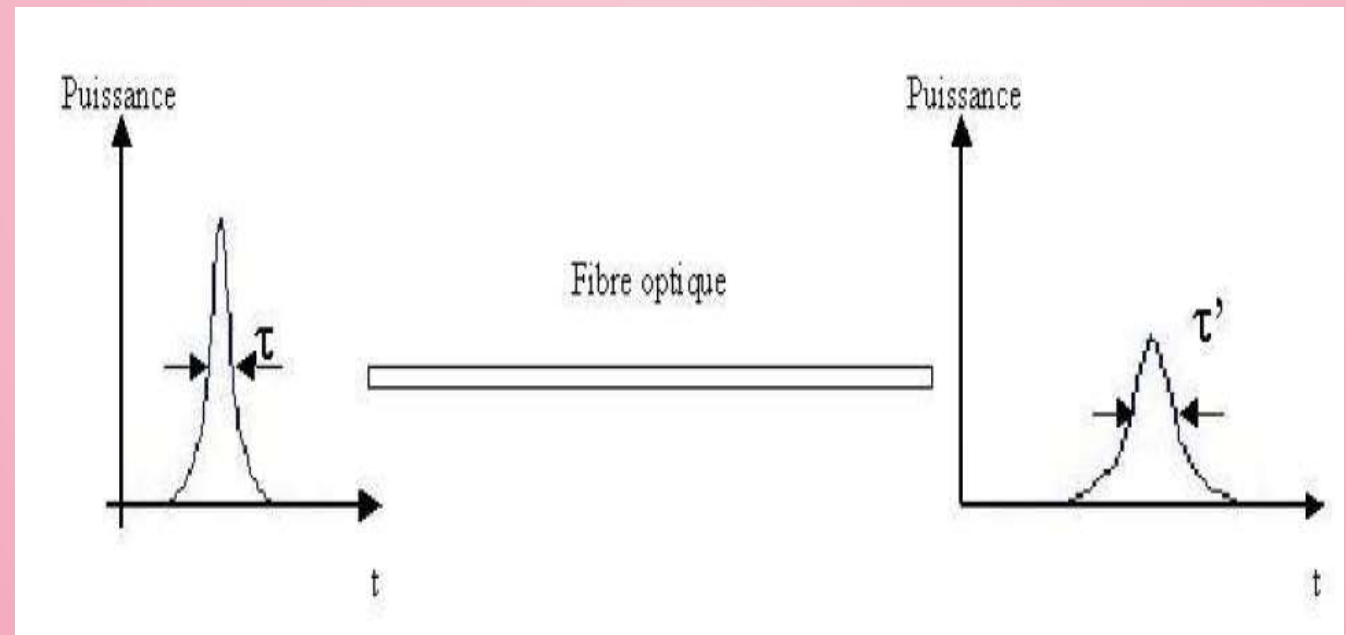
## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

## La dispersion chromatique

Lorsqu' une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci



**Fig3:** Evolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## La dispersion chromatique

- Est présente dans les fibres monomodes et multimodes.
- Elle résulte de la variation du temps de propagation avec la longueur d'onde.
- Elle est causée par deux types de dispersion : la dispersion matériau et la dispersion du guide.

## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

# La dispersion chromatique

Le paramètre de dispersion chromatique ( $D_{ch}$ ) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km, on le donne généralement en ps/(nm.km).

- 
- les picosecondes correspondant à l'élargissement temporel,
  - les nanomètres à la largeur spectrale,
  - les kilomètres à la longueur de fibre.

*Introduction*

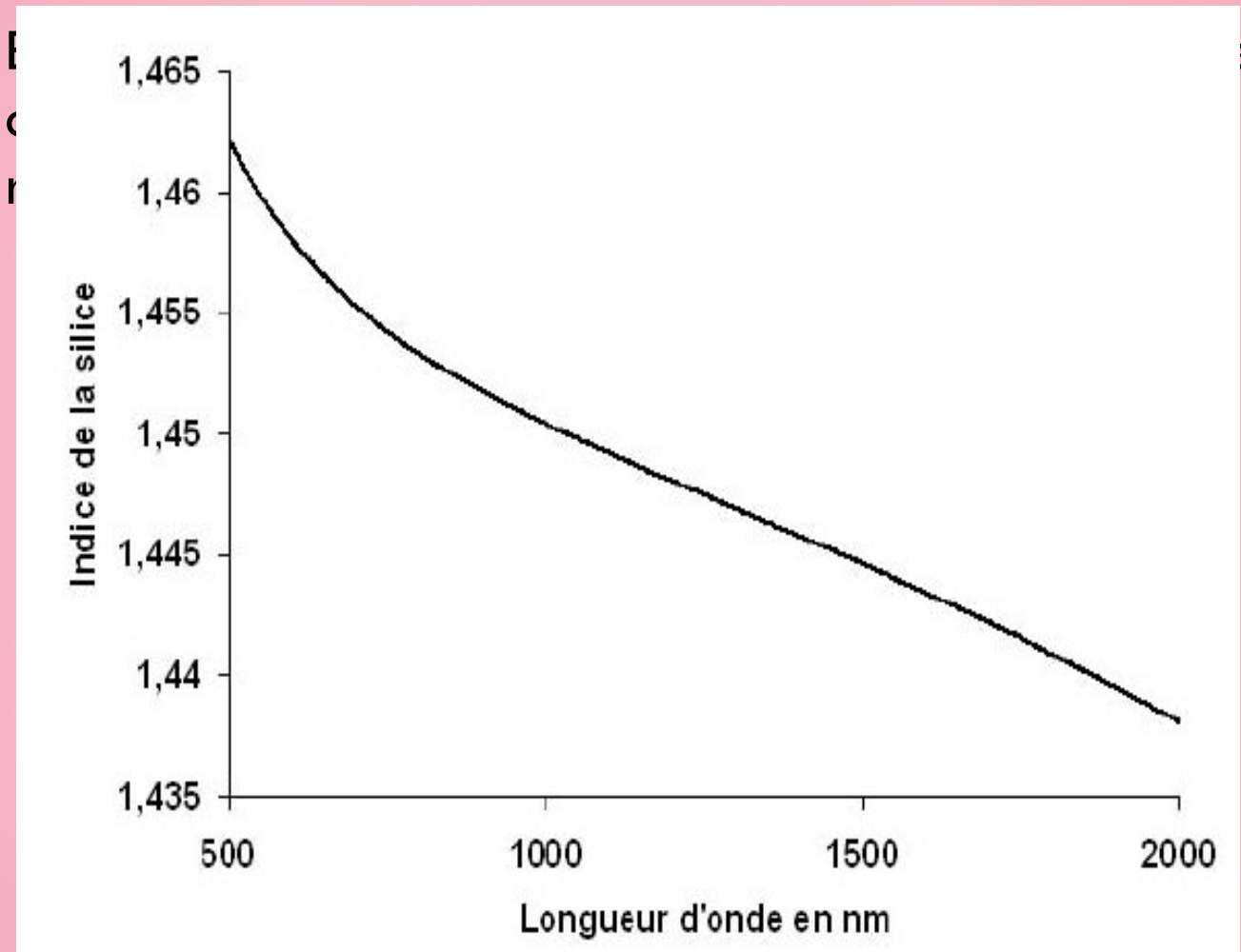
*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## La dispersion du matériau



**Fig4:** variation spectrale de l'indice de la silice.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## La dispersion du matériau

La dispersion du matériau s'écrit :

$$D_{mat} = - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad [\text{ps}/(\text{nm.km})]$$

n: l'indice du matériau.



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## La dispersion guide

Elle résulte du fait que les ondes se propagent dans un guide d'onde et non dans un milieu illimité ce qui leur donne un indice effectif dépendant de la longueur d'onde.

$$D_{\text{guide}}(\lambda_0) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda_0^2} \quad [\text{ps}/(\text{nm.km})]$$

