

FIBRES OPTIQUES

■ FIBRE A SAUT D'INDICE

- Modes de propagation
- diagramme de dispersion
- nombre de modes, modes LP, fibre monomode.

■ DISPERSION DANS LES FO MULTIMODES

- Dispersion intermodale
- Limitation des performances
- La fibre à gradient d'indice

■ FIBRE MONOMODE:

- Dispersion chromatique : dispersion matériau, et dispersion guide d'onde.
- Fibre standard et fibre à dispersion décalée
- Dispersion de modes de polarisation PMD

■ TRANSMISSIONS SUR FO MONOMODE

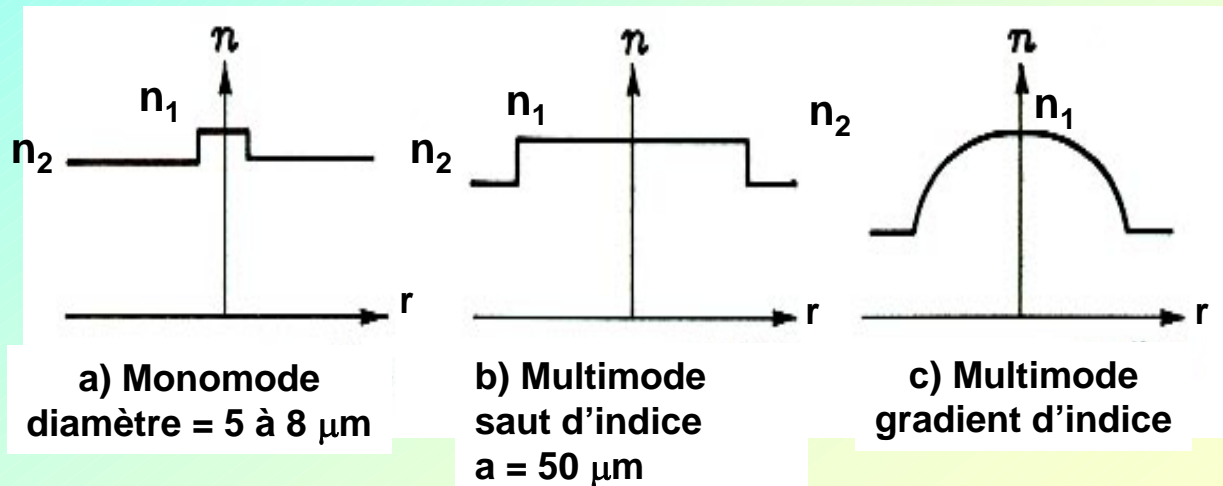
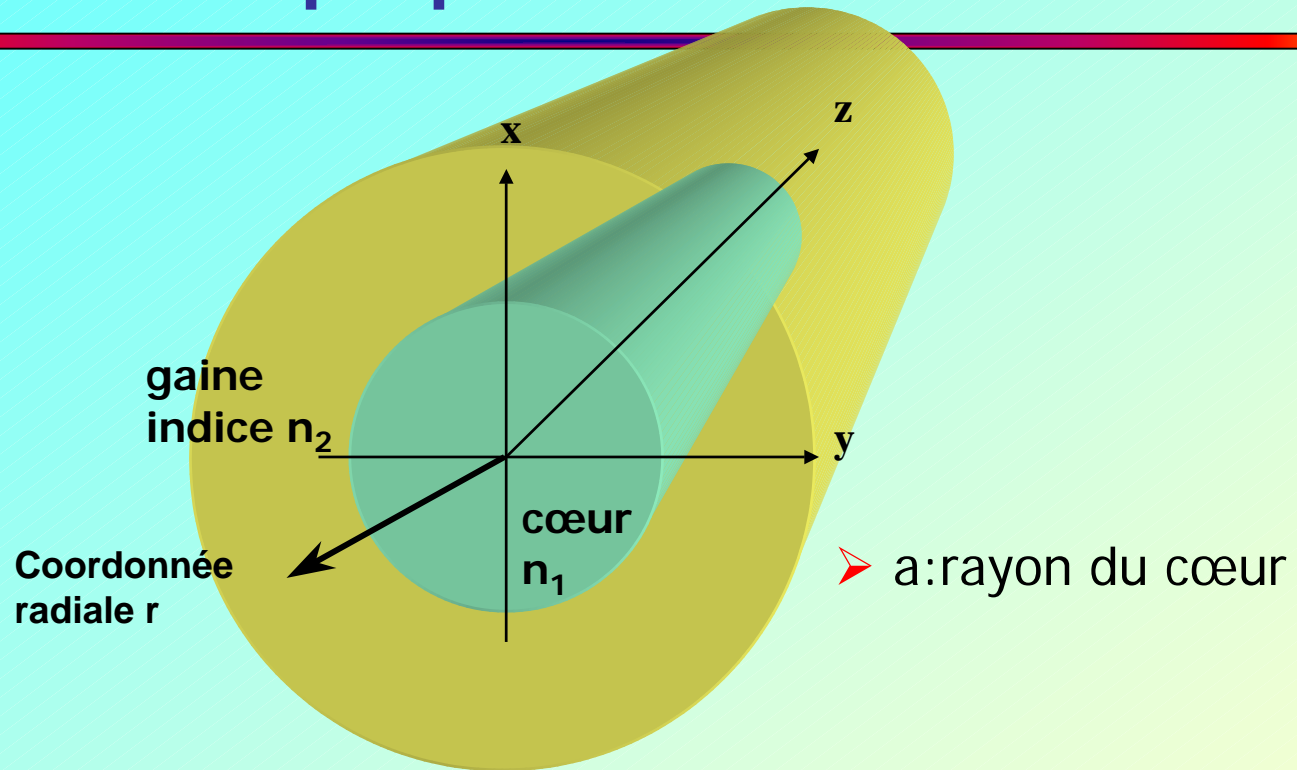
- Pertes intrinsèques
- Limitation due à la dispersion
- Compensation de dispersion
- Hauts débits – longues distances
- Principe du WDM
- Fibres pour transmission à 1,55 mm.

■ AUTRES FIBRES OPTIQUES

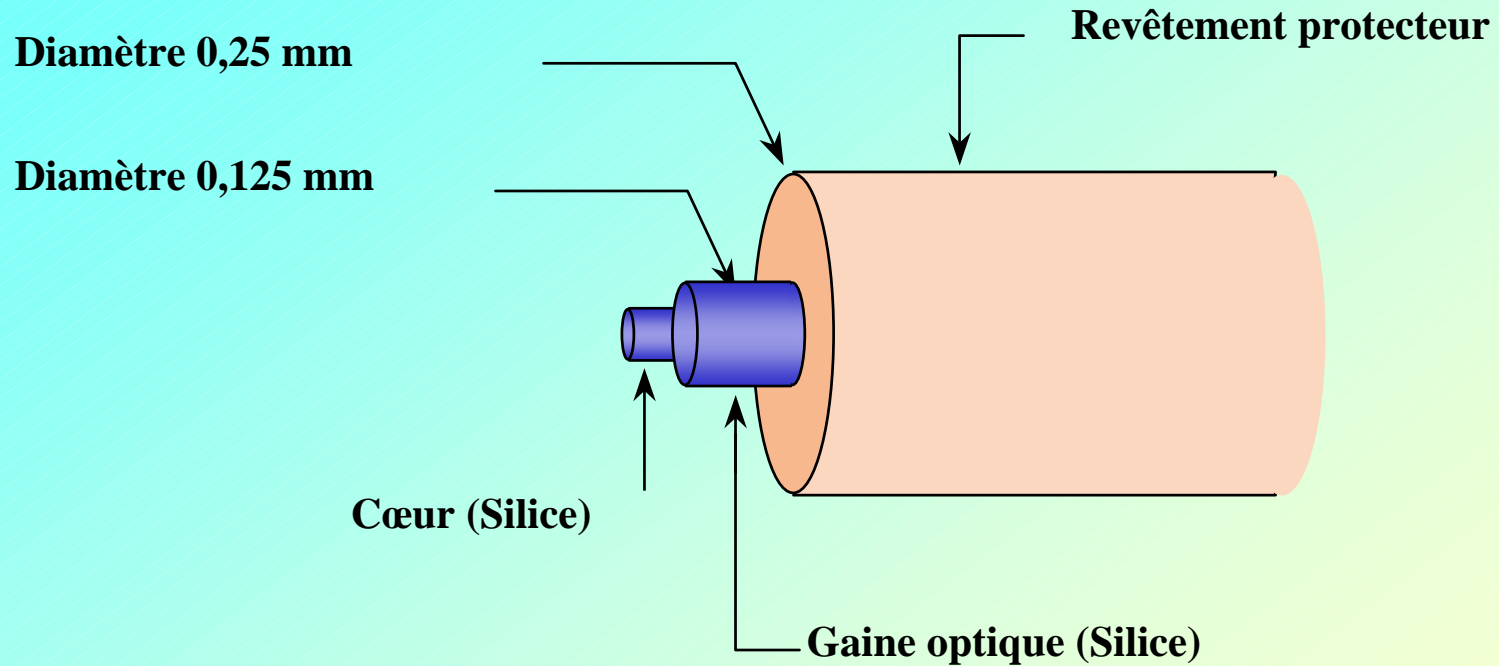
- Fibres à « maintien de polarisation »
- Différents matériaux
- Fibres spéciales microstructurées et à BIP.

■ FORMULAIRE DES FIBRES OPTIQUES

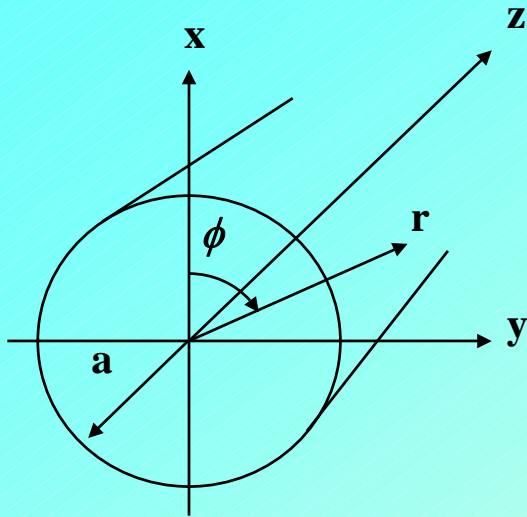
Types de fibres optiques



Constitution d'une fibre optique



MODES TE et TM – RAYONS MERIDIENS

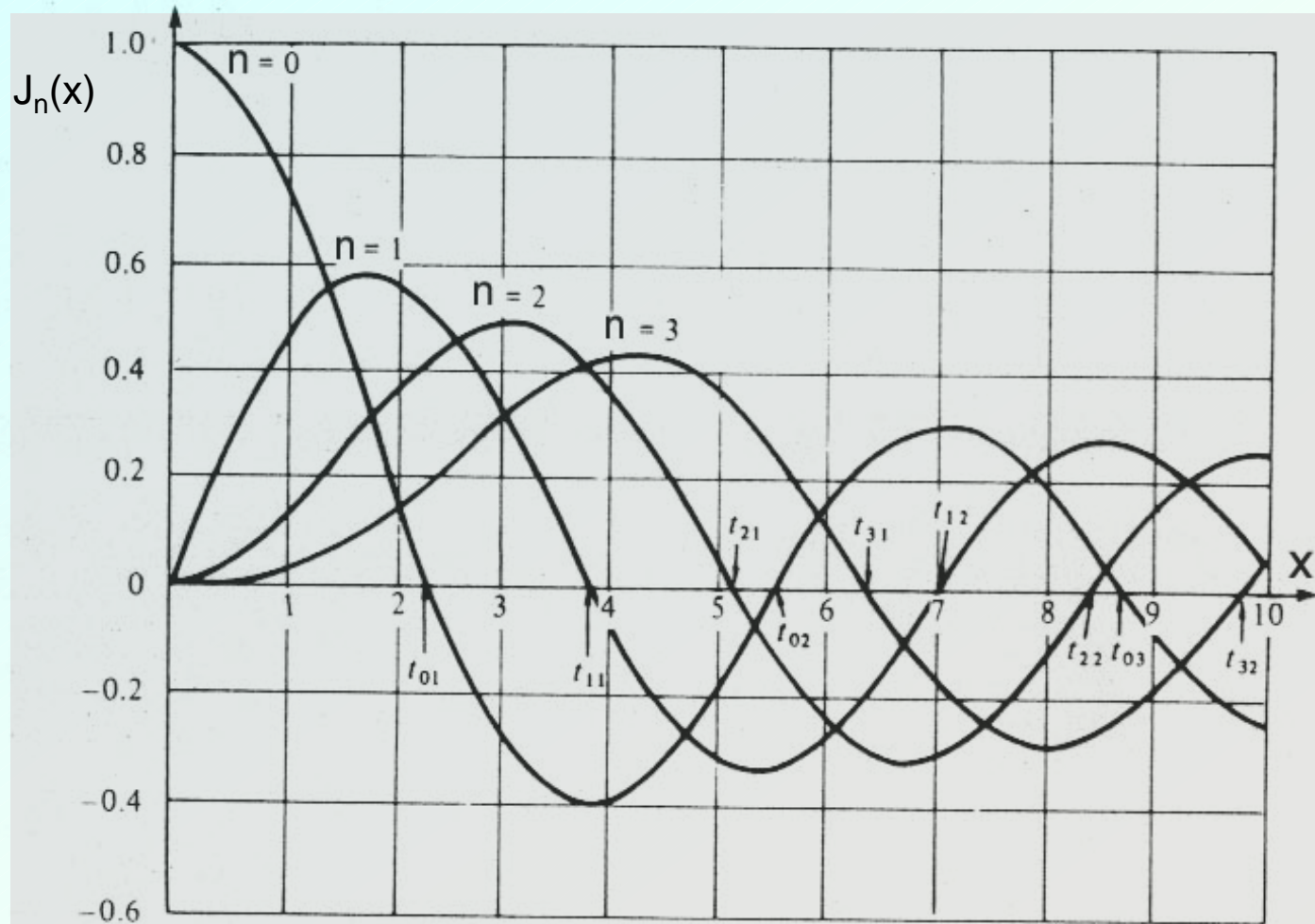


Coordonnées cylindriques (r, ϕ, z)

$$\vec{E} \begin{vmatrix} E_r \\ E_\phi \\ E_z \end{vmatrix} \quad \vec{H} \begin{vmatrix} H_r \\ H_\phi \\ H_z \end{vmatrix}$$

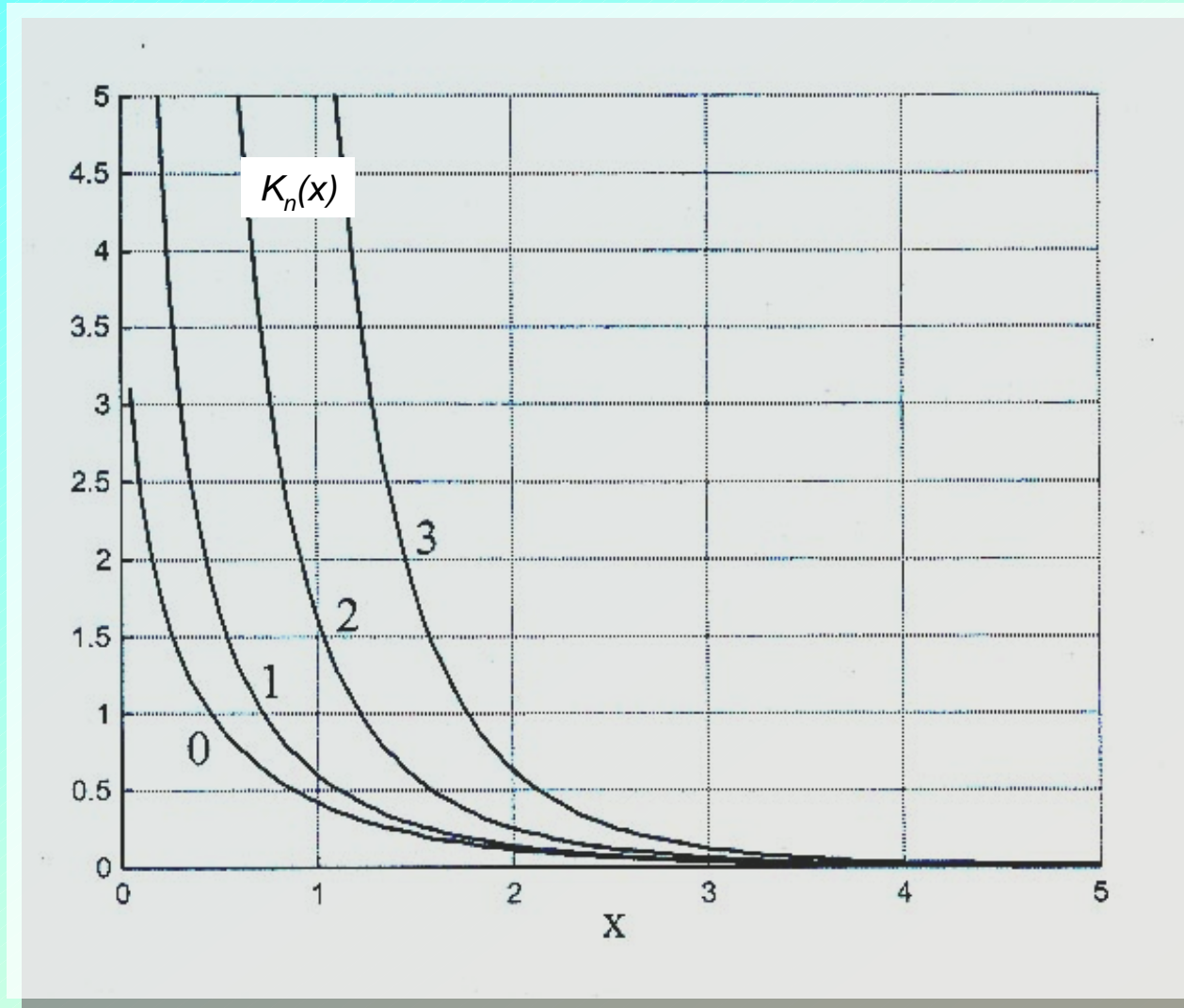
- Cœur : $r \leq a \longrightarrow \begin{vmatrix} E_i \\ H_i \end{vmatrix} \propto J_n(r) \begin{vmatrix} \cos(n\phi) \\ \sin(n\phi) \end{vmatrix}$
 - $J_n(r)$ garde une valeur finie en $z = 0$
- Gaine : $r \geq a \longrightarrow \begin{vmatrix} E_i \\ H_i \end{vmatrix} \propto K_n(r) \begin{vmatrix} \cos(n\phi) \\ \sin(n\phi) \end{vmatrix}$
 - $K_n(r)$ décroissance rapide en fonction de r
onde évanescente
- Cas $n = 0$: champs indépendants de ϕ
 - Symétrie de révolution cylindrique
 - Modes $TE_{0m} \longrightarrow E_z = 0$
 - Modes $TM_{0m} \longrightarrow H_z = 0$
- Les rayons sont contenus dans des ***plans méridiens***