## *Introduction*

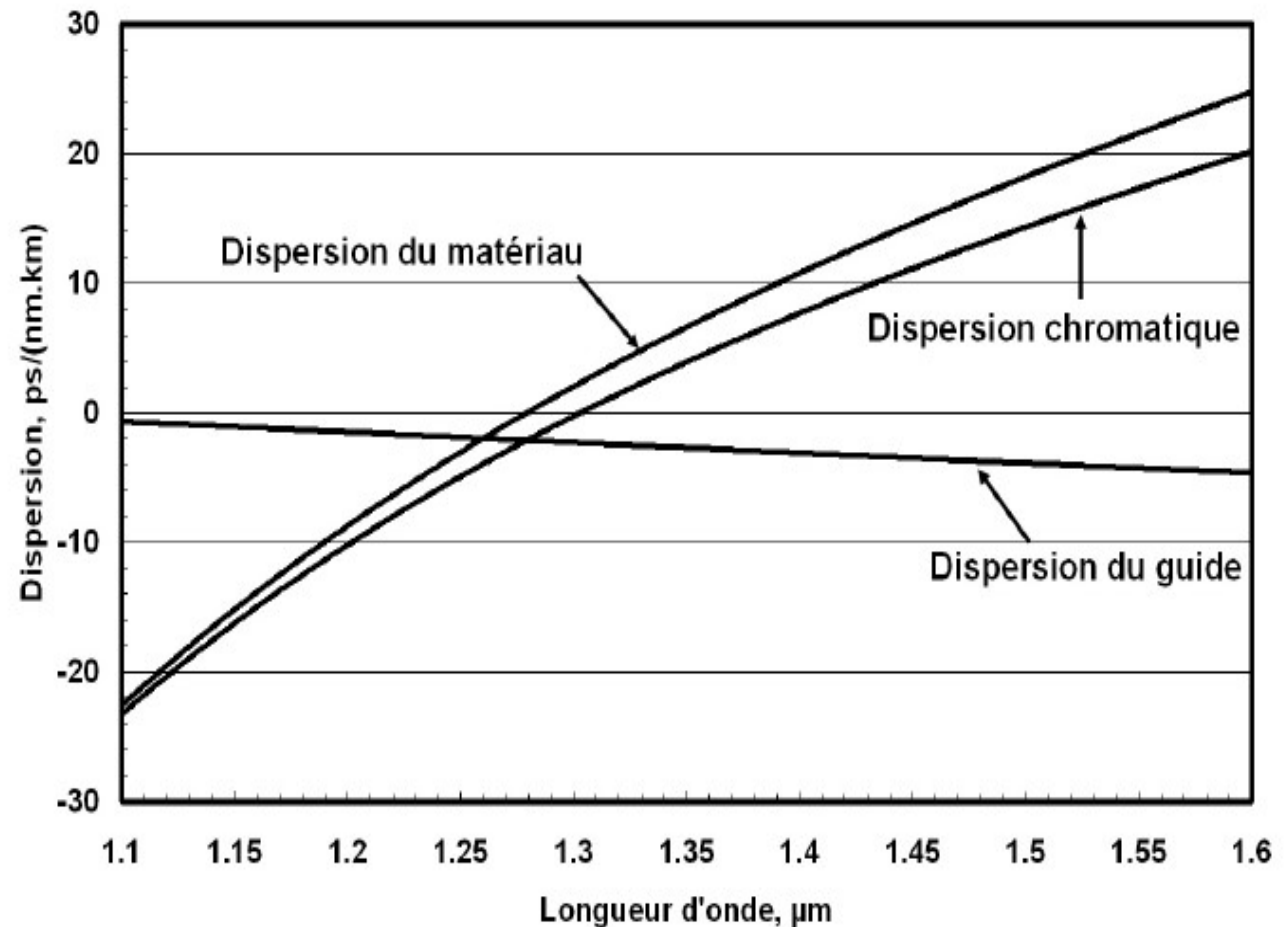
## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

## La dispersion chromatique



**Fig5:** Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre monomode standard.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## La dispersion chromatique

Dans une fibre unimodale standard de type SMF-28, la dispersion chromatique à  $1,55\mu\text{m}$  est de l'ordre de  $16,5\text{ps}/(\text{nm.km})$  et nulle autour de  $1,3\mu\text{m}$ .

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## *La compensation de la dispersion chromatique*

Les réseaux de télécommunication installés utilisent des fibres optiques monomodes optimisées à 1310 nm, longueur d'onde pour laquelle la dispersion chromatique est nulle,

mais qui travaillent à 1550 nm, longueur d'onde pour laquelle elles présentent une dispersion chromatique de l'ordre de 17 ps/(nm.km).

Afin de pouvoir garantir des débits de communication importants, il est donc indispensable de compenser cet élargissement temporel par l'ajout, au sein du réseau, des systèmes actifs ou passifs.



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## *Fibre compensatrice de dispersion chromatique*

Ce sont des fibres qui sont conçues pour avoir de fortes dispersions négatives grâce à des modifications de leurs paramètres opto-géométriques.

*Introduction*

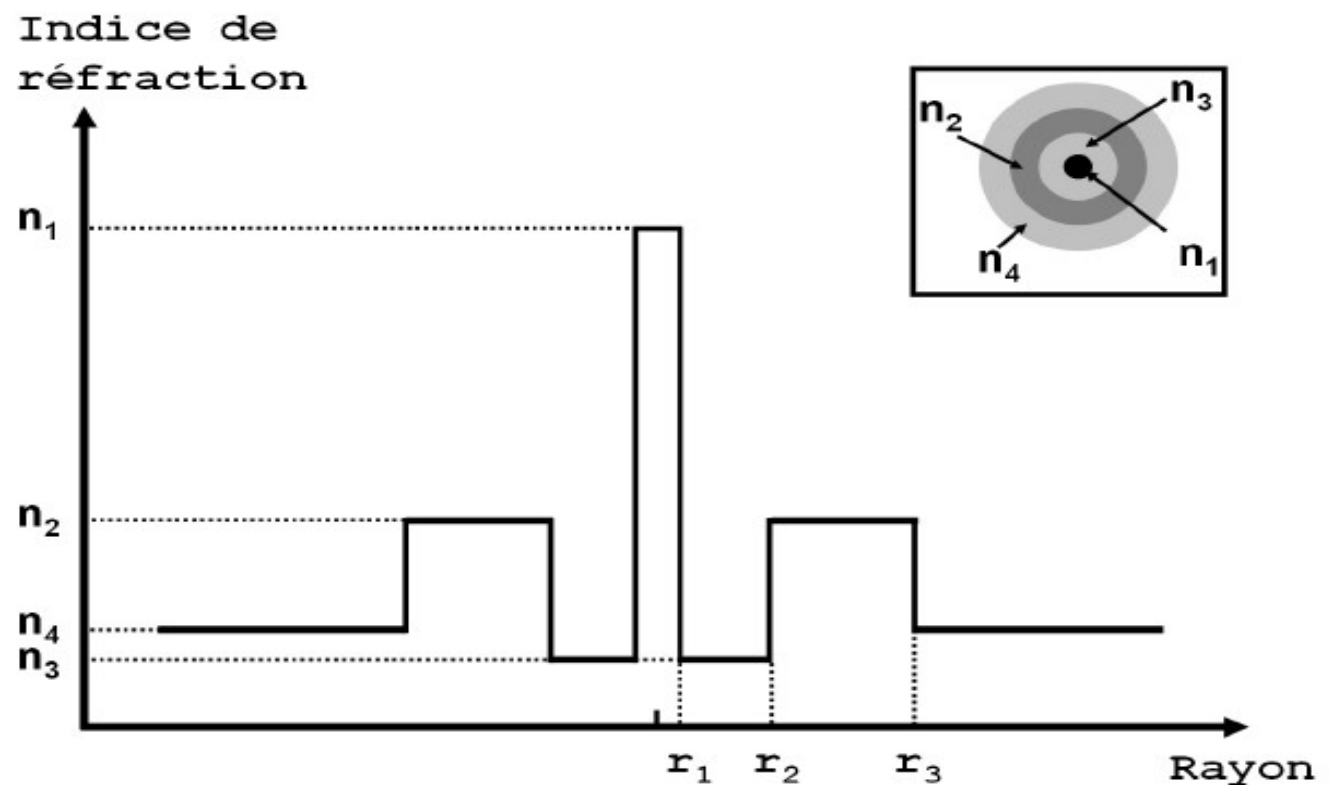
*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## *Fibre à deux cœurs concentriques*



**Fig6:** Profil d'indice de réfraction idéal d'une fibre à deux cœurs concentriques.

## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

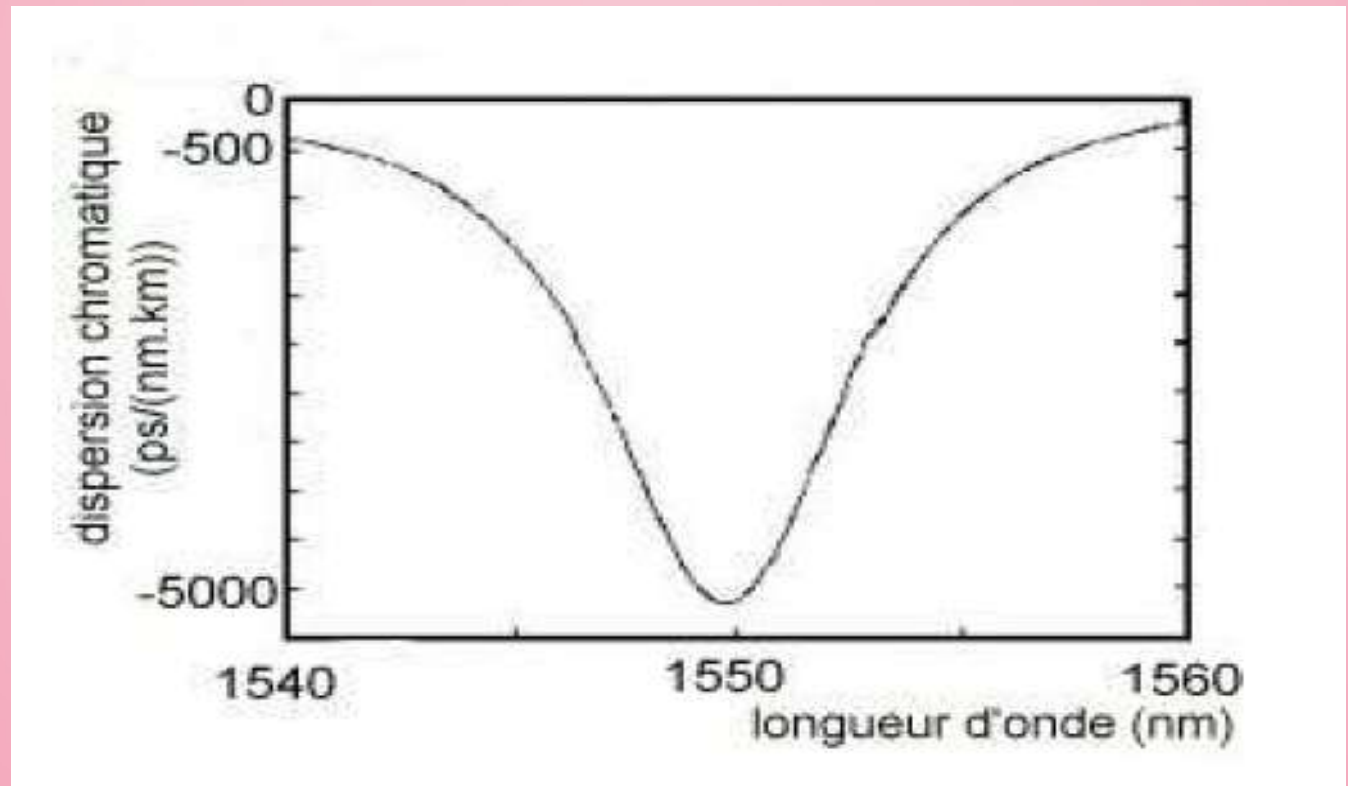
## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

### *Fibre à deux cœurs concentriques*

La dispersion chromatique qui intervient comme la dérivée seconde de l'indice effectif du mode de la structure est alors fortement négative à 1550 nm.



**Fig7:** Évolution de la dispersion chromatique d'une fibre à deux cœurs concentriques.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## *La pente de dispersion chromatique*

Sachant que les systèmes du WDM travaillent sur toute une bande de longueur d'onde, il est primordial de connaître l'évolution de dispersion chromatique sur tout le spectre.

C'est pourquoi une caractéristique importante pour ces réseaux est la valeur de la pente de dispersion chromatique.

Elle est exprimée en  $\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ .

Des gros efforts de conception sont mis en œuvre pour gérer ce phénomène de plus en plus critique avec la montée en débit.



*Introduction*

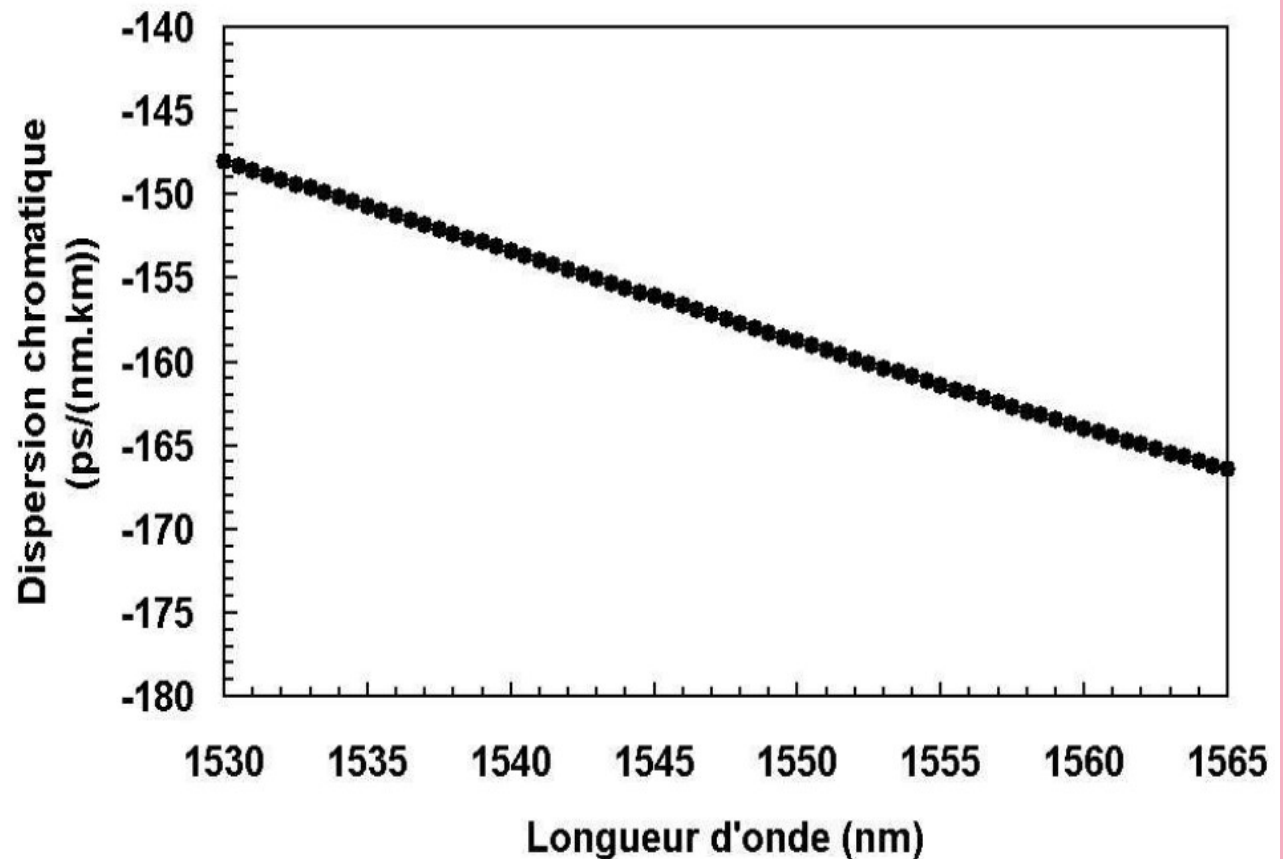
*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

*La pente de dispersion  
chromatique*



**Fig8 :** Evolution spectrale de la dispersion chromatique.

## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

### **Fibre de ligne / fibre compensatrice travaillant sur le mode fondamental**

La caractéristique principale de ces fibres est de présenter une dispersion chromatique et une pente de  $D_{ch}$  de signe opposé à celui de la fibre de ligne.

L'idée est alors de combiner les deux fibres en utilisant le bon rapport de longueur donné par :

$$K = \frac{L_{\text{Fibre de Ligne}}}{L_{DCF}} = \left| \frac{D_{chDCF}}{D_{ch\text{Fibre de Ligne}}} \right|$$

La dispersion chromatique totale (ou cumulée) est alors définie par :

$$D_{chT} = D_{ch\text{Fibre de Ligne}} L_{\text{Fibre de Ligne}} + D_{chDCF} L_{DCF}$$

## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

### ***Fibre de ligne / fibre compensatrice travaillant sur le mode fondamental***

La grandeur RDS a été introduite pour traduire l'efficacité de la compensation large bande.

Elle est calculée généralement à  $\lambda=1,55\mu\text{m}$  et définie par :

$$RDS = \frac{\text{pente de la dispersion chromatique}}{\text{valeur de la dispersion chromatique}}$$

Pour une bonne compensation il faut respecter le rapport de longueur mais aussi vérifier l'équation suivante :

$$RDS_{\text{Fibre de Ligne}} = RDS_{DCF}$$

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

Nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour déterminer les caractéristiques de la fibre suivantes :

- ✓ les modes guidés présents,
- ✓ leur indice effectif,
- ✓ la forme des champs,

Le logiciel Comsol Multiphysics est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