Solution pour $r < a$ (cœur)



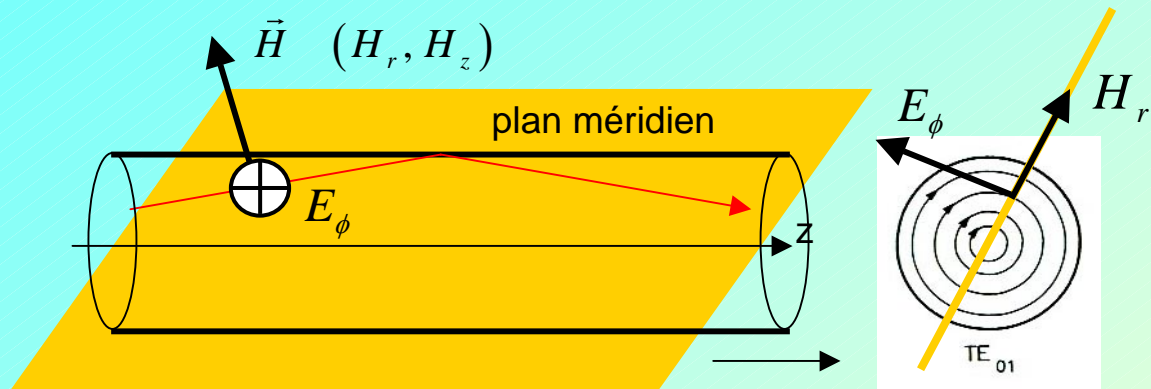
Fonctions de Bessel de première espèce

Solution pour $r > a$ (gaine)

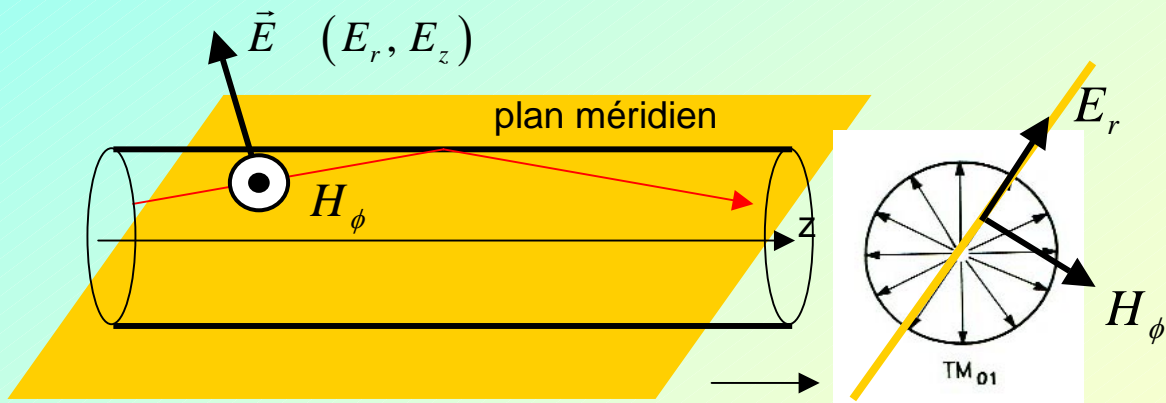


Fonctions de Bessel modifiées de seconde espèce $K_n(x)$.

CHAMPS DES MODES TE_{01} et TM_{01}

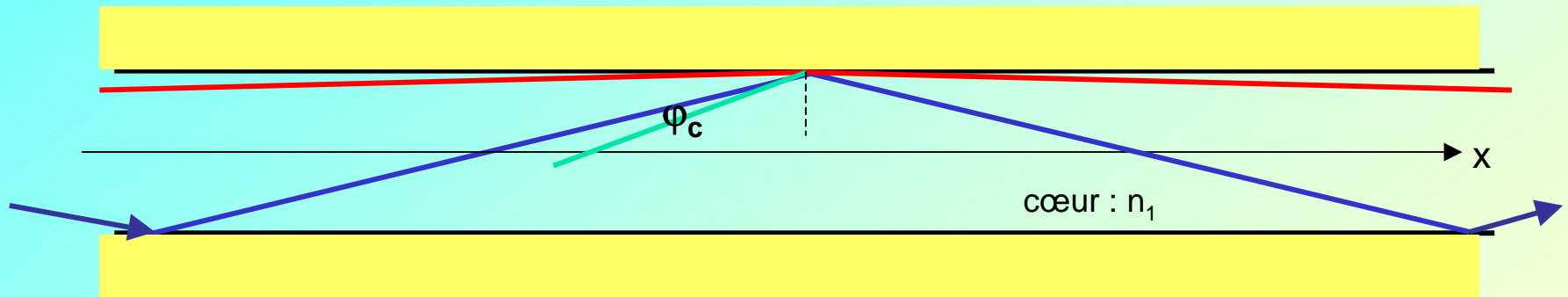


Mode TE_{01}



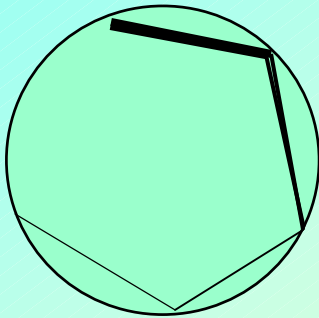
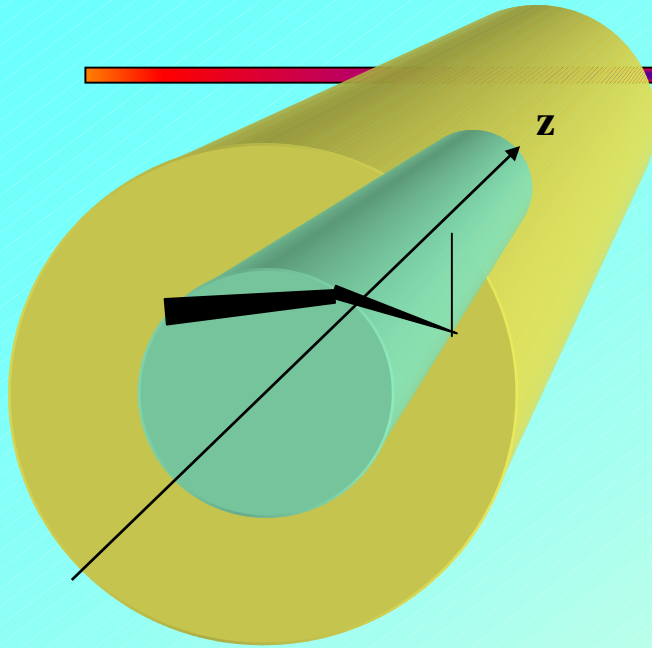
Mode TM_{01}

PROPAGATION DES RAYONS MERIDIENS



Propagation en « zig-zag »

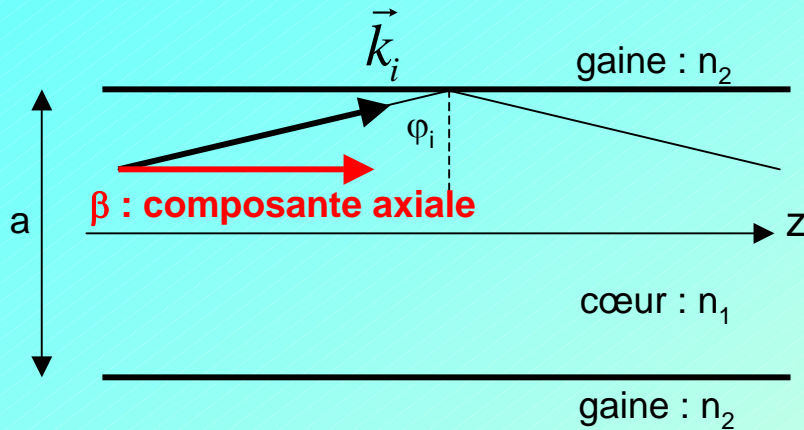
MODES HYBRIDES



- Cas $n \neq 0$
 - On perd la symétrie de révolution
 - Symétrie d'ordre $2\pi/n$
- Modes hybrides : $E_z \neq 0$ et $H_z \neq 0$
 - EH_{nm} transverse électrique dominant : E_z très petit
 - HE_{nm} transverse magnétique dominant : H_z très petit

Propagation des rayons hors de l'axe

PROPAGATION DES MODES



Les champs se propagent suivant l'axe Oz, avec la constante β_{nm} qui dépend du mode considéré.

$$E(\vec{r}, t) = E(r, \phi) \exp[j(\omega t - \beta z)]$$

■ POUR TOUS LES MODES

- Guidage par réflexion totale pour:

$$\varphi_c \leq \varphi_i \leq \pi/2$$

- Pas de perte par réflexion : $|r| = 1$
- Contrainte sur β :

$$\begin{aligned} \beta &= |\vec{k}_i| \sin \varphi_i = n_1 k_0 \sin \varphi_i \\ \beta &\leq n_1 k_0 \quad \text{car} \quad \sin \varphi_i \leq 1 \\ \beta &\geq n_1 k_0 \sin \varphi_c = n_2 k_0 \end{aligned}$$

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0$$

- Constante de propagation dans le vide

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

DIAGRAMME DE DISPERSION

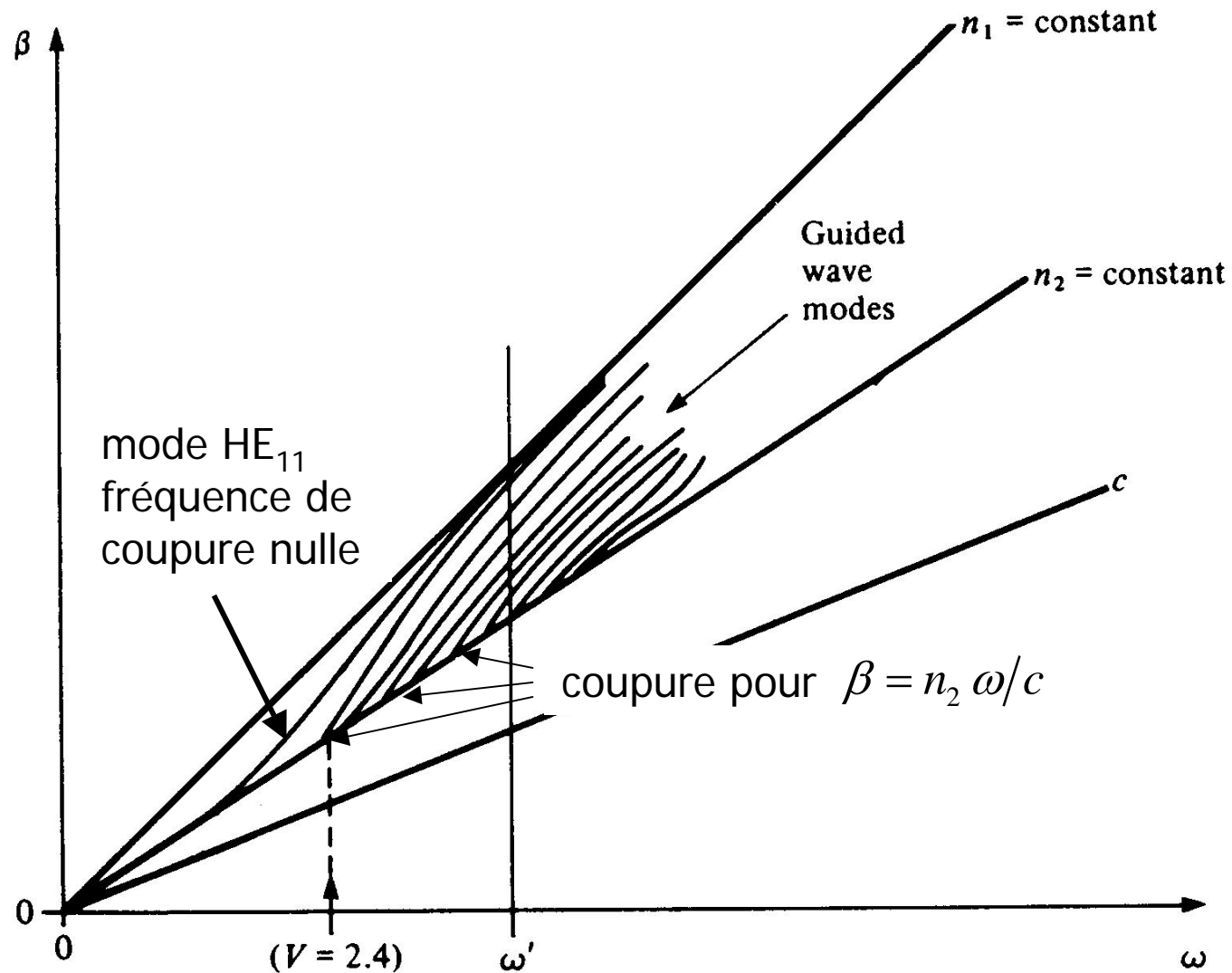
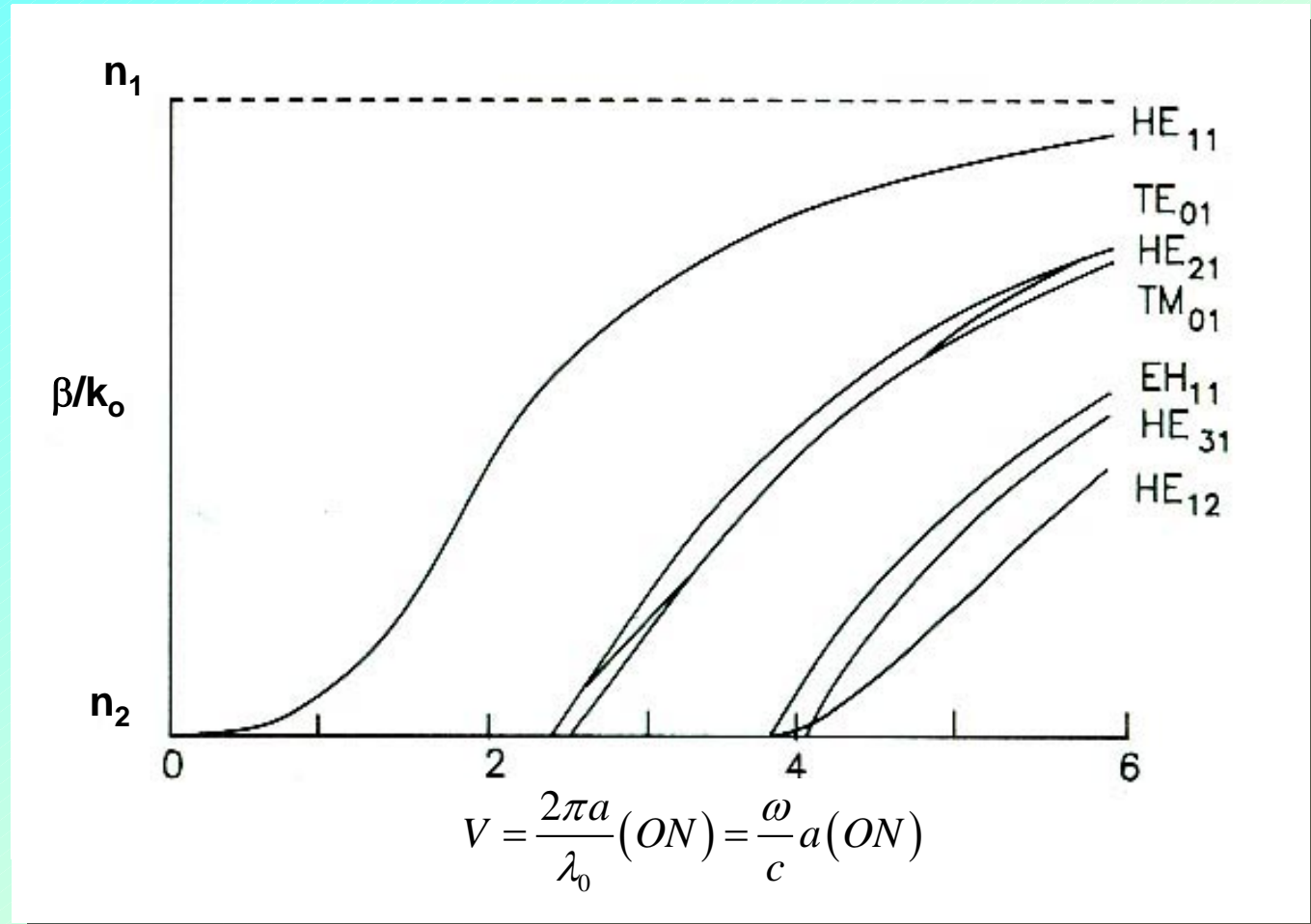