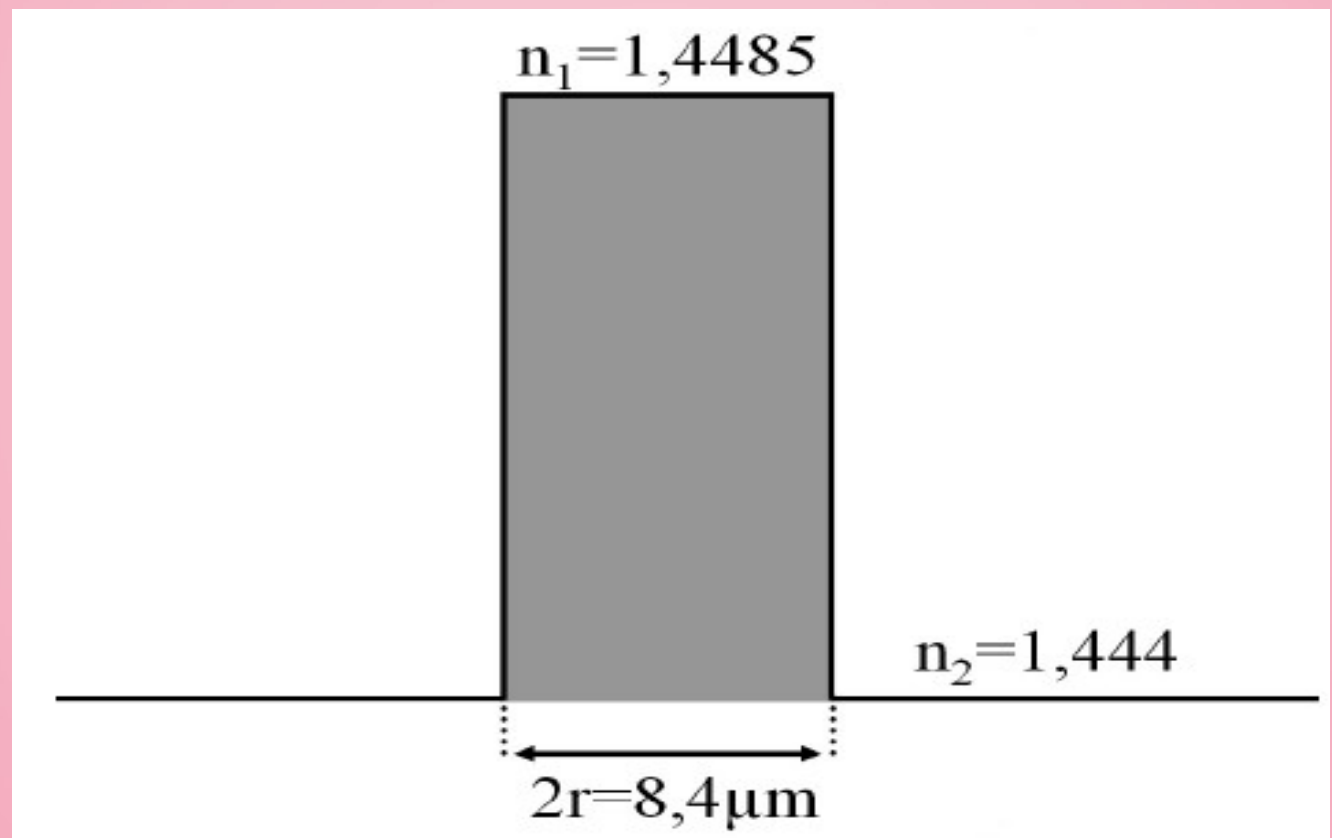
*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## *Application à la fibre monomode*

La fibre qui va nous servir pour ce test est une fibre optique monomode standard du type SMF-28.



**Fig10:** profil d'indice de réfraction d'une fibre du type SMF-28.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

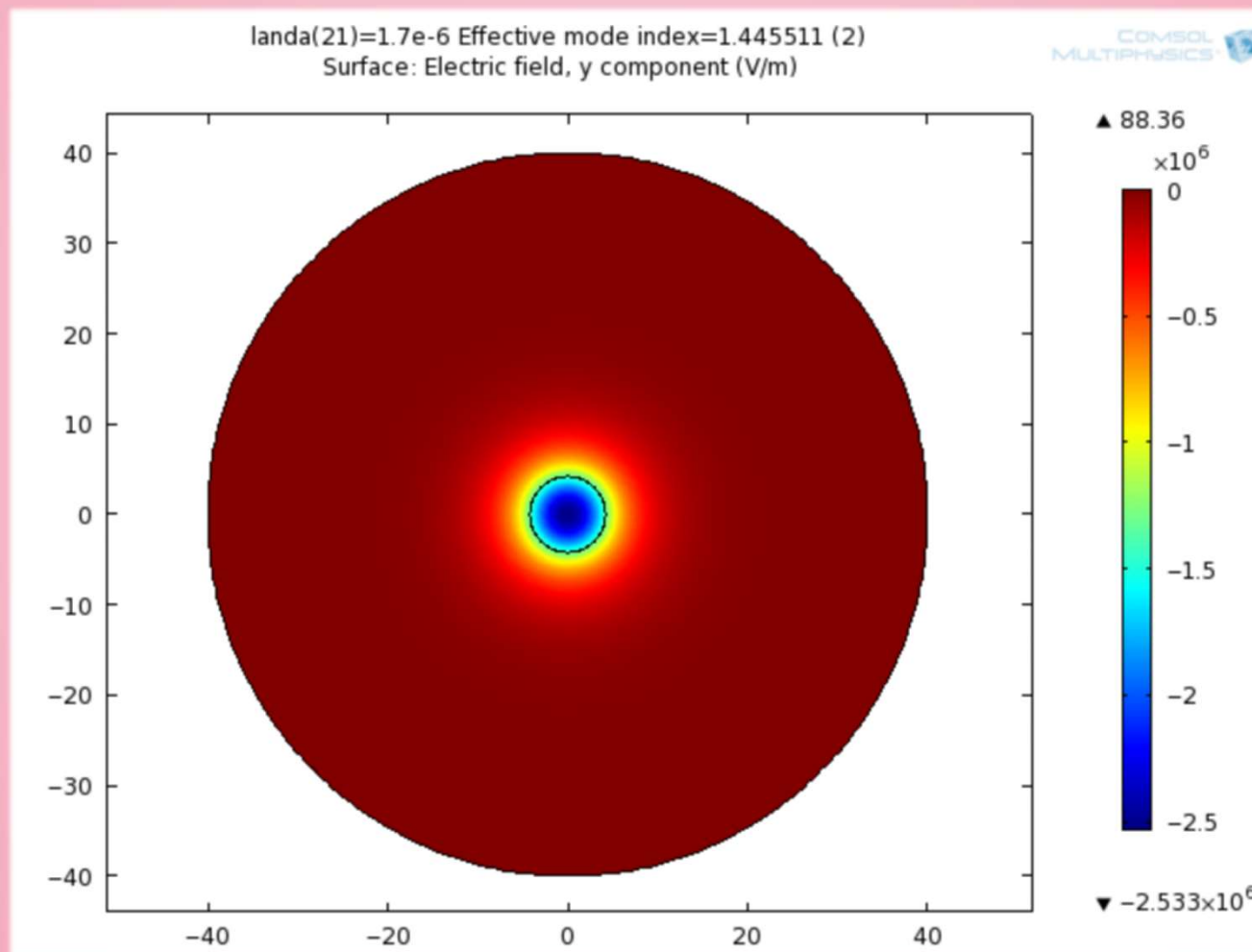
*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

*Simulations et  
résultats obtenus*

*Application à la  
fibre monomode*



**Fig I**: le profil transversal du mode fondamental de la fibre SMF-28.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

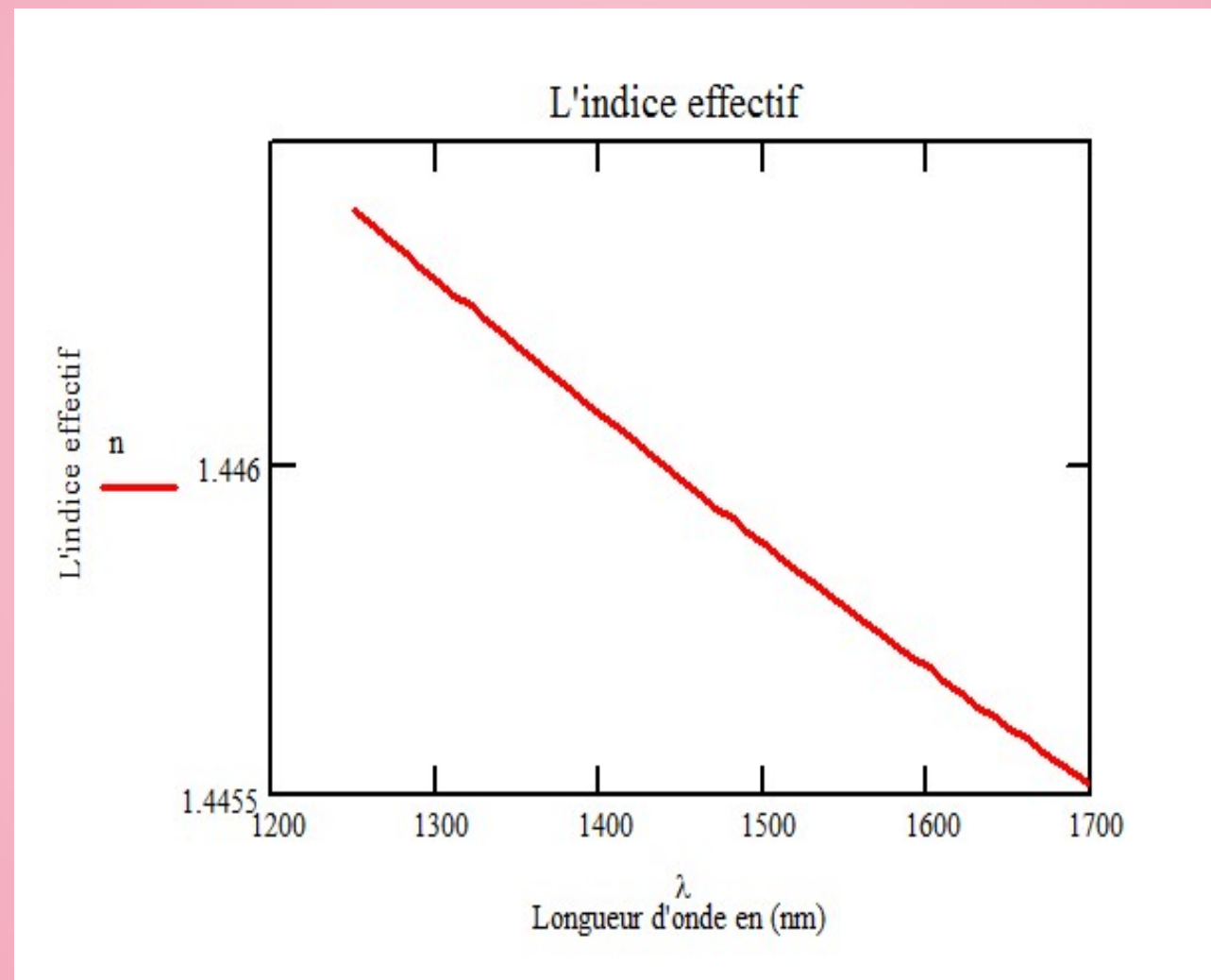
*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

*Simulations et  
résultats obtenus*

*Application à la  
fibre monomode*



**Fig1 2:** variation spectrale de l'indice de la fibre SMF-28.



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

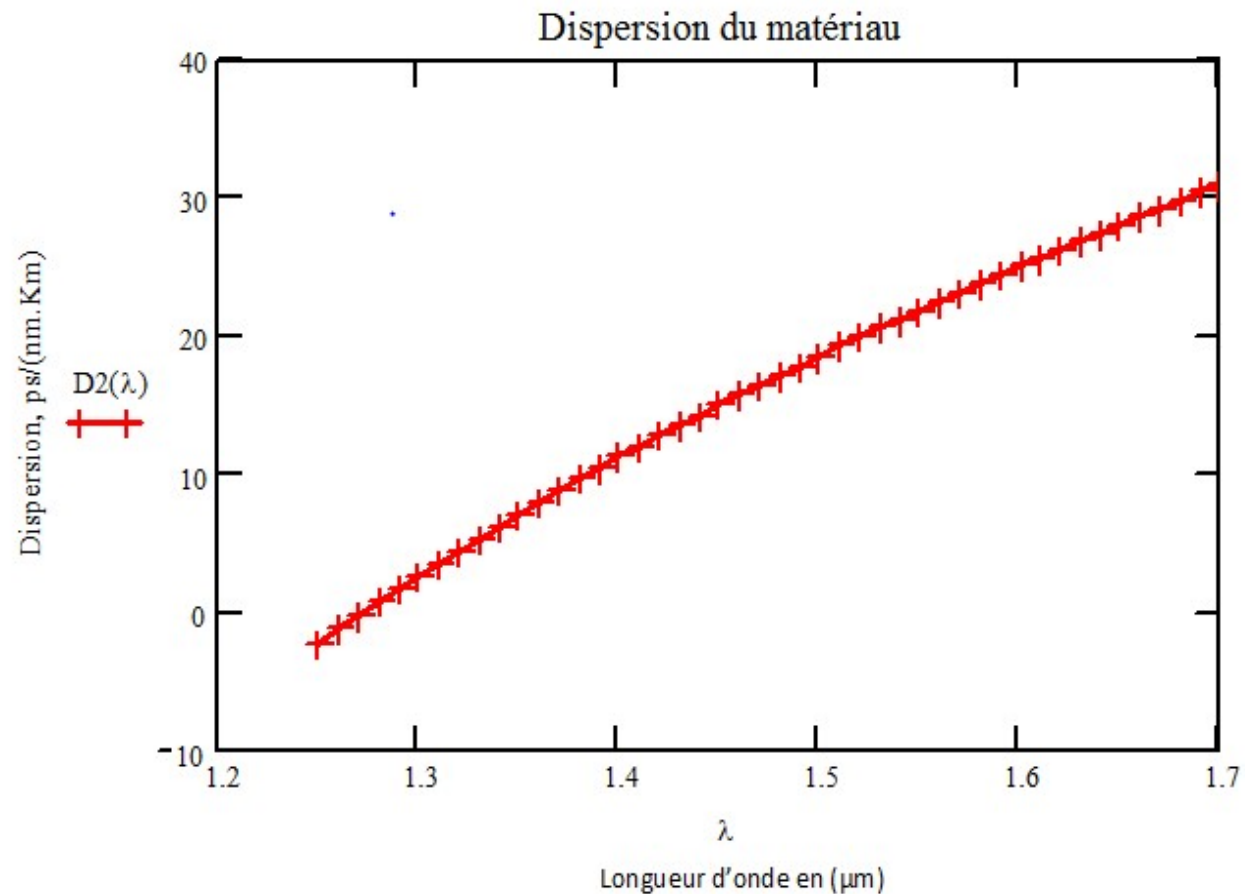
*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

*Simulations et  
résultats obtenus*

*Application à la  
fibre monomode*



**Fig 14:** la dispersion du matériau pour la fibre SMF-28.  
**Fig 13:** la dispersion du guide pour le mode fondamental de la fibre SMF-28.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

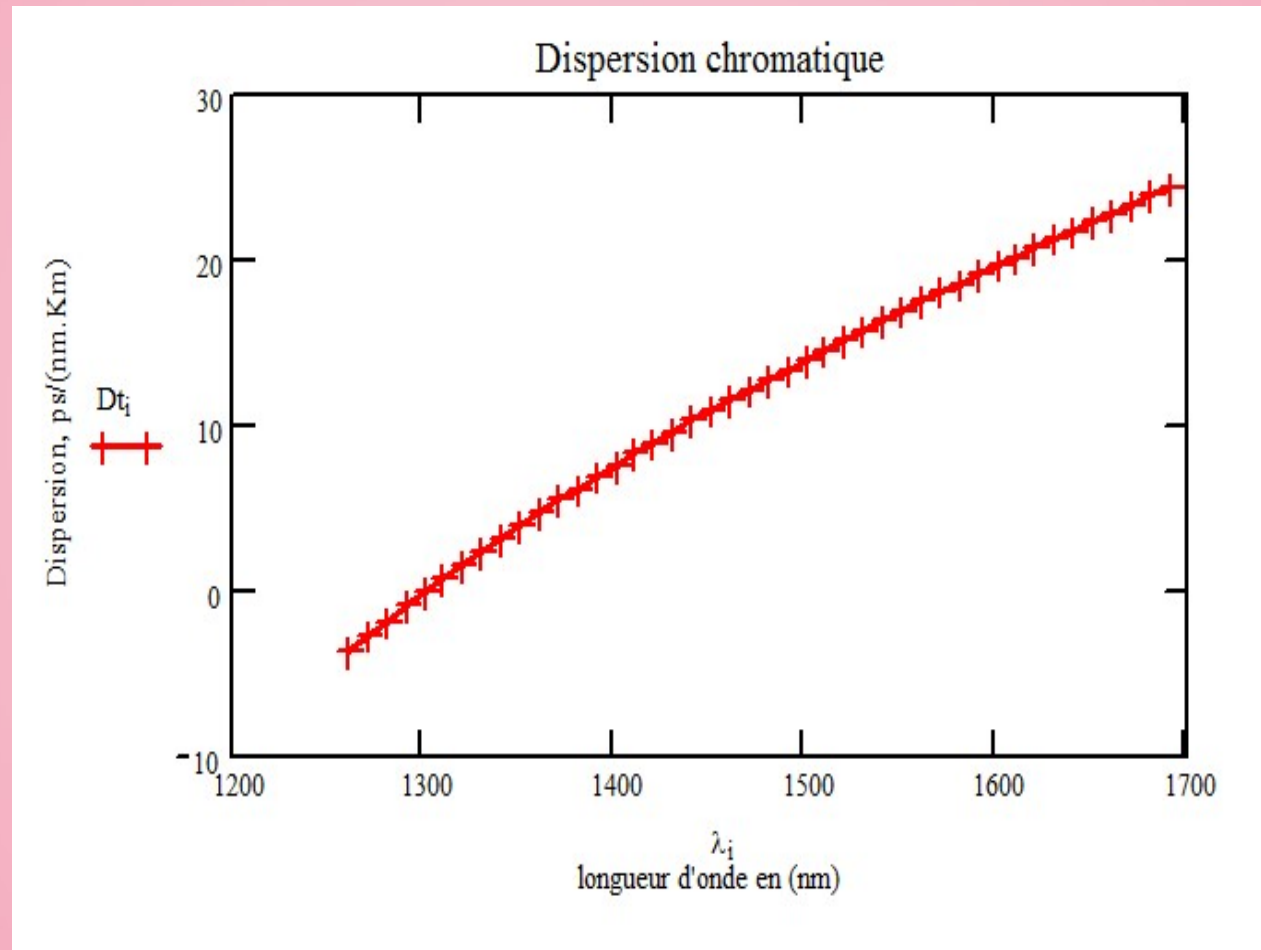
*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