DIAGRAMME DE DISPERSION – COORDONNEES REDUITES

$$n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0$$

$$n_2 \leq \frac{\beta}{k_0} \leq n_1 \quad \longrightarrow$$



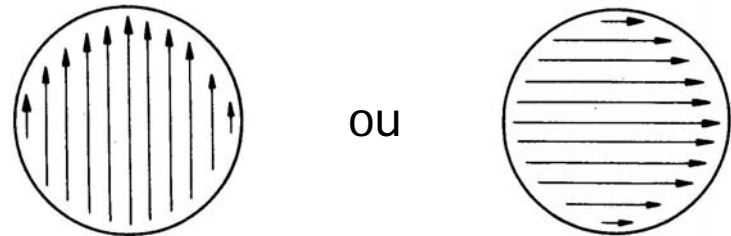
**Fibre Monomode: pour $V < 2,405$
seul le mode HE_{11} peut se propager**

❑ **Approximation du guidage faible :** $n_1 \square n_2$

❑ Angle limite de réflexion totale : $\varphi_c \leq \frac{\pi}{2}$

MODES LP : POLARISATION LINEAIRE

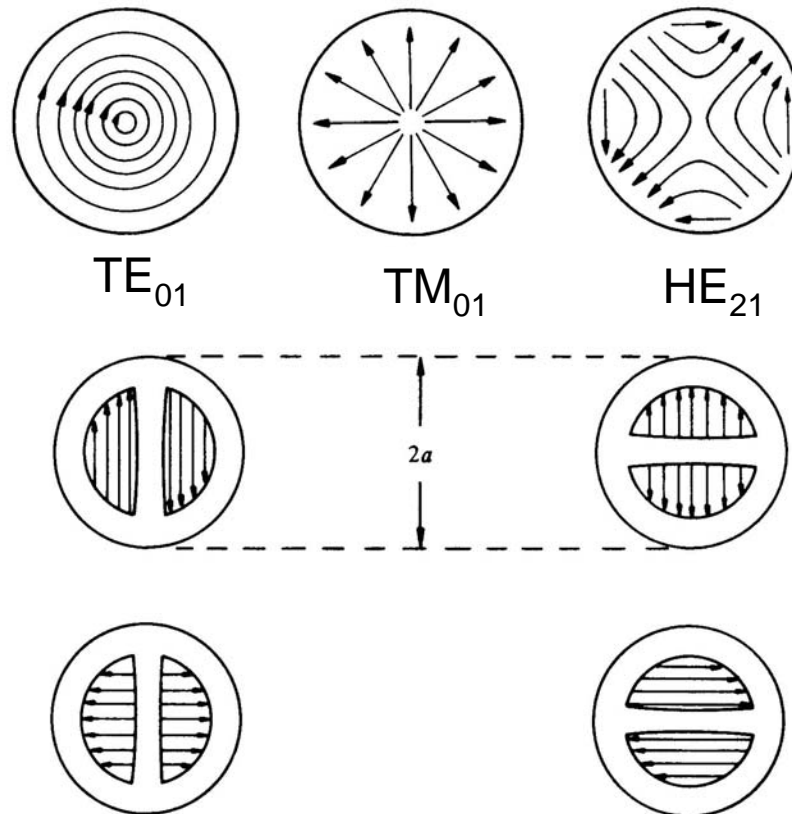
Orientation du champ électrique
transverse du mode fondamental
 LP_{01} (ou HE_{11})



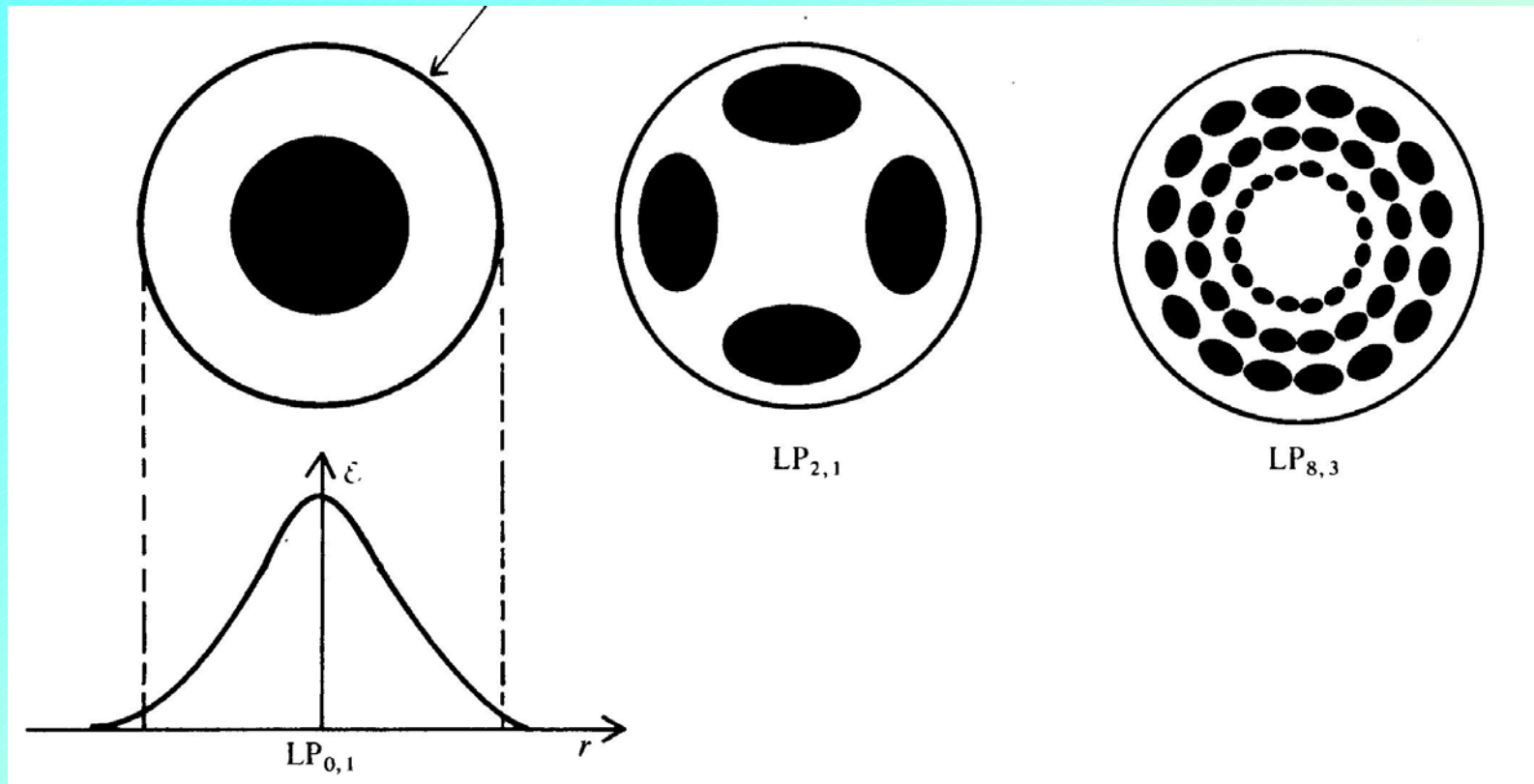
Les trois modes qui dans
l'approximation du guidage
faible s'associent.



Pour donner le mode LP_{11}



MODES LP_{lm}

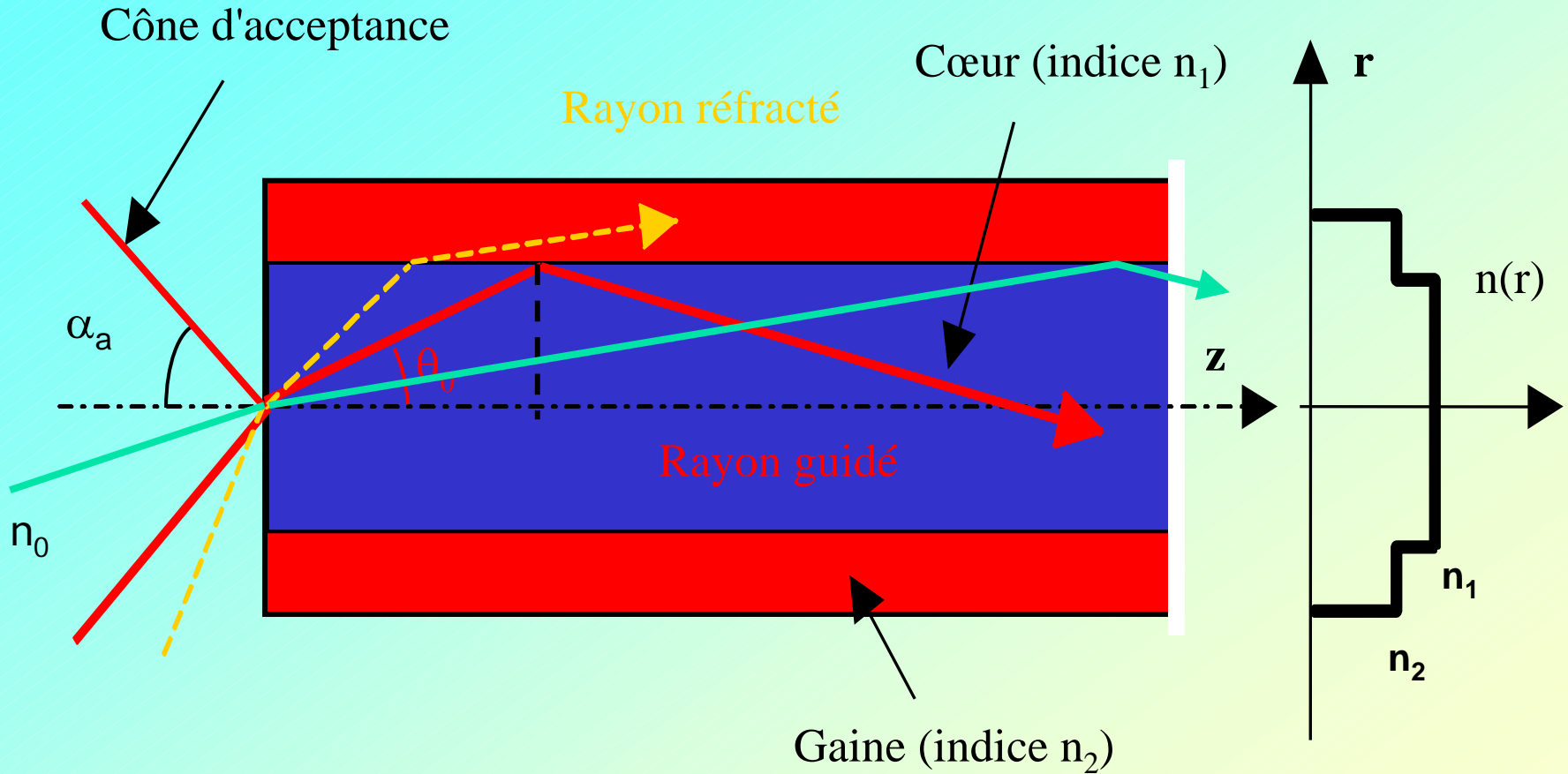


Mode fondamental

$$LP_{01} \equiv HE_{11}$$

- Onde stationnaire dans le plan transverse
 - Répartition des maximums de densité d'énergie dans le cœur.
 - Nombre de lobes sur une circonférence : $2l$
 - Nombre de lobes sur un rayon : m

CÔNE D'ACCEPTANCE – OUVERTURE NUMÉRIQUE

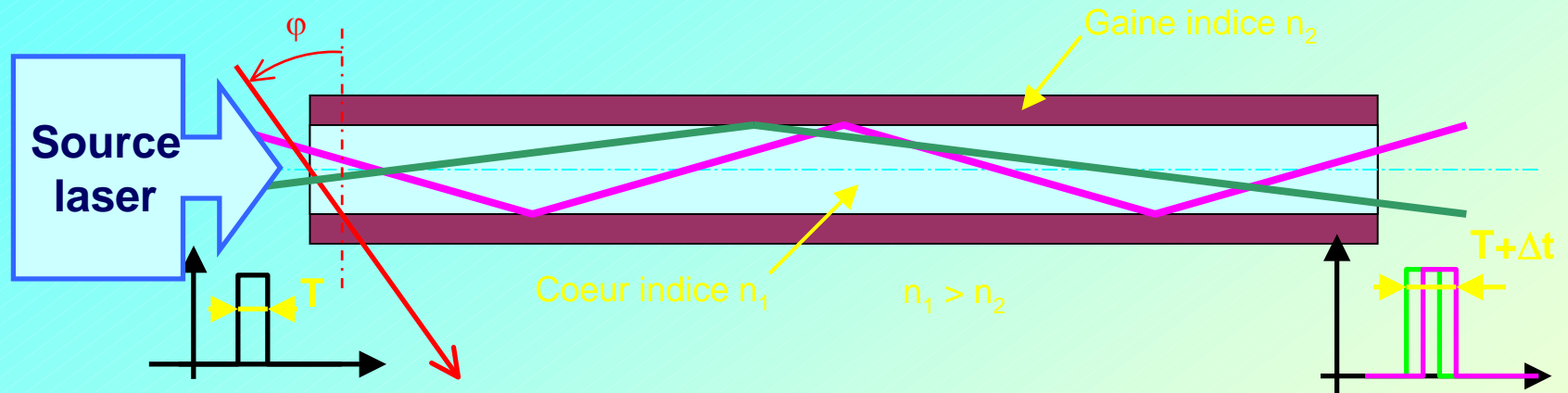


$$\sin \alpha_a = \frac{ON}{n_0} \quad \longrightarrow \quad ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

PLAN

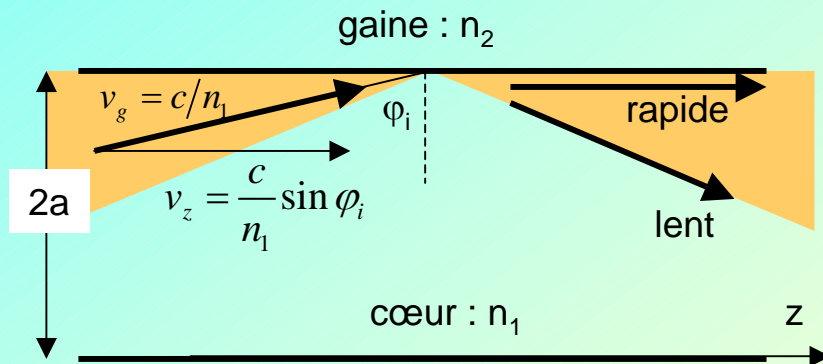
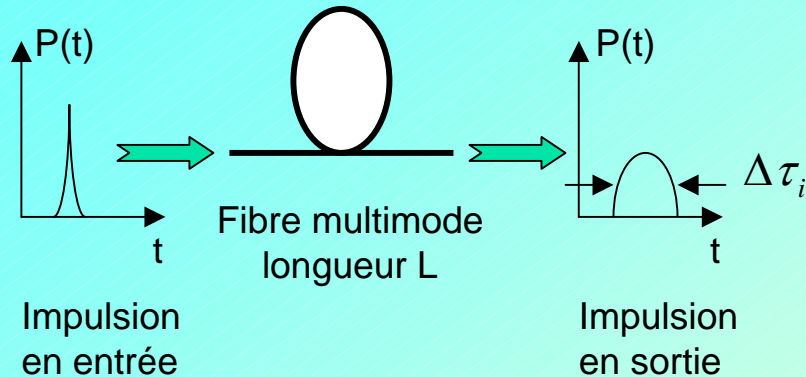
- FIBRE A SAUT D'INDICE
 - Modes de propagation
 - diagramme de dispersion
 - nombre de modes, modes LP, fibre monomode.
- DISPERSION DANS LES FO MULTIMODES
 - Dispersion intermodale
 - Limitation des performances
 - La fibre à gradient d'indice
- FIBRE MONOMODE:
 - Dispersion chromatique : dispersion matériau, et dispersion guide d'onde.
- Fibre standard et fibre à dispersion décalée
- Dispersion de modes de polarisation PMD
- TRANSMISSIONS SUR FO MONOMODE
 - Pertes intrinsèques
 - Limitation due à la dispersion
 - Compensation de dispersion
 - Hauts débits – longues distances
 - Principe du WDM
 - Fibres pour transmission à 1,55 μm .