*Simulations et  
résultats obtenus*

*Application à la  
fibre monomode*



**Fig 15:** Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre unimodale. SMF-28.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

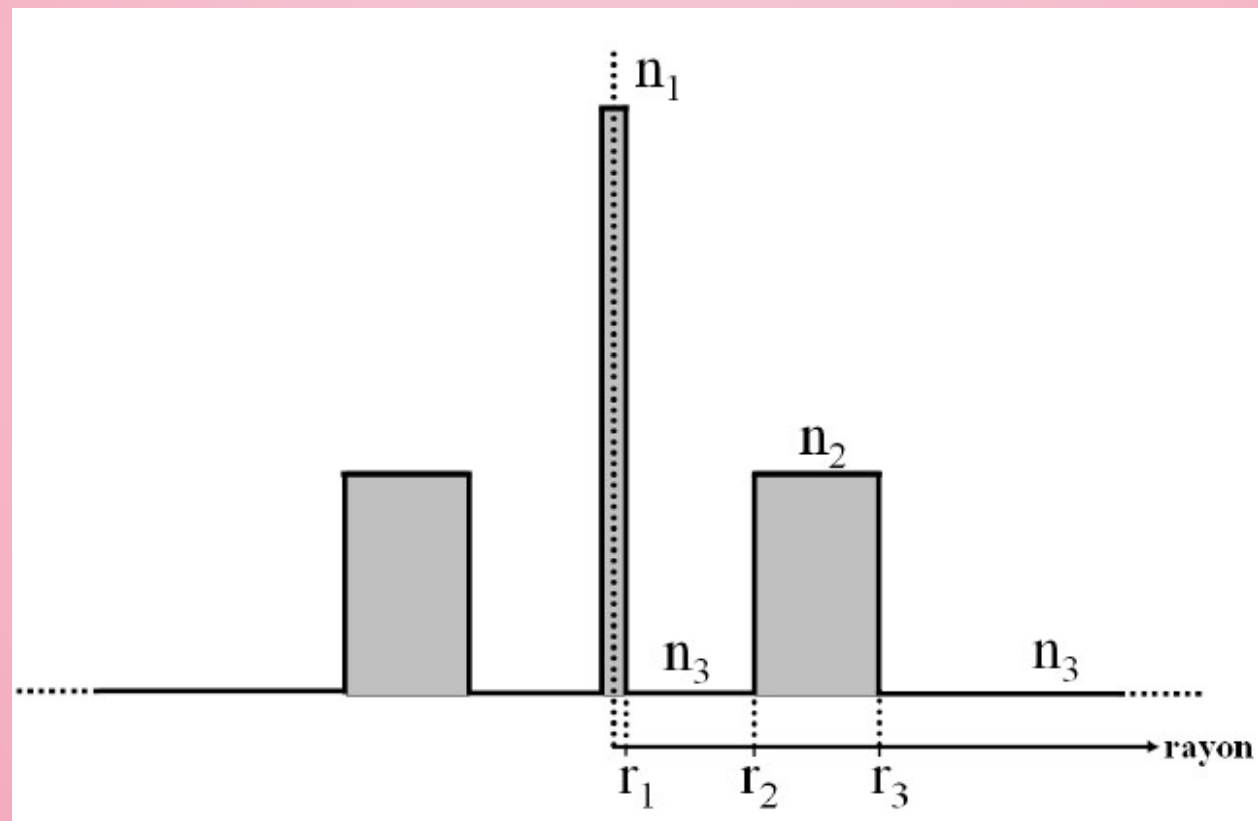
*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

## *Application à la fibre compensatrice de dispersion chromatique*

Le type de fibre compensatrice qui sera l'objet de mon étude sont les fibres à deux cœurs concentriques (FDCC)



**Fig16** : Profil d'indice de réfraction d'une FDCC.



## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

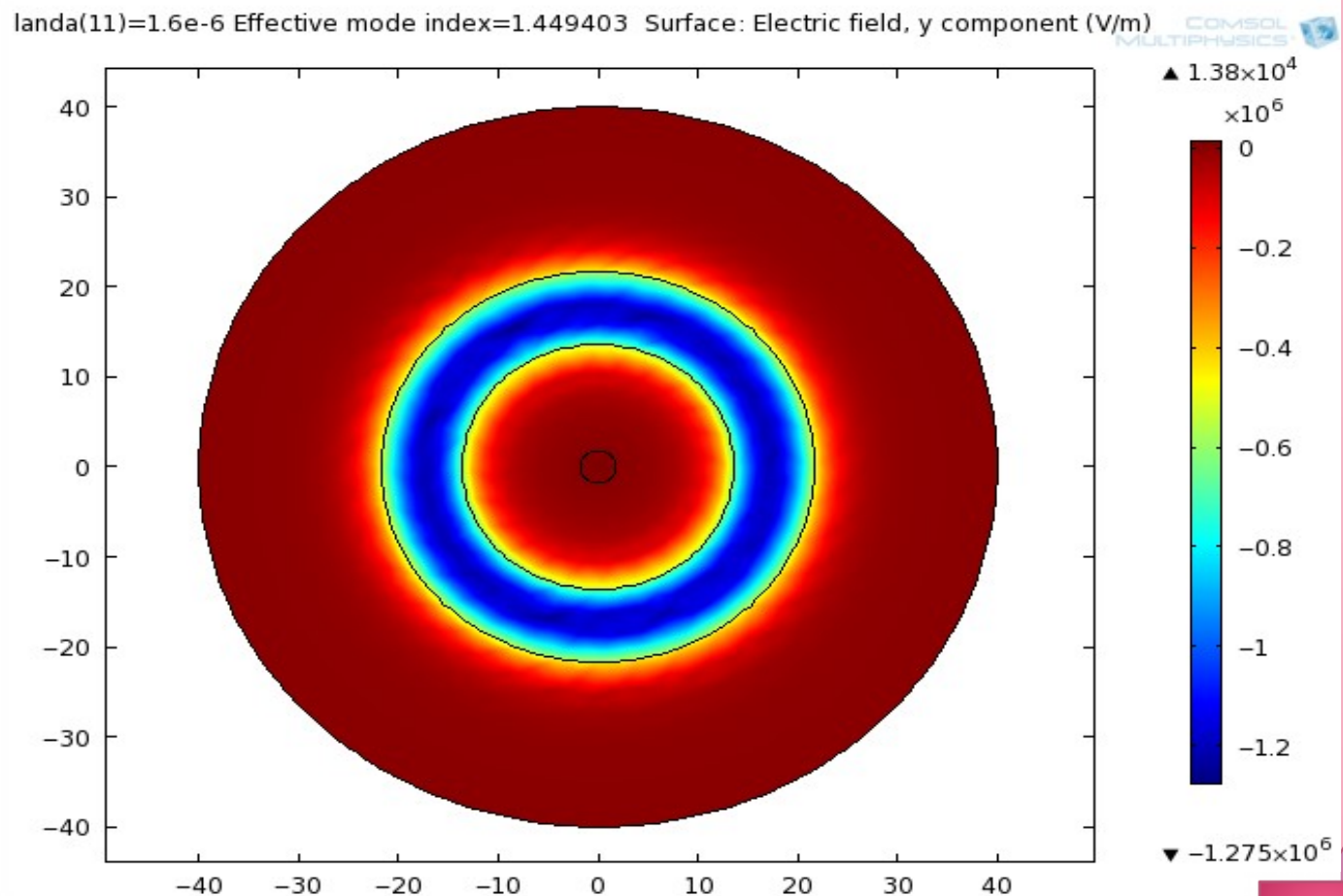
## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

## **Simulations et résultats obtenus**

Nous avons simulé quatre fibres avec des caractéristiques opto-géométriques différentes.

## *Application à la fibre compensatrice de dispersion chromatique*



## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

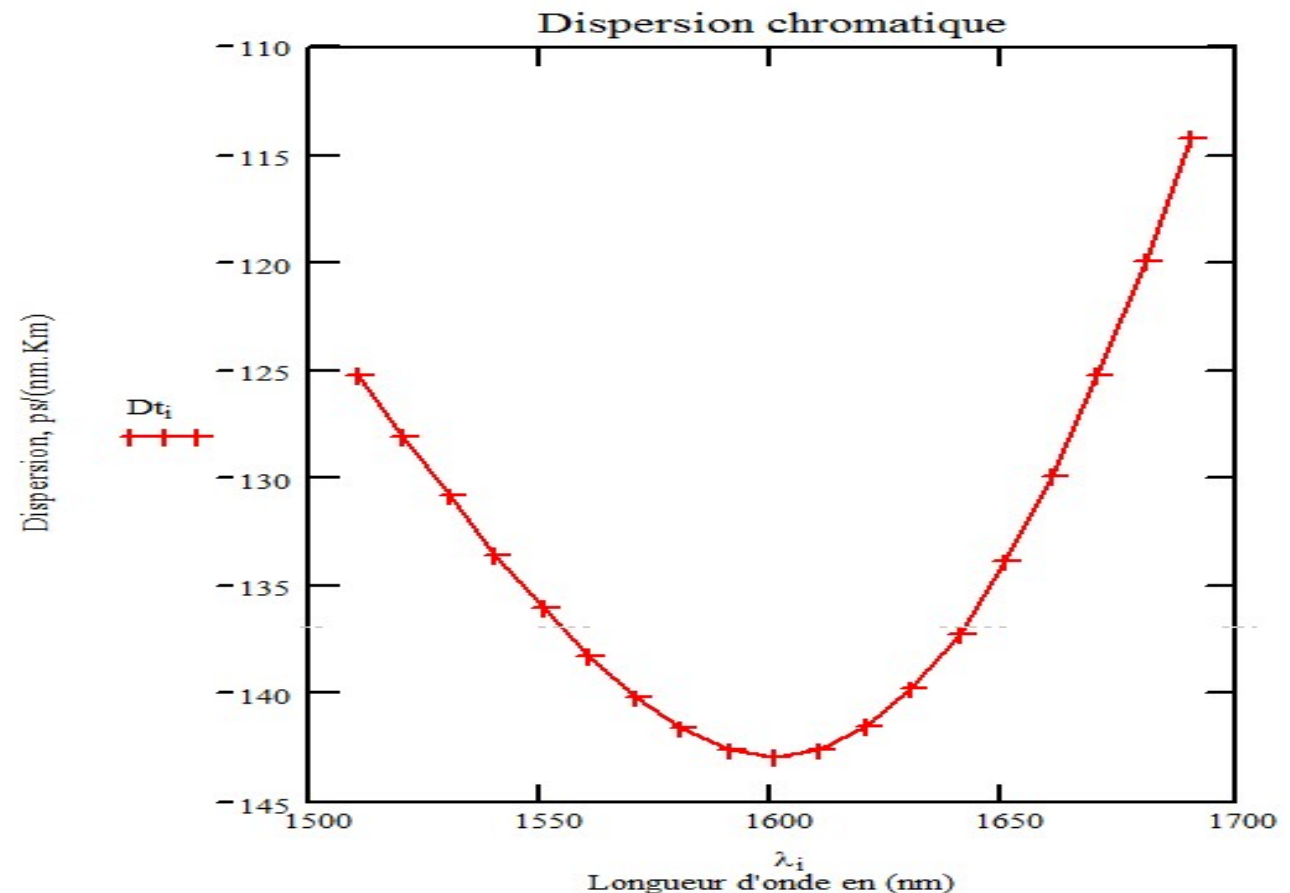
## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

## **Simulations et résultats obtenus**

## ***Application à la fibre compensatrice de dispersion chromatique***

La première fibre FDCC :



**Fig18 :** Evolution de la dispersion chromatique d'une fibre compensatrice  
**Fig17 :** variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(I).



*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

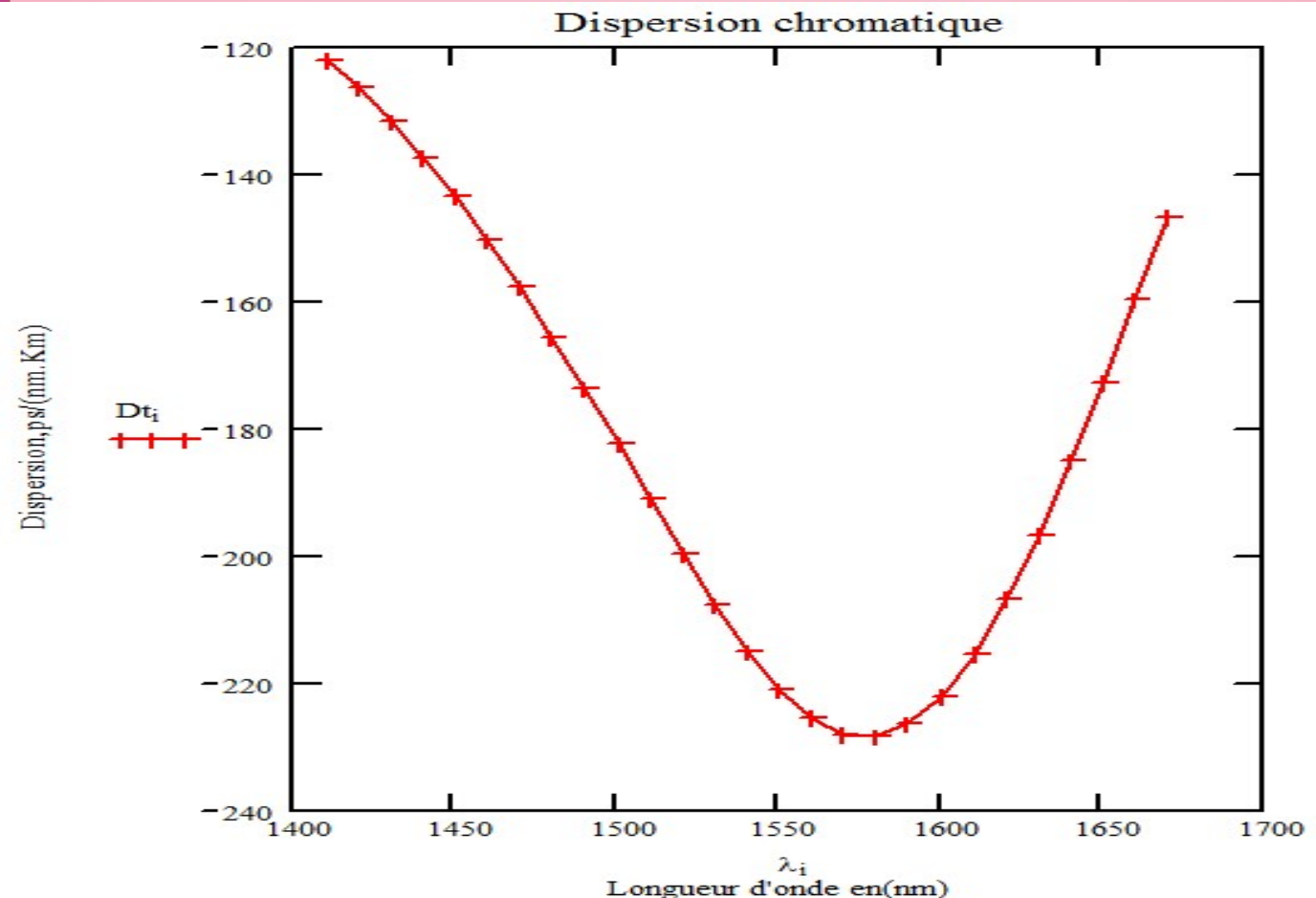
*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

**Simulations et  
résultats obtenus**

***Application à la fibre  
compensatrice de  
dispersion  
chromatique***

La deuxième fibre FDCC :