Propagation dans la fibre optique



- Propagation modale dont la vitesse dépend :
 - du mode = dispersion modale

DISPERSION INTERMODALE



- L'énergie de l'impulsion se répartit entre les différents modes excités
- Les modes se propagent dans une direction φ_i qui dépend du mode:

$$\varphi_c \leq \varphi_i \leq \pi/2$$

- temps de propagation dans la fibre :

$$t = \frac{L}{v_z} = \frac{L n_1}{c \sin \varphi_i}$$

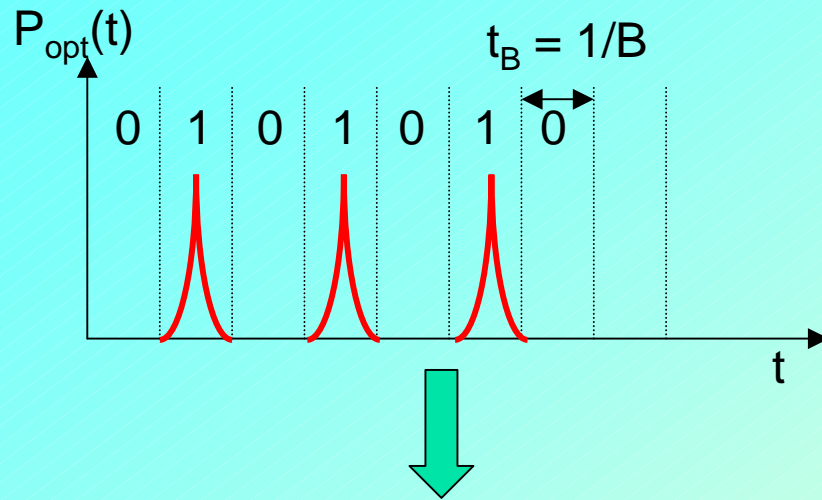
- Modes lents $\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow t_1 = \frac{L n_1^2}{c n_2}$
- Modes rapides $\varphi_i = \pi/2 \Rightarrow t_2 = \frac{L n_1}{c}$

- Elargissement de l'impulsion :

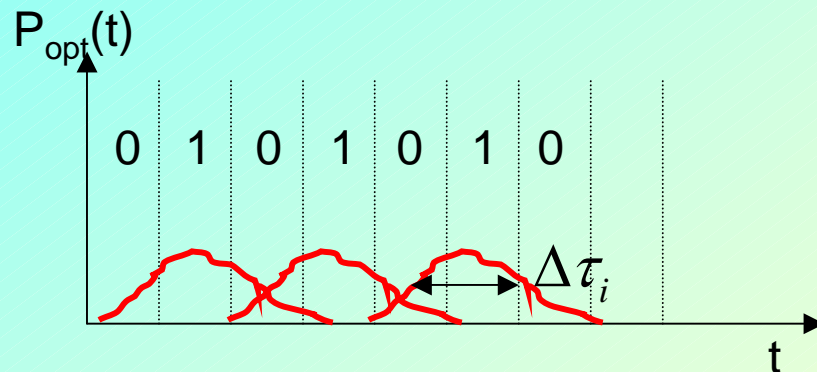
$$\Delta\tau_i \approx t_1 - t_2 = \frac{L n_1}{c} \Delta$$

LIMITATION DU DEBIT – BANDE PASSANTE

Format optique RZ



Après propagation sur une distance L



- Interférences inter-symboles: $\Delta\tau_i < t_B$

- Ordre de grandeur:

- $L = 1\text{km}; n_1 = 1,5; \Delta = 0,003$

$$\Delta\tau_i = \frac{Ln_1}{c} \Delta = \frac{10^3 \times 1,5}{3 \times 10^8} 3 \times 10^{-3} = 1,5 \times 10^{-8} \text{ s}$$

- Débit numérique maximum: $B < \frac{1}{\Delta\tau_i}$

$$B < \frac{10^8}{1,5} \text{ soit } 66 \text{ Mbit / s}$$

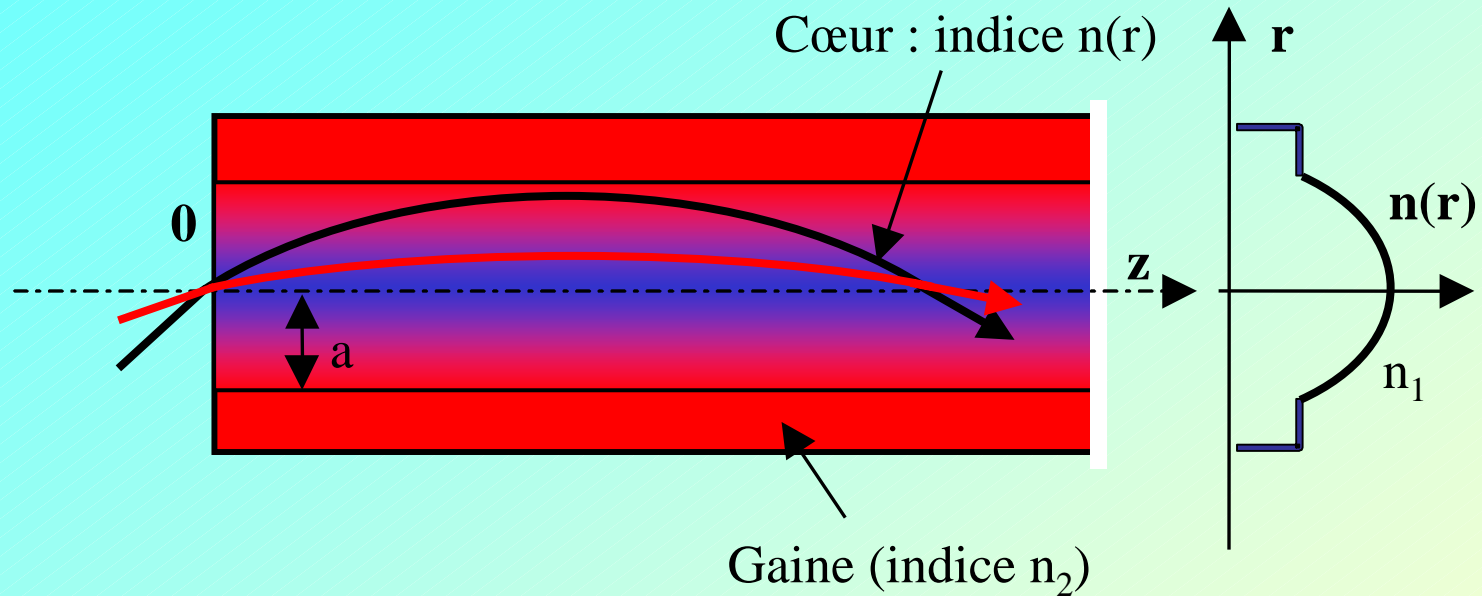
- Bande passante ΔF à -3 dB :

$$\Delta F \approx \frac{1}{\Delta\tau_i} = \frac{c}{Ln_1\Delta}$$

$$\Delta F \cdot L = \frac{c}{n_1\Delta} \text{ en MHz.km}$$

- En pratique l'élargissement est proportionnel à \sqrt{L}
- Bande passante en $\text{MHz} \cdot \sqrt{\text{km}}$

FIBRE OPTIQUE MULTIMODE A GRADIENT D'INDICE

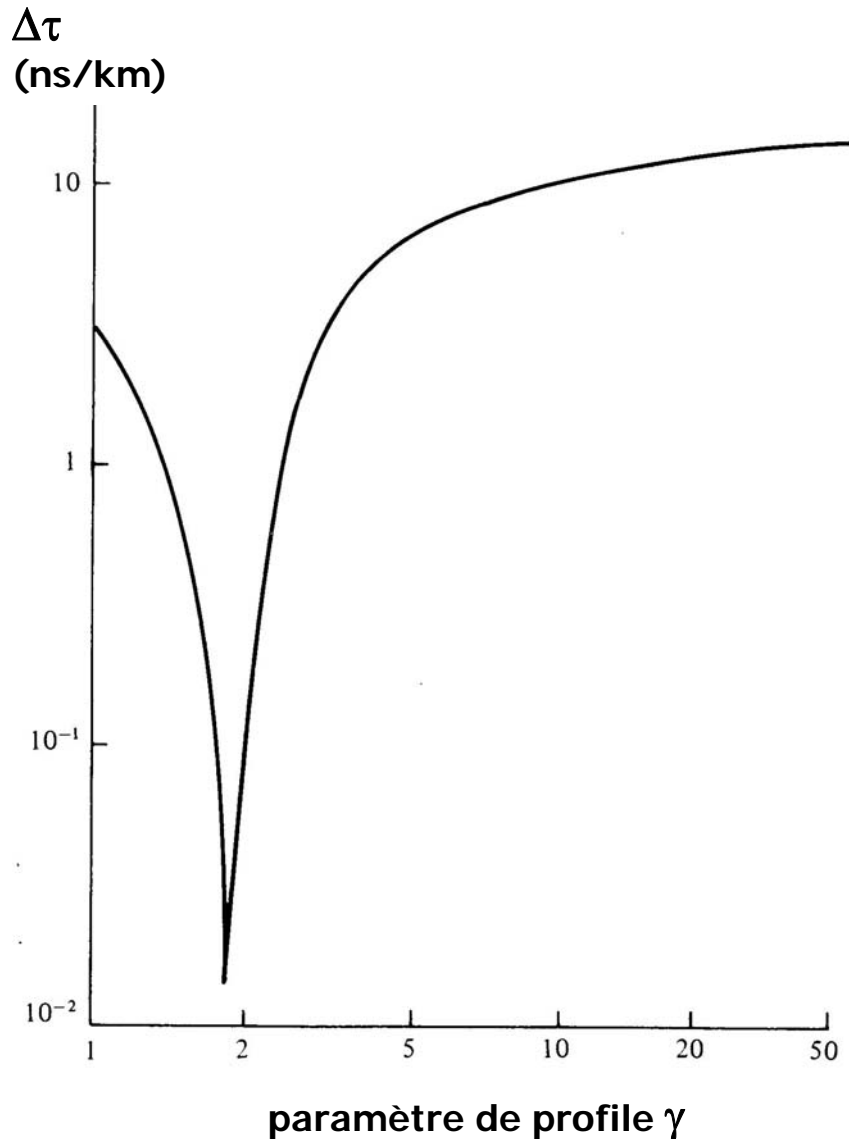


Propagation des rayons méridiens dans une fibre à profil d'indice parabolique ($\gamma = 2$).
Dans l'approximation paraxiale ces modes sont non dispersifs.

$$\text{Cœur } r < a \quad n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\gamma \right]^{1/2} \quad \gamma : \text{profile d'indice}$$

$$\text{Gaine } r \geq a \quad n(r) = n_1 [1 - 2\Delta]^{1/2} = n_2$$

MINIMUM DE DISPERSION



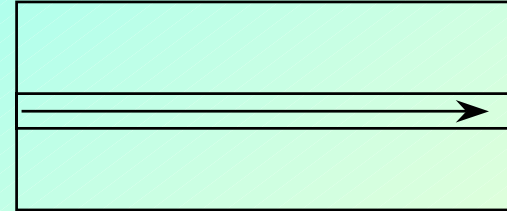
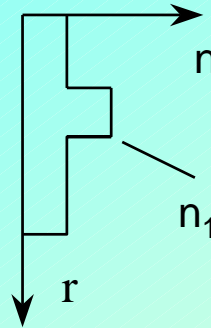
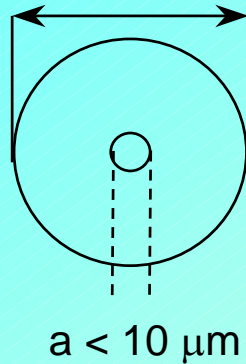
- Réduction de la dispersion
 - Optimum:
$$\gamma \approx 2(1 - 1,2\Delta) \approx 2$$
 - profile parabolique
- Minimum théorique
$$\Delta\tau_{opt} \approx L \frac{n_1}{c} \frac{\Delta^2}{8}$$
- Comparaison avec la fibre à saut d'indice :
$$\frac{\Delta\tau_{opt}}{\Delta\tau_i} \approx \frac{\Delta}{8} \approx 10^{-3}$$
- Valeur illusoire
 - défauts de fabrication
 - dispersion chromatique
- Réseaux locaux jusqu'à 1Gbit/s

PLAN

- FIBRE A SAUT D'INDICE
 - Modes de propagation
 - diagramme de dispersion
 - nombre de modes, modes LP, fibre monomode.
- DISPERSION DANS LES FO MULTIMODES
 - Dispersion intermodale
 - Limitation des performances
 - La fibre à gradient d'indice
- FIBRE MONOMODE:
 - Champ électrique et intensité
 - Diamètre de mode
- Dispersion chromatique : dispersion matériau, et dispersion guide d'onde.
- Fibre standard et fibre à dispersion décalée.
- Dispersion de modes de polarisation PMD
- TRANSMISSIONS SUR FO MONOMODE
 - Pertes intrinsèques
 - Limitation due à la dispersion
 - Compensation de dispersion
 - Hauts débits – longues distances
 - Principe du WDM
 - Fibres pour transmission à 1,55 μm .

FIBRE OPTIQUE MONOMODE

ø extérieur = 125 μm



Monomode pour



$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} (ON) < 2,405$$

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

Longueur d'onde de coupure
monomode si $\lambda > \lambda_c$

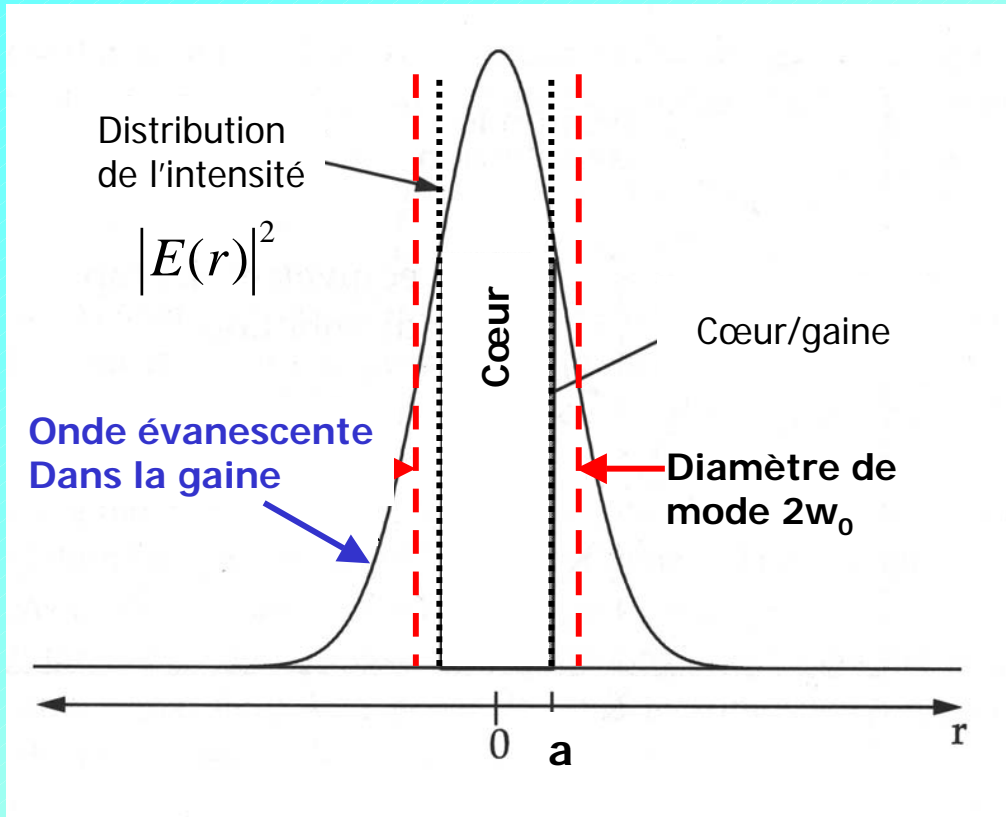
multimode si $\lambda < \lambda_c$

Un seul mode de propagation



Pas de dispersion de mode

CHAMP ELECTRIQUE ET INTENSITE



Distribution transversale de l'intensité du mode fondamental LP_{01} .

- Diamètre de cœur : $2a$
- Diamètre de mode : $2w_0$.

La polarisation est rectiligne (voir fig. 14)

■ APPROXIMATION GAUSSIENNE:

$$E(r) \approx E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right)$$

■ INTENSITE OPTIQUE

- Puissance par unité de surface **Unité W/m²**
- Valeur moyenne du vecteur de Poynting :

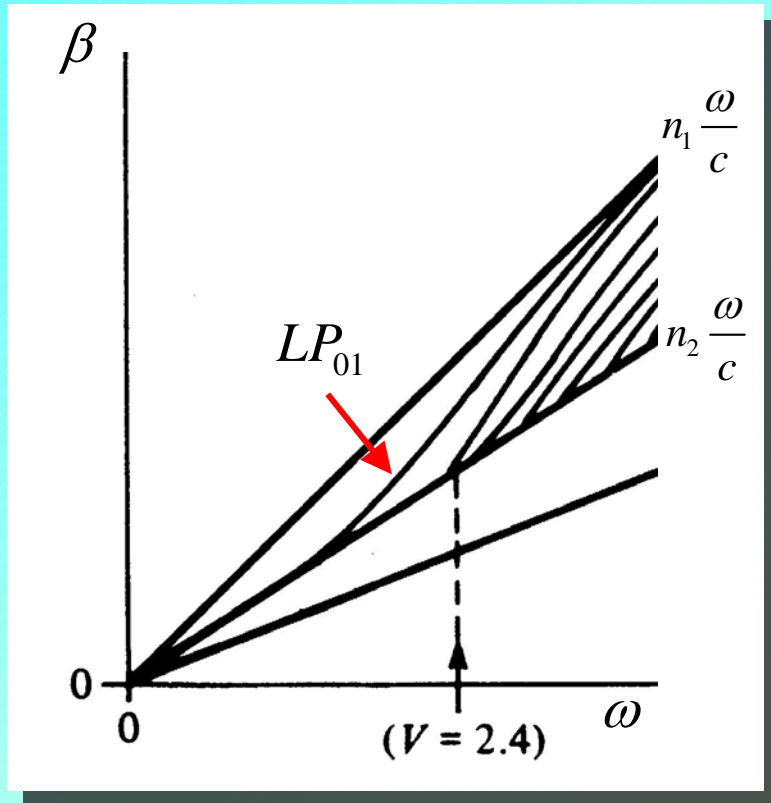
$$I(r) = \frac{1}{2} \frac{n |E(r)|^2}{Z_0}$$

- $Z_0 = 377 \, \Omega$ impédance du vide

■ APPROXIMATION DE MARCUSE

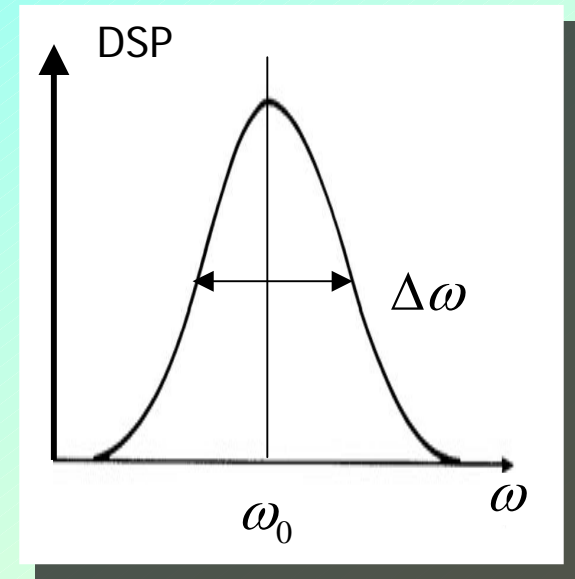
$$\frac{w_0}{a} \approx 0,65 + 1,619 V^{-3/2} + 2,879 V^{-6}$$

DISPERSION CHROMATIQUE



$V < 2,405$ un seul mode se propage

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad \rightarrow \text{Fonction de } \omega$$



Densité Spectrale de Puissance du signal.