**Fig17** : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(2).

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

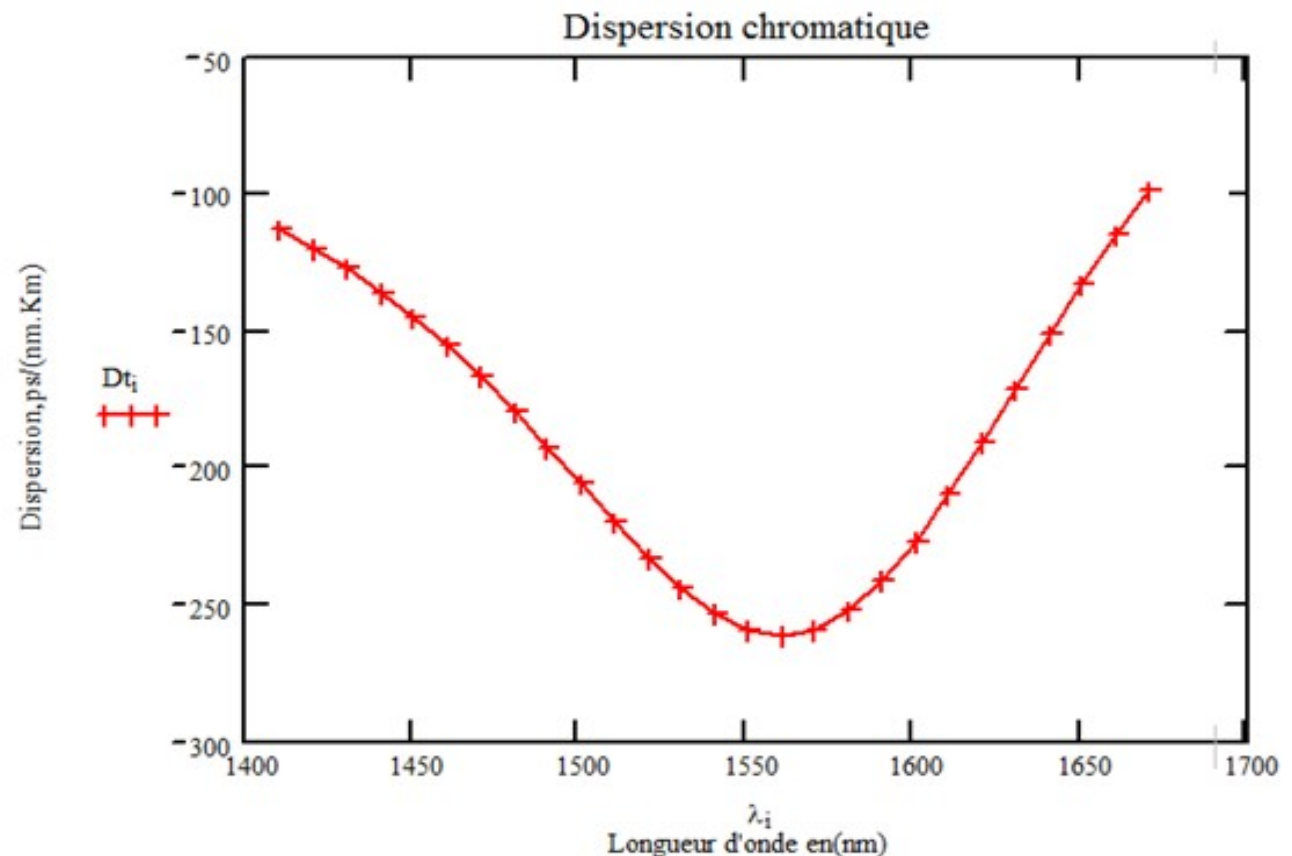
*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

**Simulations et  
résultats obtenus**

***Application à la fibre  
compensatrice de  
dispersion  
chromatique***

La troisième fibre FDCC :



**Fig 17 :** variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(3).

## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

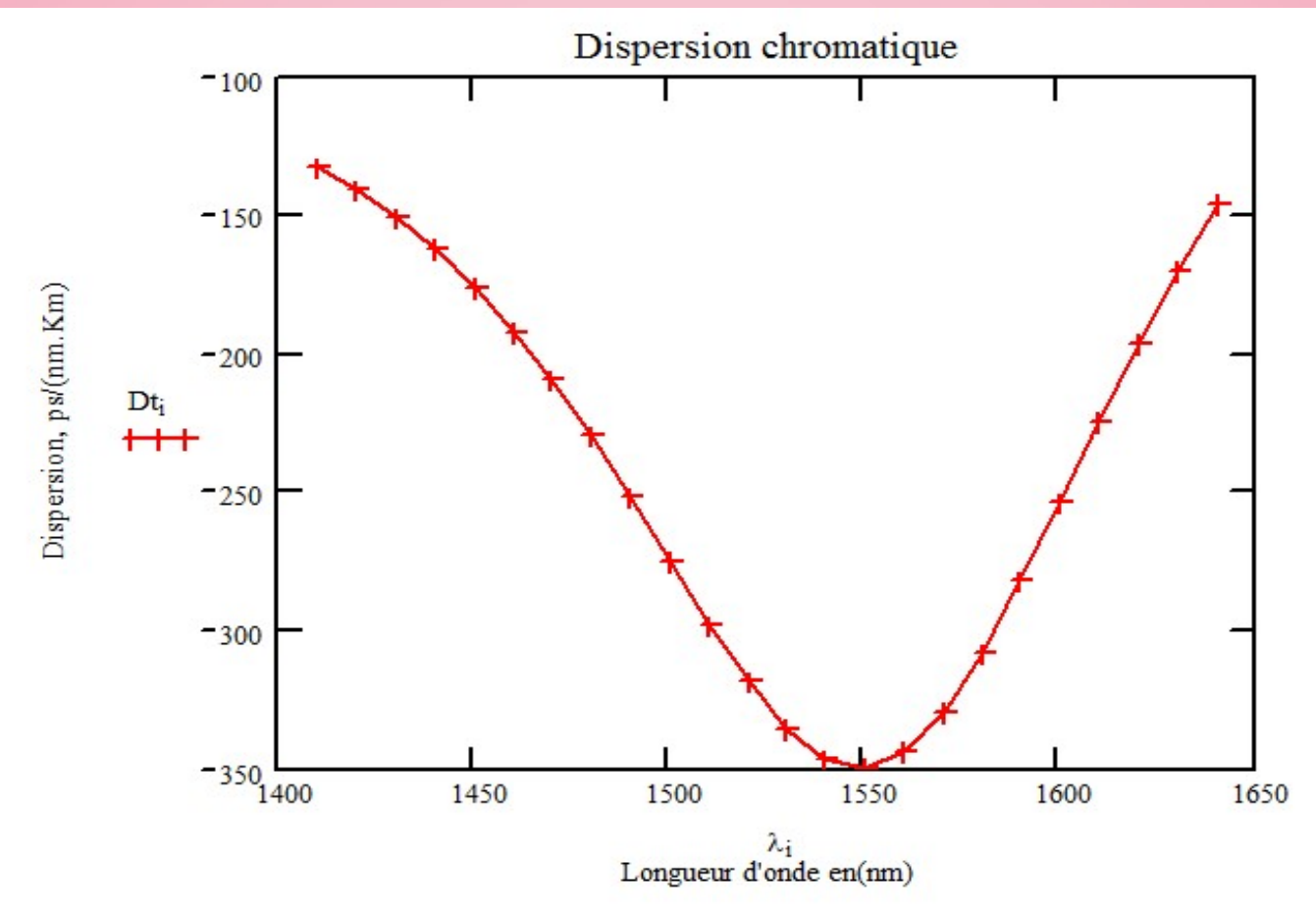
## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

## **Simulations et résultats obtenus**

## ***Application à la fibre compensatrice de dispersion chromatique***

La quatrième fibre FDCC :



**Fig17** : variation spectrale de l'indice de la fibre FDCC(4).



***Introduction***

***Généralités  
sur les fibres  
optiques***

***Dispersion  
chromatique***

***Simulation et  
Interprétation  
des résultats***

***Conclusion***

***Simulations et  
résultats obtenus***

***Application à la fibre  
compensatrice de  
dispersion  
chromatique***

Cas :	Dch [ps/(nm.km)]	$\lambda_0$ (nm)	Pente de Dch à 1550nm [ps/(nm <sup>2</sup> .km)]	K (SMF/FDCC)
Cas 1	-142.899	1600	-0.473	8.051
Cas 2	-228.291	1580	-0.756	13.139
Cas 3	-261.597	1560	-0.867	15.359
Cas 4	-349.003	1550	-1.065	20.658

Il apparaît que le profil d'indice de réfraction (cas 4) autorisant un K=20.658 est un bon candidat potentiel.

## *Introduction*

## *Généralités sur les fibres optiques*

## *Dispersion chromatique*

## *Simulation et Interprétation des résultats*

## *Conclusion*

### *Application à la compensation de dispersion chromatique*

Nous avons calculé La grandeur RDS pour traduire l'efficacité de la compensation large bande.

Fibre	Dch ps/(nm.km)	pente [ps/(nm <sup>2</sup> .km)]	RDS
SMF-28	16.894	0.056	$3.25 \times 10^{-3}$
FDCC	-349.003	-1.065	$3.05 \times 10^{-3}$

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

# Conclusion

L'un des problèmes majeurs apparu avec la montée en débit réside dans la valeur de la dispersion chromatique des fibres de ligne dont la plupart n'ont pas été optimisées pour fonctionner dans les fenêtres actuelles de transmission situées autour des  $1,55\mu\text{m}$ .

L'étalement temporel est estimé à  $16,5 \text{ ps}/(\text{nm.km})$  pour une fibre du type SMF-28, et de ce fait les débits de transmission se retrouvent naturellement limités.

C'est pourquoi, l'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de concevoir des fibres optiques spécifiques réalisant la fonction de compensation de dispersion chromatique.



***Introduction***

***Généralités  
sur les fibres  
optiques***

***Dispersion  
chromatique***

***Simulation et  
Interprétation  
des résultats***

***Conclusion***

Enfin, nous estimons que ce travail à été d'une grande utilité pour nous qui étudions le domaine des télécommunications et on espère qu'il sera bénéfique pour les promotions à venir.

*Introduction*

*Généralités  
sur les fibres  
optiques*

*Dispersion  
chromatique*

*Simulation et  
Interprétation  
des résultats*

*Conclusion*

Merci pour  
votre  
attention



landa(21)=1.7e-6 Effective mode index=1.447487 (2)  
Surface: Electric field, y component (V/m)

COMSOL  
MULTIPHYSICS