- Signal à Bande étroite, centré sur ω_0
- largeur à mi-hauteur $\Delta\omega \ll \omega_0$
- Chaque composante spectrale se propage à une vitesse de groupe différente
- Elargissement temporel des impulsions

PARAMETRE DE DISPERSION CHROMATIQUE

- Etendue spectrale du signal $\Delta\omega$

- porteuse optique
- débit du signal ($t_B = \frac{1}{B}$)
- Format (RZ, NRZ)

- Temps de groupe :

- Fibre de longueur L
- Propagation du signal à la vitesse v_g :

$$\tau_g = \frac{L}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega}$$

- Etalement des temps de groupes

$$\Delta\tau_g = \frac{d\tau_g}{d\omega} \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega$$

- Proportionnel à:

- Longueur de la fibre
- largeur spectrale du signal

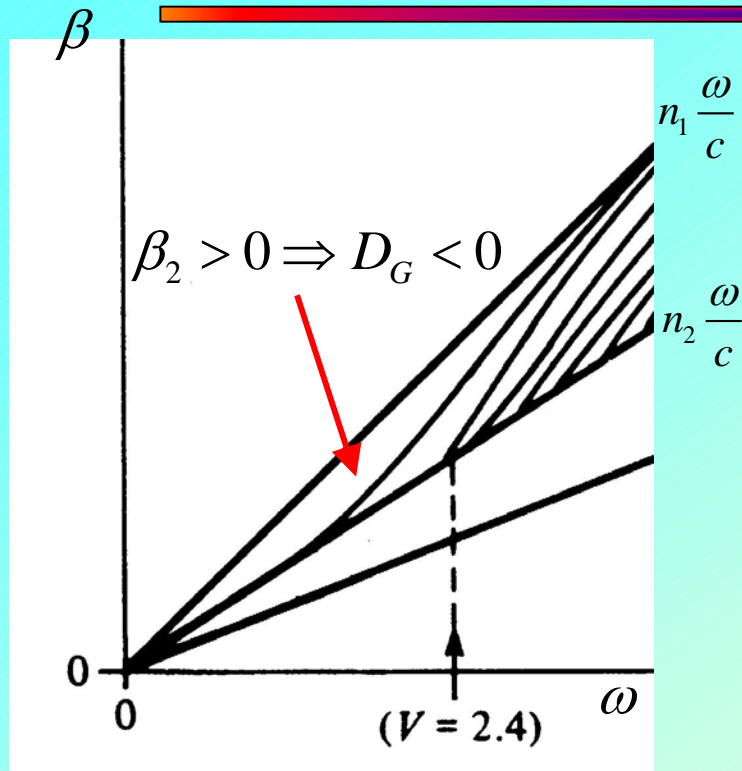
- Paramètre de dispersion D:

$$D = \frac{1}{L} \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} \quad \text{unité : ps / (km.nm)}$$

- On montrera en exercice:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

PREMIER EFFET : DISPERSION GUIDE D'ONDE

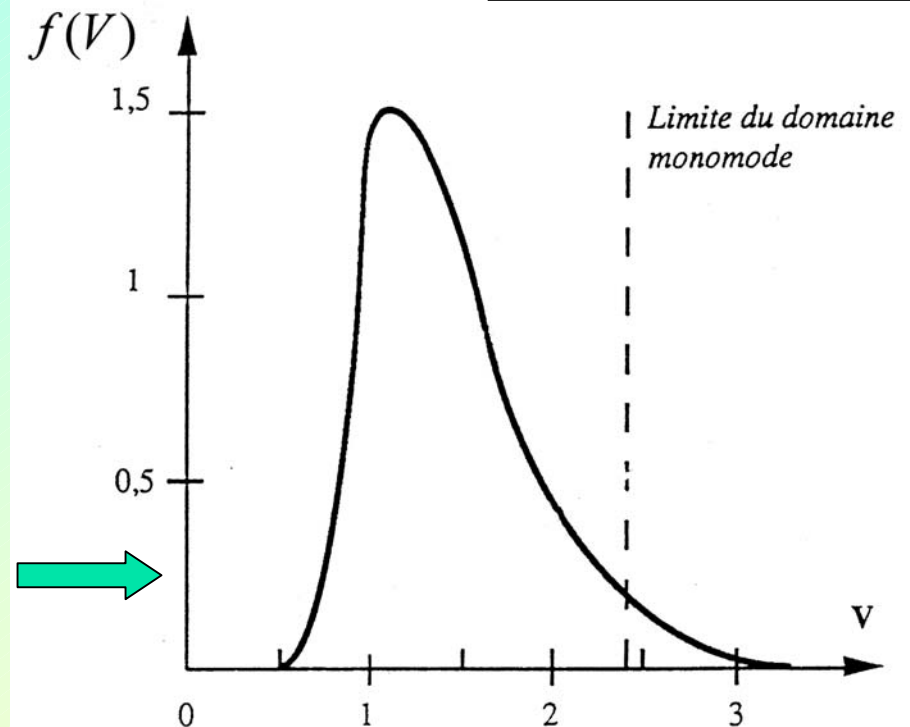


$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

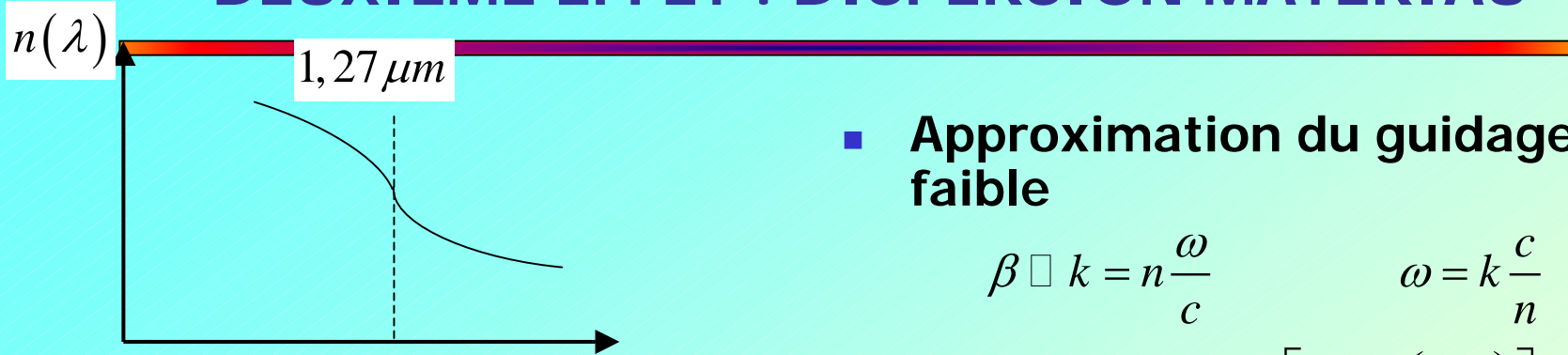
*Pour $1 < V < 2,4$
 D_G varie dans de grandes
 proportions*

- On néglige les variations de n_1 et n_2 en fonction de ω .
- Concavité de la courbe de dispersion vers le haut : $D_G < 0$.
- Relation pratique :

$$D_G = -\frac{n_1 - n_2}{c \cdot \lambda} f(V)$$



DEUXIEME EFFET : DISPERSION MATERIAU



Longueur d'onde dans le vide λ

Indice de la silice dans le proche IR

- Approximation du guidage faible

$$\beta \approx k = n \frac{\omega}{c} \quad \omega = k \frac{c}{n}$$

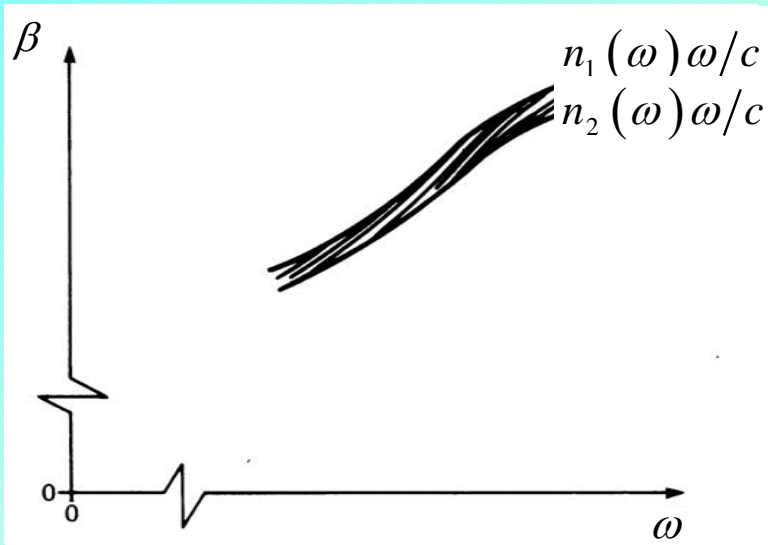
$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n} \left[1 + \frac{\lambda}{n} \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \right]$$

- Indice de groupe n_g

$$n_g = \frac{c}{v_g} = \frac{n}{1 + \frac{\lambda}{n} \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)} \approx n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)$$

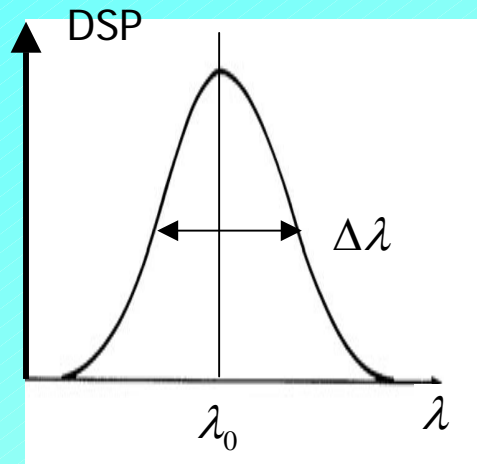
- Temps de groupe τ_g

$$\tau_g = \frac{L}{v_g} = \frac{L}{c} n_g = \frac{L}{c} \left[n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \right]$$



Effet de la dispersion du matériau sur la courbure des courbes de dispersion

COEFFICIENT DE DISPERSION MATERIAU



Largeur spectrale du signal dans le domaine des longueurs d'ondes.

- Etallement des temps de groupe des différentes composantes spectrales

$$\Delta\tau_g = \left(\frac{d\tau}{d\lambda} \right) \Delta\lambda$$

$$\Delta\tau_g = -\frac{L\lambda}{c} \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right) \Delta\lambda$$

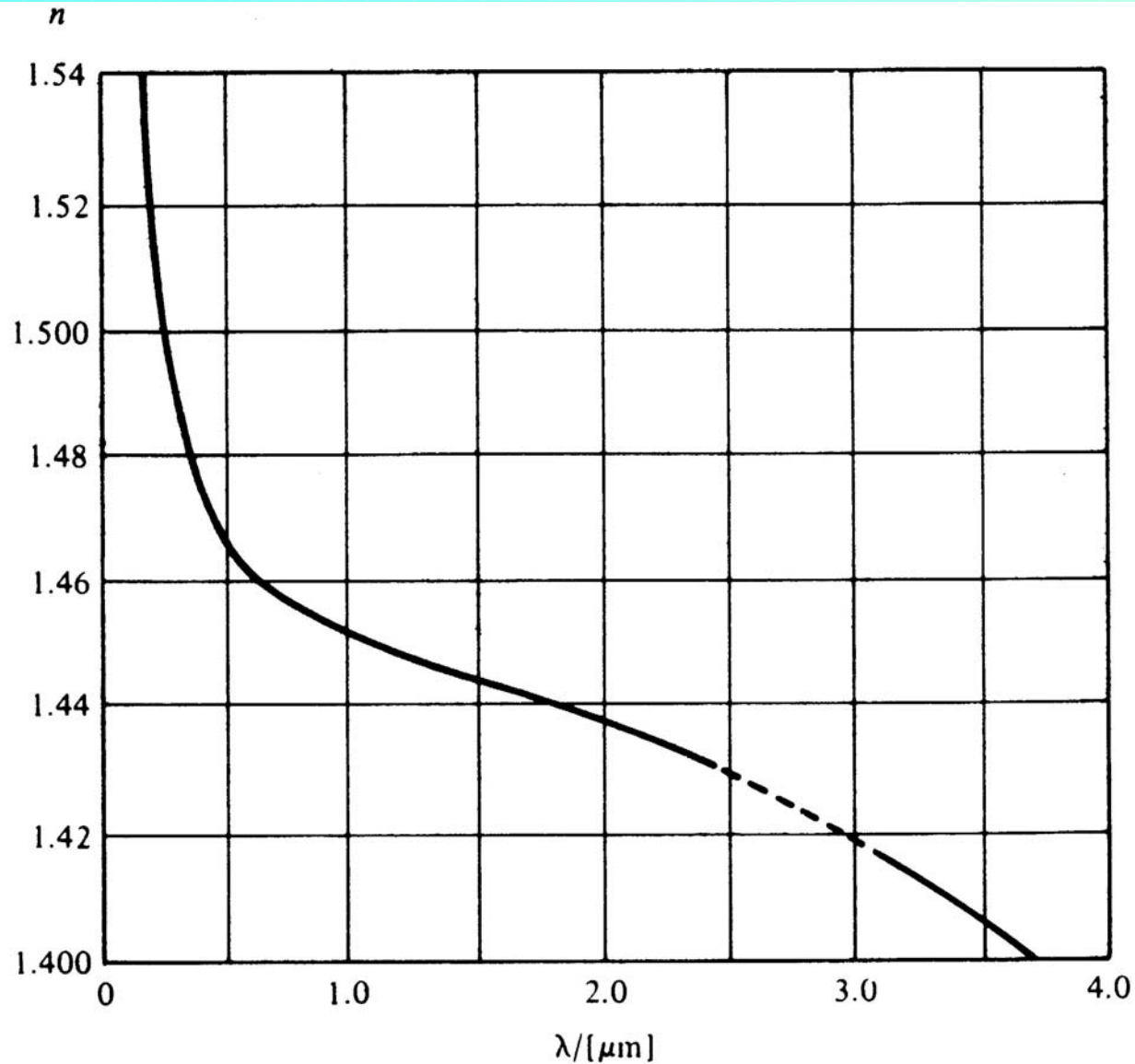
- Coefficient de dispersion matériau:

$$D_m = \frac{1}{L} \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right)$$

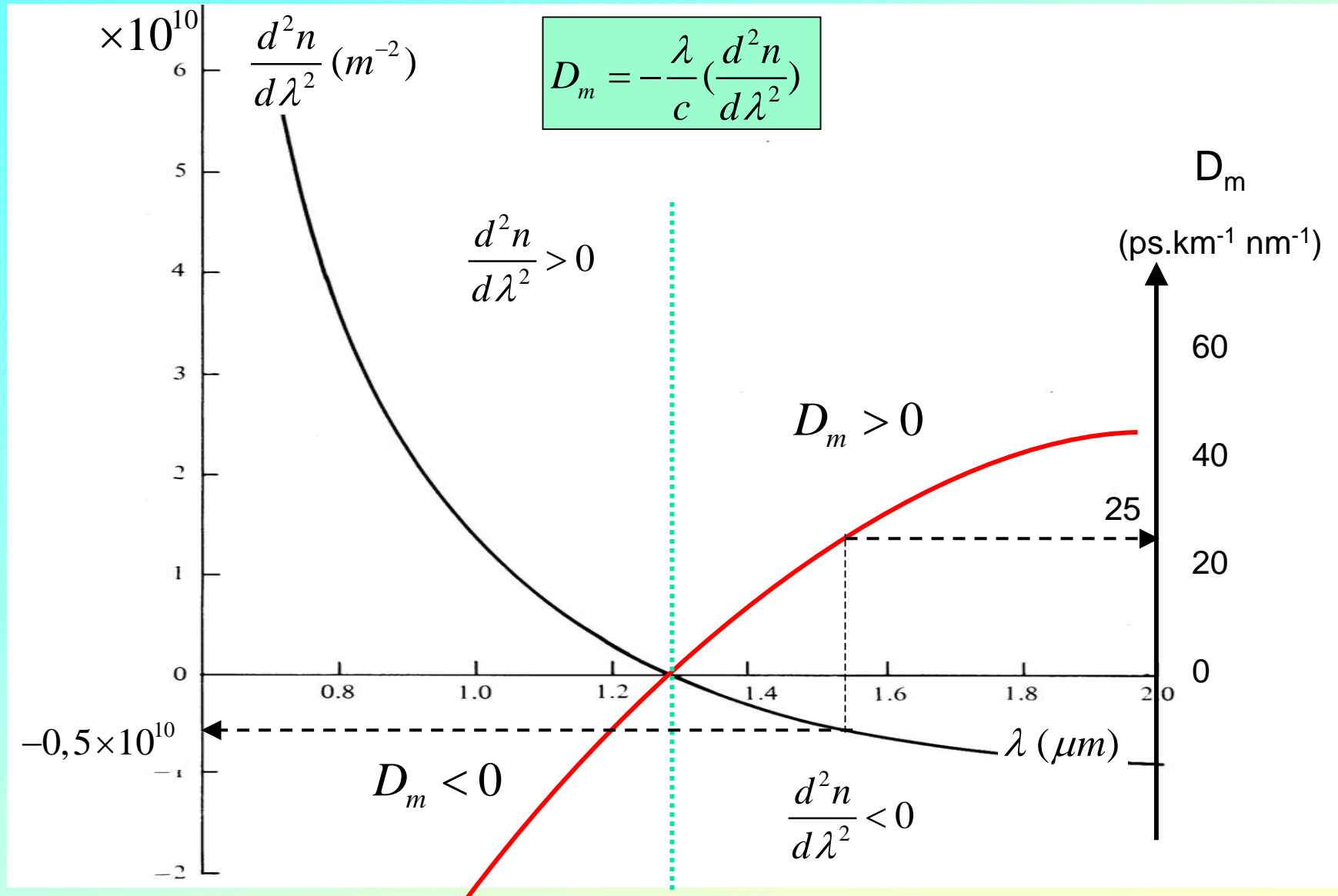
- Composition linéaire des deux effets :

$$D = D_m + D_G$$

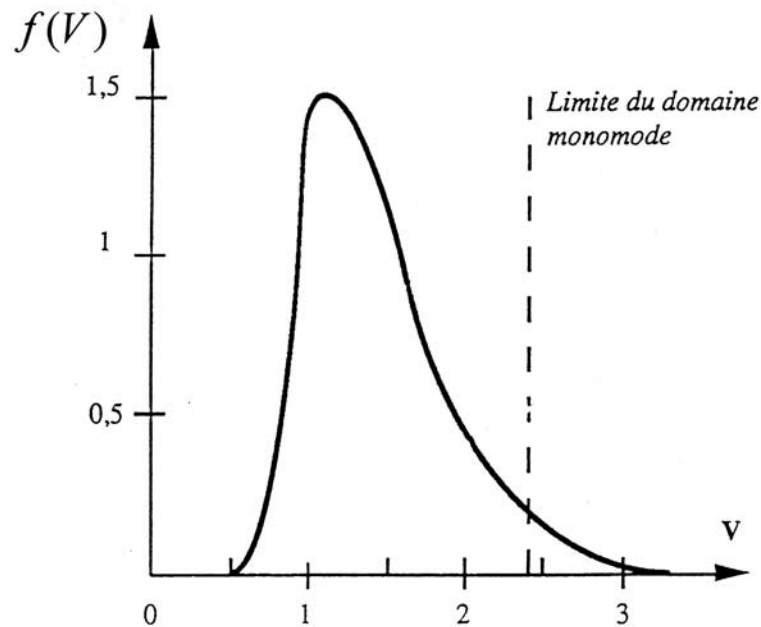
INDICE DE LA SILICE PURE



DISPERSION MATERIAU DE LA SILICE



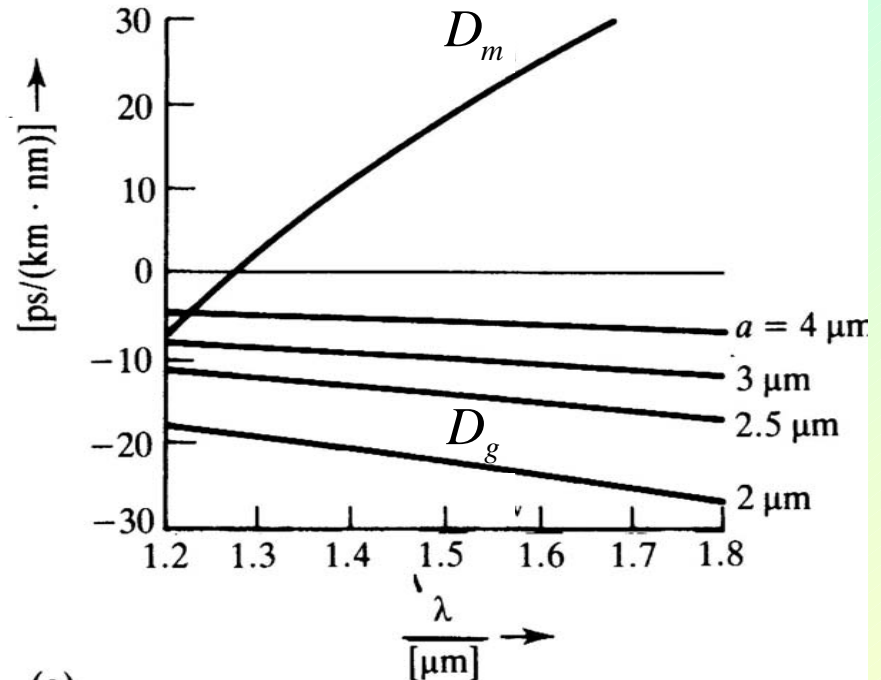
COMPARAISON D_g / D_m



$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} (ON)$$

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right)$$

$$D_g = -\frac{n_1 - n_2}{c \cdot \lambda} f(V)$$

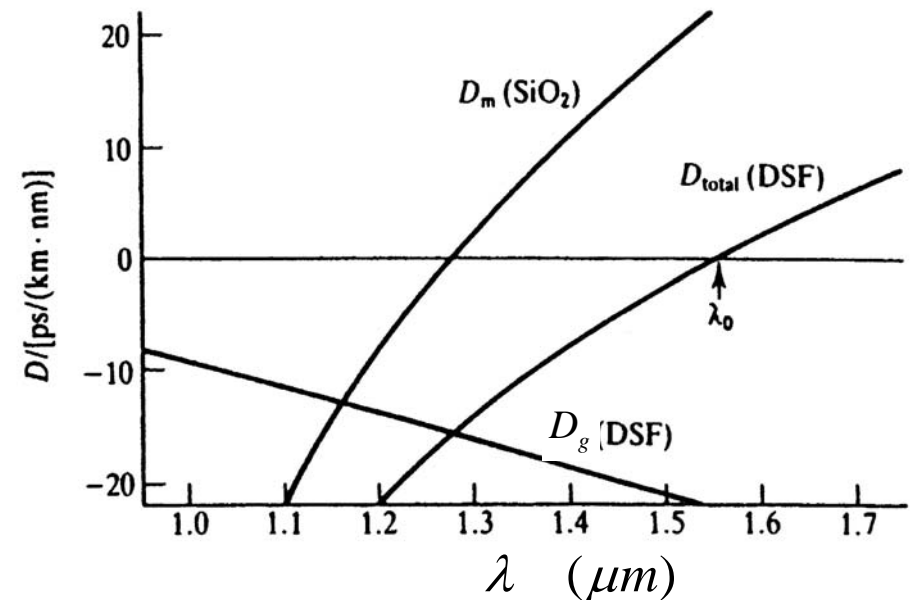
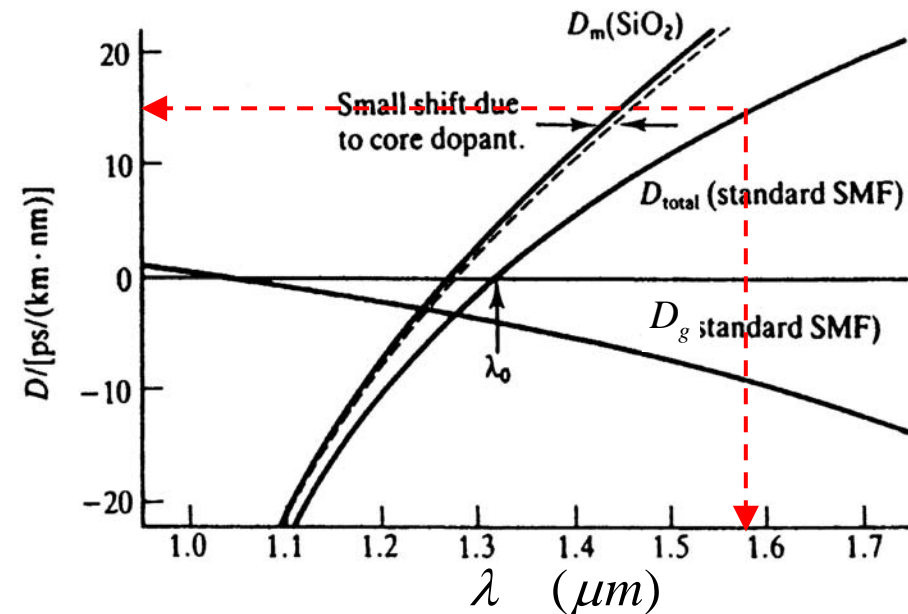


Influence du rayon du cœur sur la valeur de D_g
(n_1 et n_2 constants).

➤ D_m ne dépend que du matériau
Valeur positive pour $\lambda > 1,27 \mu\text{m}$

➤ D_g est fonction des paramètres de la FO
Sa valeur est toujours négative

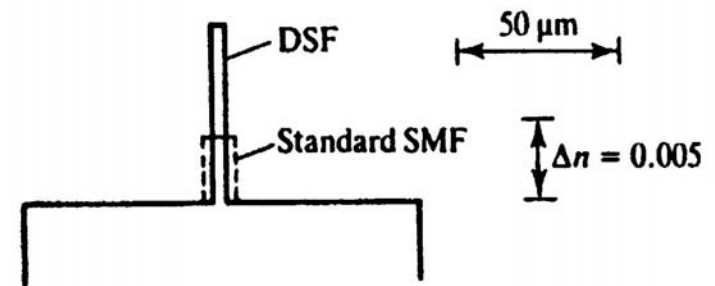
FIBRE STANDARD SMF (G.652) et FIBRE A DISPERSION DECALEE DSF (G.653)



$$D = D_m + D_g$$

□ Fibre standard:

- dispersion nulle à $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$
- dispersion moyenne à $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$
 $D = 17 \text{ pskm}^{-1} \text{ nm}^{-1}$

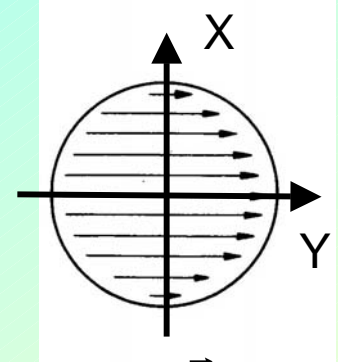
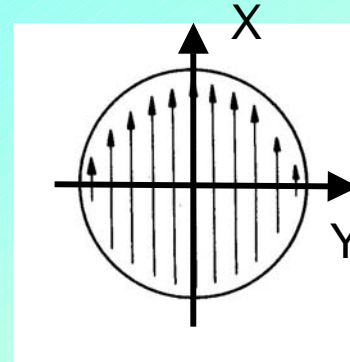


Profils d'indices des fibres SMF et DSF

BIREFRINGENCE

FIBRE IDEALE : dégénérescence du mode LP_{01}

- deux modes de polarisations orthogonales
- pas d'axes privilégiés

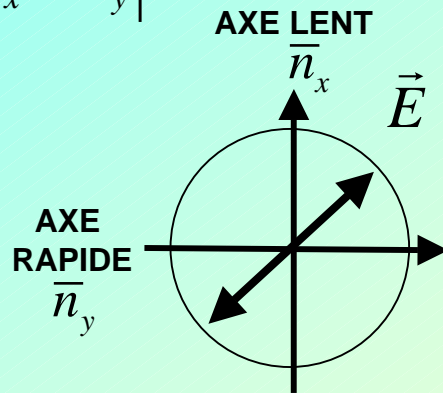


Orientation du champ \vec{E}

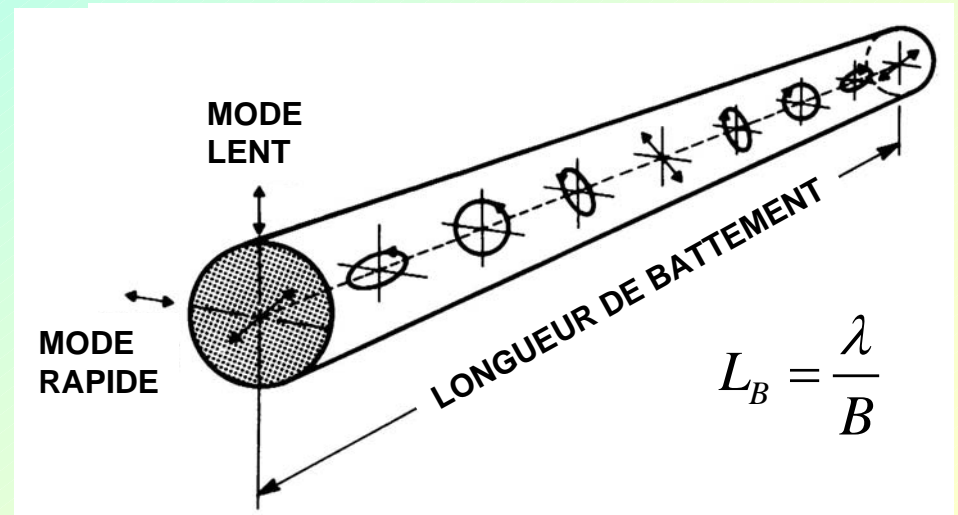
BIREFRINGENCE INDUITE

- Contraintes mécaniques, thermiques, les défauts géométriques
- Existence de deux axes principaux orthogonaux : axe rapide – axe lent
- Levée de dégénérescence du mode fondamental LP_{01} .

$$B = |\bar{n}_x - \bar{n}_y|$$

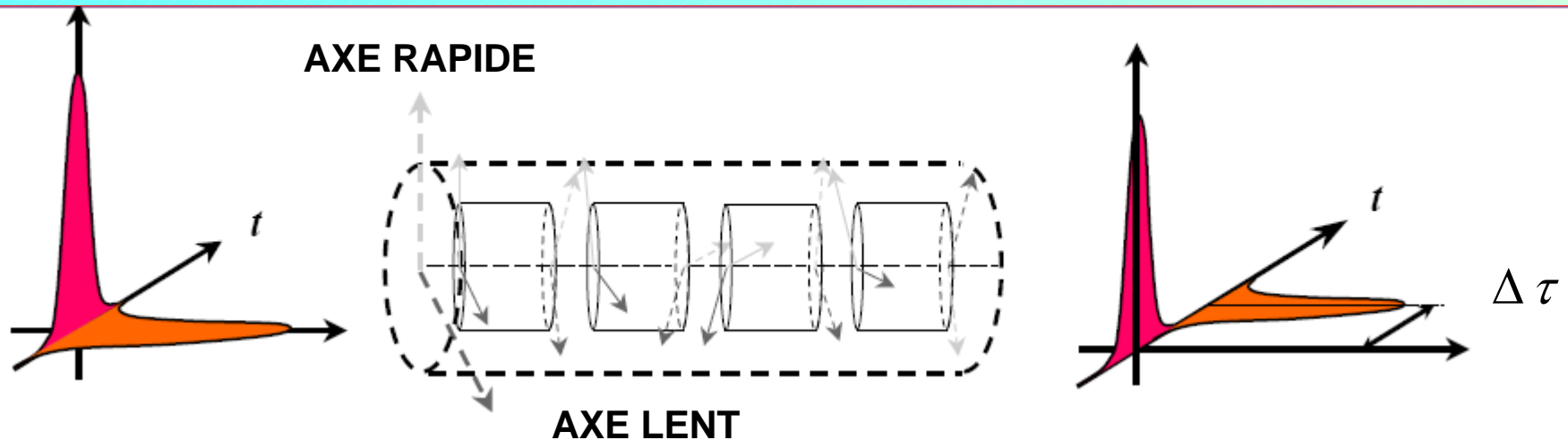


Polarisation initiale



Différents états de polarisation le long d'une fibre optique biréfringente.

DISPERSION DE MODES DE POLARISATION (PMD)



Décomposition de l'impulsion en deux modes de polarisation orthogonaux orientés suivant l'axe rapide et l'axe lent



Les impulsions n'arrivent pas en même instant

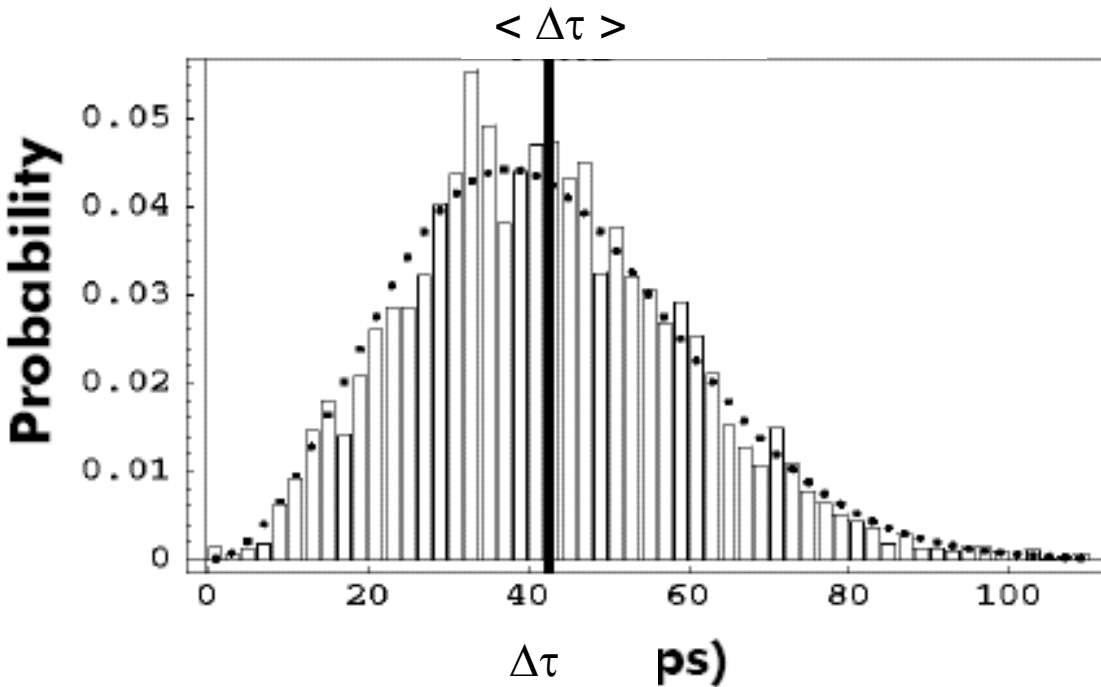
DISPERSION DE MODES :

$$\Delta \tau \approx \frac{L}{c} |\bar{n}_x - \bar{n}_y| = \frac{L}{c} B$$

FIBRE DE LIGNE : ASPECT ALEATOIRE

- L'orientation des axes principaux varie aléatoirement le long de la fibre
- Variation de la forme et du diamètre du cœur.
- Variation au cours du temps en fonction de l'évolution des conditions externes
- L'état de polarisation de la lumière à la sortie de la fibre est aléatoire.

MESURES SUR LIAISON RELLE



Mesures de PMD effectuées sur une liaison réelle au cours d'une période de six mois.

- **La distribution des $\Delta\tau$ suit une distribution de Maxwell.**

- **Unité pratique de PMD**

$$PMD = \frac{\langle \Delta\tau \rangle}{\sqrt{L}}$$

- **Unité**

$$ps / \sqrt{km}$$

- **Impératifs système**

- PMD < 10% temps bit
- probabilité de pannes erratiques < 10^{-5} (soit 5 minutes par an)

- **Devient problématique**

- systèmes antérieurs à 1995 à B = 10 Gbit/s
- systèmes récents à B = 40 Gbit/s

FIBRES OPTIQUES

■ FIBRE A SAUT D'INDICE

- Modes de propagation
- diagramme de dispersion
- nombre de modes, modes LP, fibre monomode.

■ DISPERSION DANS LES FO MULTIMODES

- Dispersion intermodale
- Limitation des performances
- La fibre à gradient d'indice

■ FIBRE MONOMODE:

- Dispersion chromatique : dispersion matériau, et dispersion guide d'onde.
- Fibre standard et fibre à dispersion décalée
- Dispersion de modes de polarisation PMD

■ TRANSMISSIONS SUR FO MONOMODE

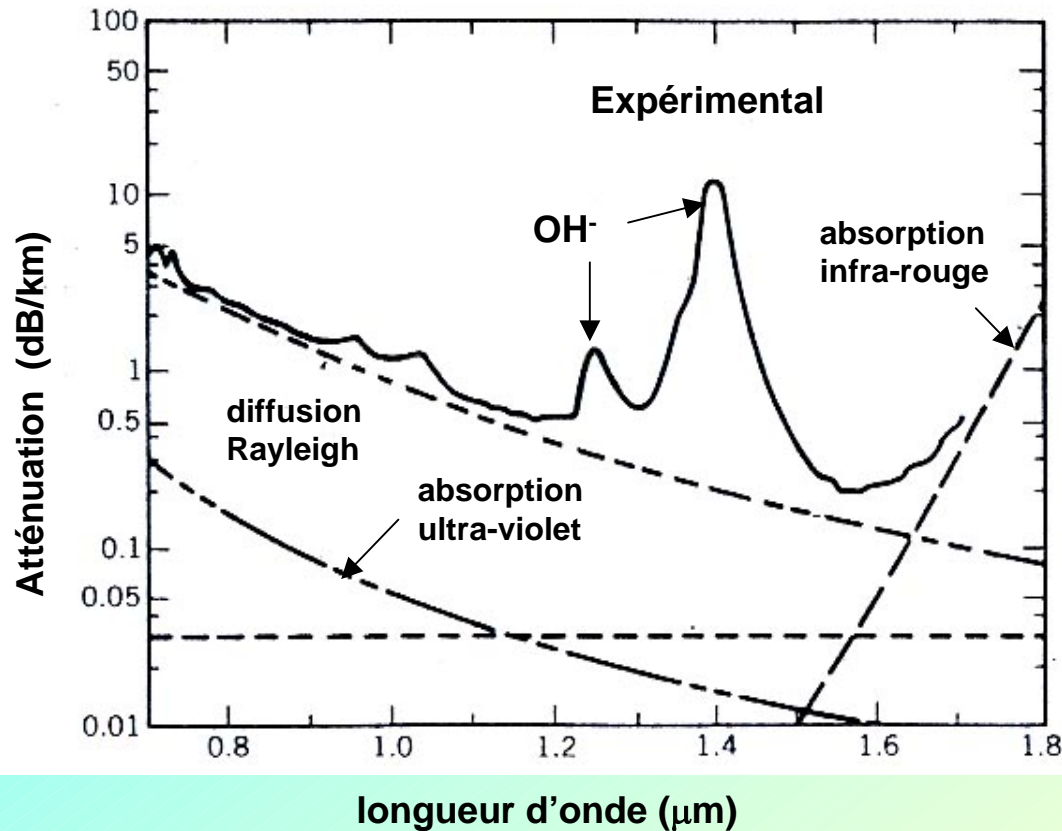
- Pertes intrinsèques
- Limitation due à la dispersion
- Compensation de dispersion
- Hauts débits – longues distances
- Principe du WDM
- Fibres pour transmission à 1,55 mm.

■ AUTRES FIBRES OPTIQUES

- Fibres à « maintien de polarisation »
- Différents matériaux
- Fibres spéciales microstructurées et à BIP.

■ FORMULAIRE DES FIBRES OPTIQUES

ATTENUATION DES FO MONOMODES



- Atténuation A en dB/km

$$A_{(dB/km)} = \frac{10}{L_{(km)}} \log_{10} \frac{P_0}{P_1}$$

- Absorption intrinsèque SiO₂
 - Bande UV de résonances électroniques ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$)
 - Bande IR de résonances vibrationnelles ($\lambda > 7 \mu\text{m}$)
- Diffusion Rayleigh:
 - Variation monotone en $1/\lambda^4$
- Absorption par les impuretés
 - Ions OH⁻ essentiellement
 - concentration inférieure à 10^{-8}

A < 0,2 dB/km autour de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

LIMITATION DUE A LA DISPERSION CHROMATIQUE

- On néglige ici l'atténuation de la fibre

- Prenons le critère : $\Delta\tau_g < t_B = \frac{1}{B}$

$$B \Delta\tau_g < 1 \quad \text{soit} \quad B < \frac{1}{L|D|\Delta\lambda}$$

- Le débit maximum est inversement proportionnel à:

- La longueur de fibre : L
- La valeur absolue de la dispersion de la fibre : $|D|$
- La largeur spectrale du signal : $\Delta\lambda$

- Exemple: Calcul du produit BL max

- $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ (cas d'une diode laser modulée en intensité)
- fibre standard à $1,55 \mu\text{m}$, $D = 17 \text{ ps km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$

$$BL < \frac{1}{|D|\Delta\lambda} = \frac{1}{17 \times 10^{-12}} \approx 60 \text{ (Gbit / s).km}$$

- fibre à dispersion décalée (NZDSF⁻), $D = -2 \text{ ps km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$

$$BL < \frac{1}{|D|\Delta\lambda} = \frac{1}{2 \times 10^{-12}} \approx 500 \text{ (Gbit / s).km}$$

HAUTS DEBITS – LONGUE DISTANCE

(augmenter le produit BL)

- **Systèmes utilisant une seule porteuse :**

- Annuler la dispersion (fibre à dispersion décalée), **mais** : une faible valeur de la dispersion favorise l'apparition des effets non linéaires.
- Réduire $\Delta\lambda$, **mais** même avec une porteuse monochromatique il faut prendre en compte la bande de modulation du signal

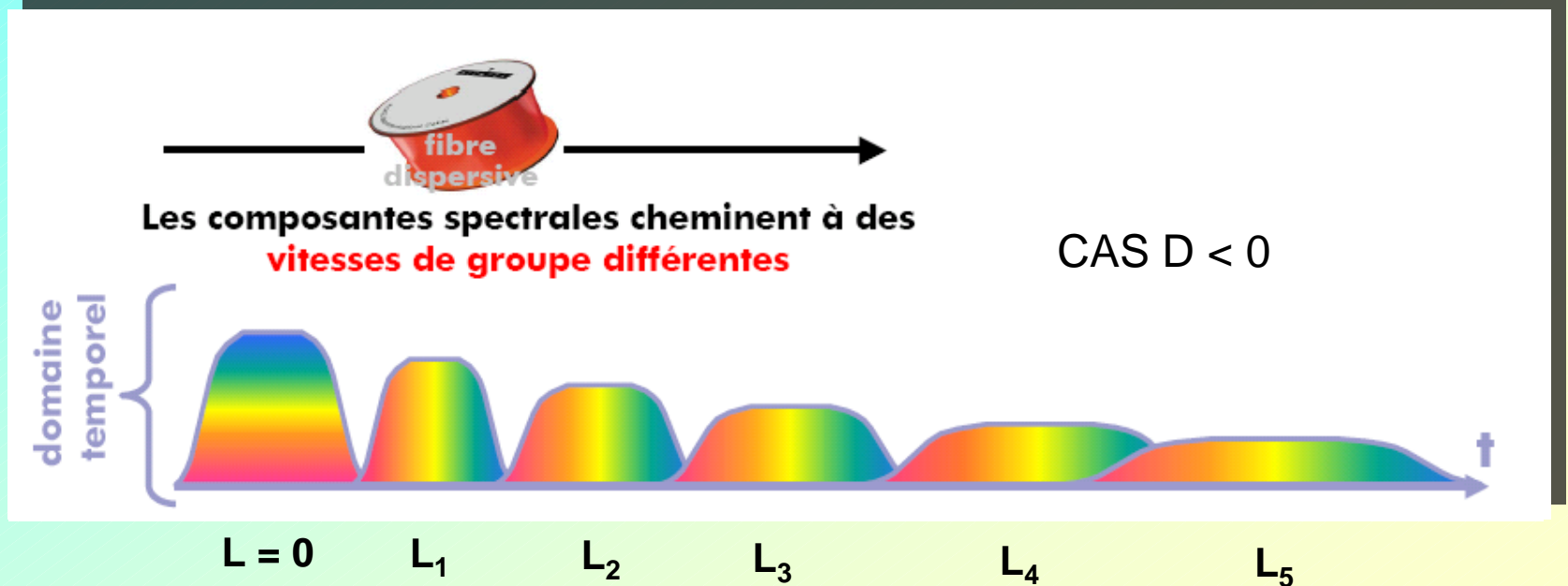
$$\Delta\nu \propto 1/\Delta T$$

- **Compensation de la dispersion chromatique**

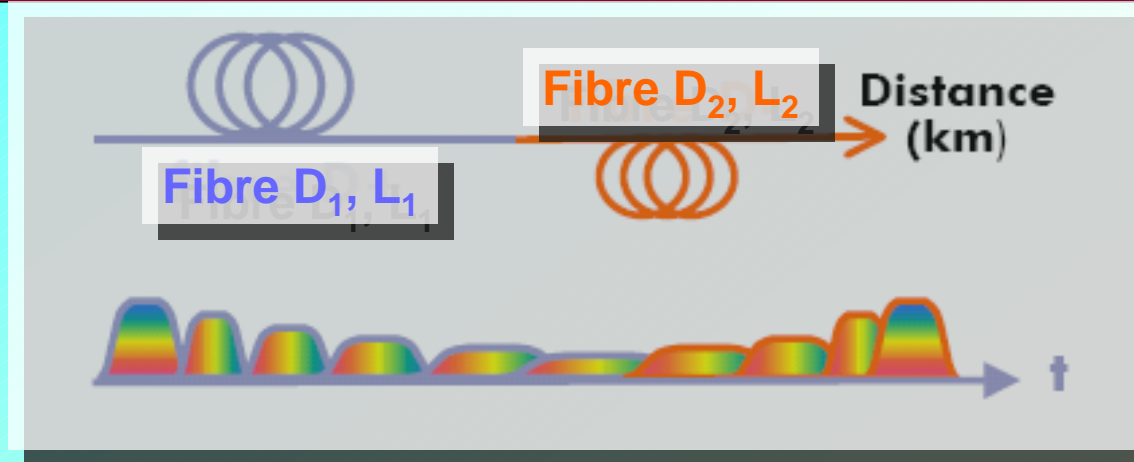
- En régime de propagation linéaire (faible intensité optique dans le cœur), le spectre du signal est inchangé ($\Delta\lambda = \text{constant}$)

SIGNE DE LA DISPERSION

- Dispersion positive $D = \frac{1}{L} \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} > 0 \longrightarrow \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} > 0$
 - les grandes λ ($\Delta\lambda > 0$) se propagent plus lentement ($\Delta\tau > 0$)
 - Elargissement temporel du signal proportionnel à L
- Dispersion négative $\frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} < 0$
 - les grandes λ ($\Delta\lambda > 0$) se propagent plus vite ($\Delta\tau < 0$)
 - Elargissement temporel du signal proportionnel à L



COMPENSATION DE DISPERSION

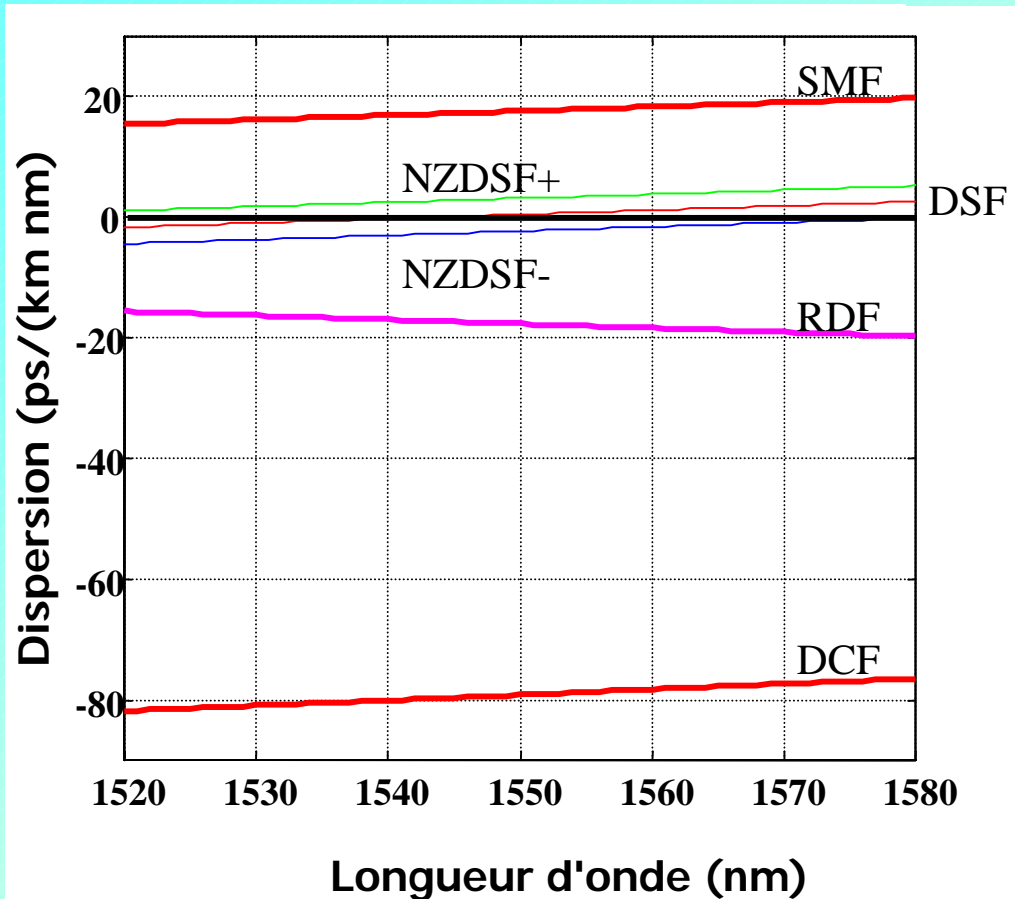


- En régime de propagation linéaire ($P_{\text{opt}} < 20 \text{ dBm}$):
 - le spectre du signal n'évolue pas ($\Delta\lambda = \text{constante}$).
 - les effets de la dispersion sont réversibles.
- Dispersion cumulée dans L_1 : $\Delta\tau_1 = D_1 L_1 \Delta\lambda$
- Dispersion cumulée dans L_2 : $\Delta\tau_2 = D_2 L_2 \Delta\lambda$
- DISPERSION TOTALE NULLE: l'impulsion retrouve sa largeur initiale

$$\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 = 0 \longrightarrow \boxed{D_1 L_1 = -D_2 L_2}$$

- Fibres de compensation à coefficient de dispersion négatif

FIBRES POUR TRANSMISSIONS A 1,55 μm



- **SMF: fibre standard G652:**
 - 80 % dans le monde

- **DSF : fibre à dispersion décalée :**

- Idéale pour transmission monocanal.
- Inutilisable en WDM

- **FO adaptées au WDM**

- NZDF+ ; NZDSF- : fibre à dispersion décalée non nulle.
- RDF : fibre à pente négative.
- DCF : fibre de compensation
- Fibres monomodes large cœur pour réduire les effets non-linéaires.

MULTIPLEXAGE EN LONGUEUR D'ONDE

- **Systèmes multiporteuses ou WDM**

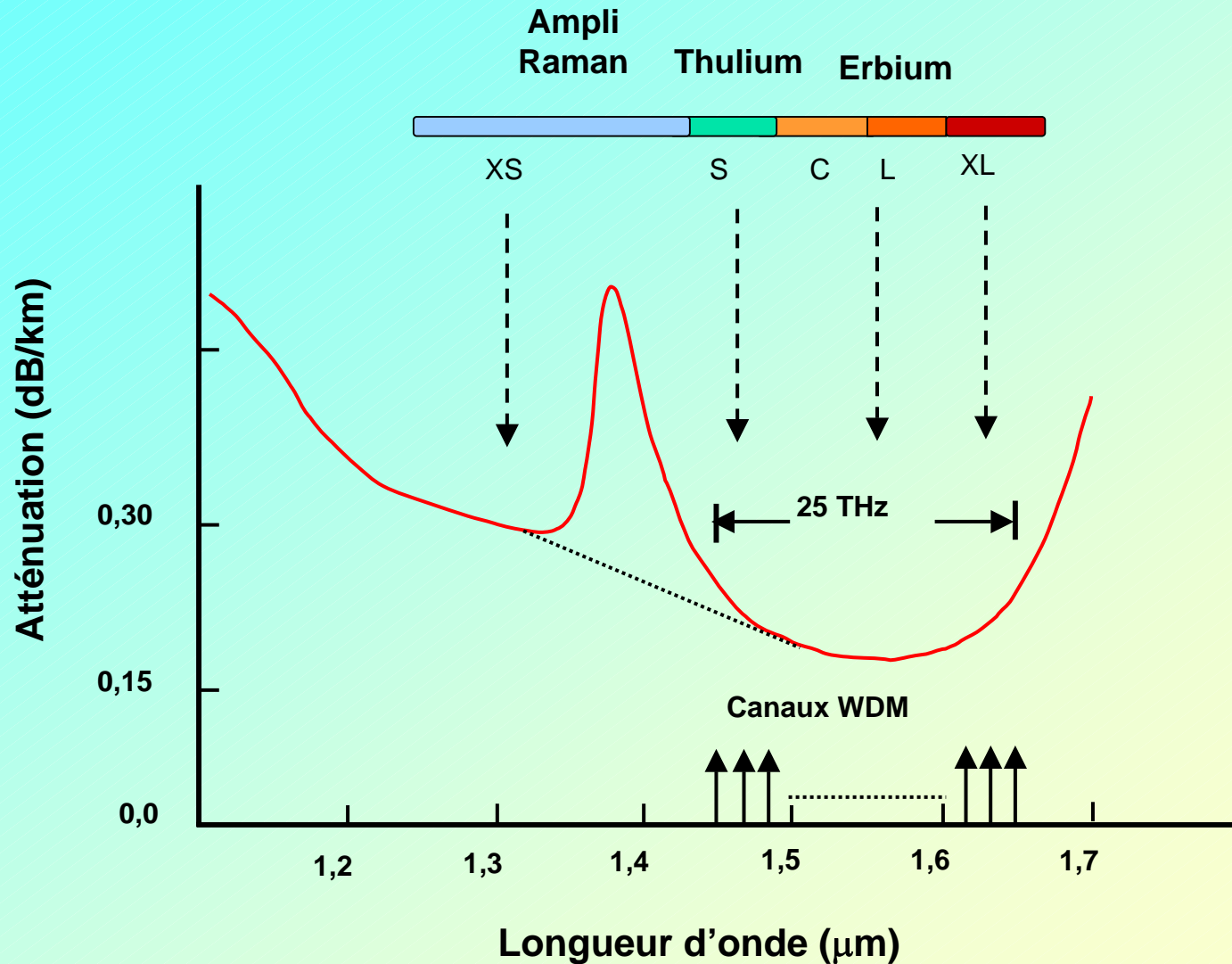
- Largeur de la fenêtre de transmission autour de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

$$\delta\nu \approx 25 \text{ THz}$$

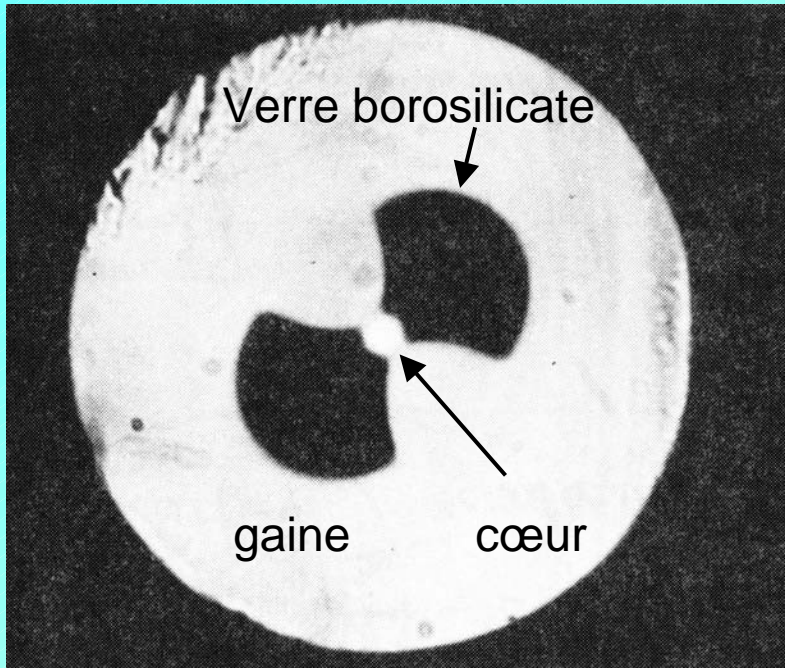
- Le nombre de canaux N dépend de leur espacement $d\nu$
- Exemple $d\nu = 100 \text{ GHz} \Rightarrow N \approx 250 \text{ canaux}$
- Si B est le débit par canal, le débit total devient :

$$B_T = NB$$

CANAUX ET AMPLIFICATEURS WDM



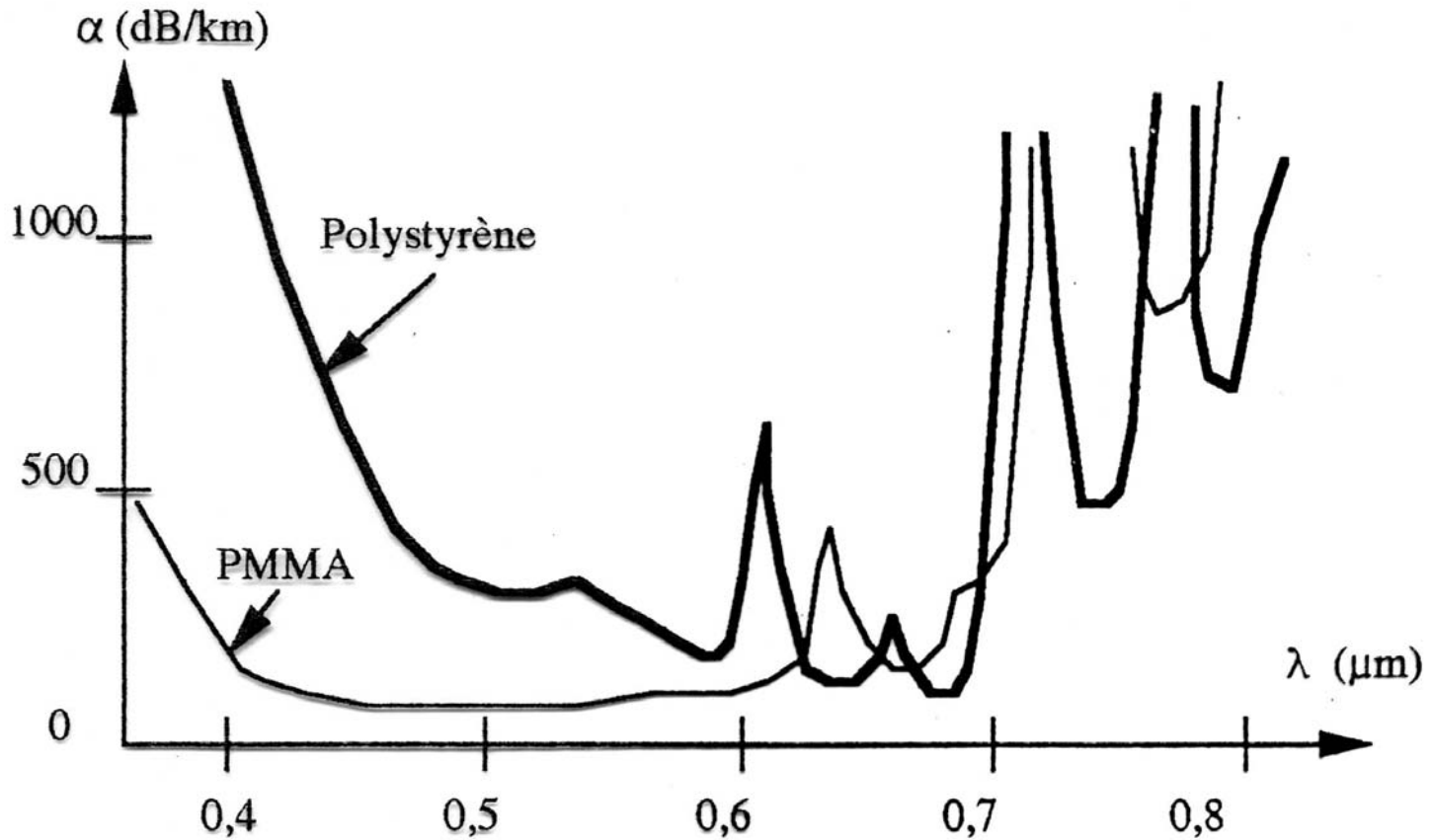
FIBRES A « MAINTIENT DE POLARISATION »



Micrographie d'une fibre « PANDA »

- **MAINTENIR UNE POLARISATION LINEAIRE LE LONG DE LA FIBRE**
 - On introduit à la fabrication une forte biréfringence linéaire
 - Réduction du couplage entre les deux modes de polarisation
- **BIREFRINGENCE DE FORME**
 - Cœur elliptique
- **TENSION ASSYMETRIQUE**
 - Introduction de deux zones de verre composition différente autour du cœur
- **APPLICATIONS**
 - Laboratoire
 - Capteurs optiques

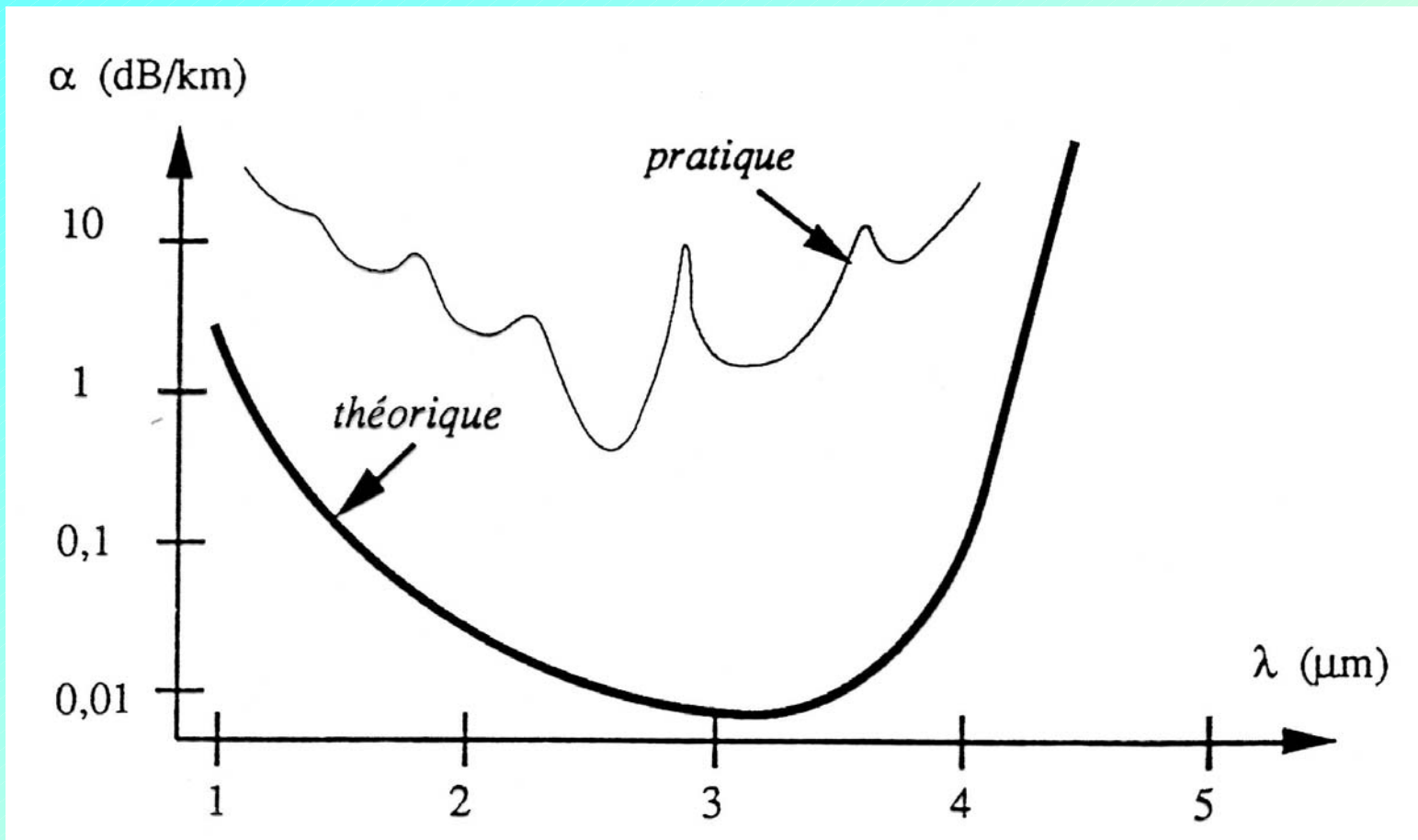
FIBRES EN PLASTIQUE



Atténuation des fibres en plastique utilisées dans le domaine du visible.

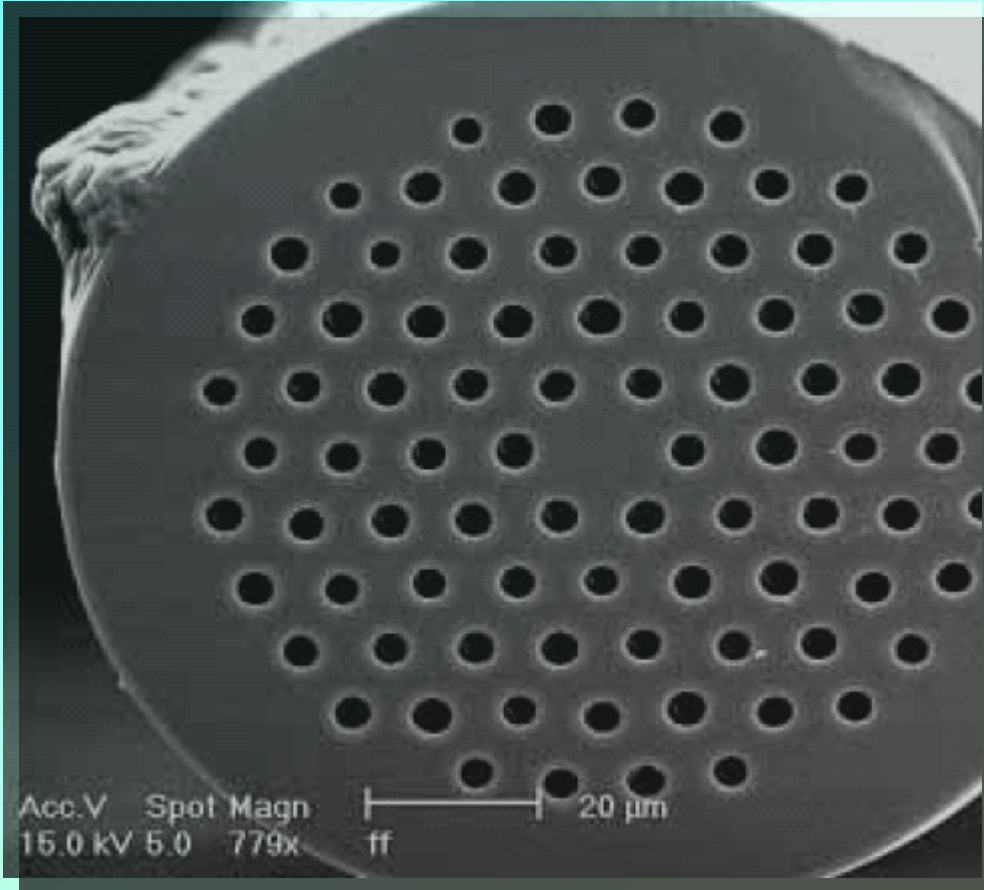
PMMA: polyméthyl – métacrylate.

FIBRES EN VERRES FLUORES



EXEMPLE D'APPLICATION : Amplificateurs à fibres dopées Erbium (EDFA)

FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTUREES AIR-SILICE



■ STRUCTURE

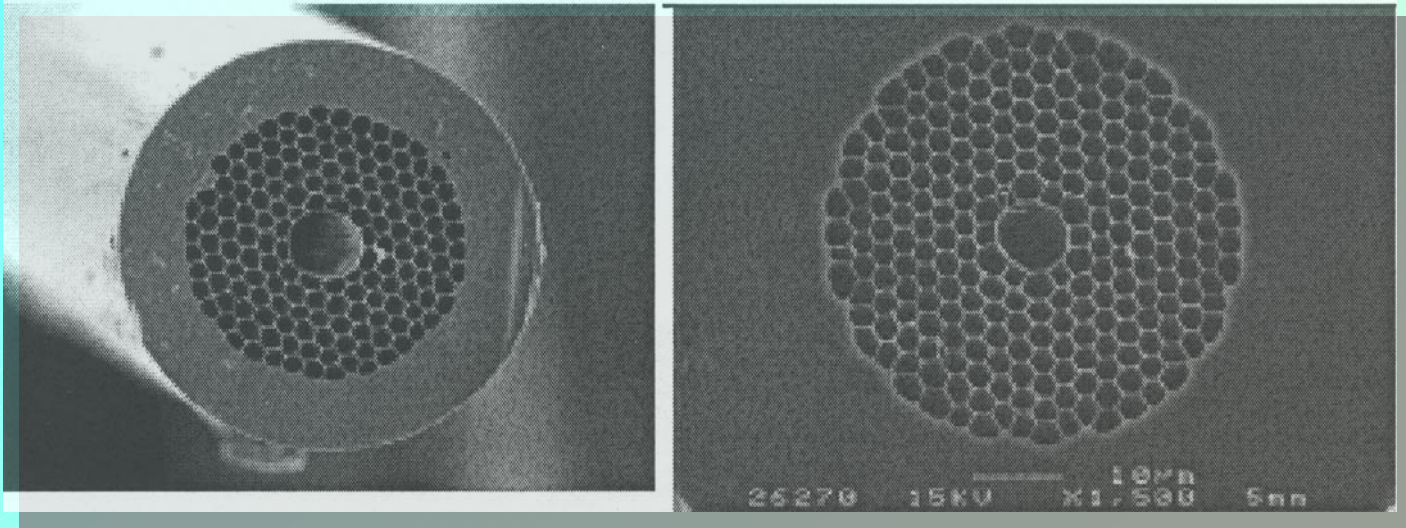
- Cœur en silice.
- Disposition triangulaire de trous d'air pour former la gaine.

■ GUIDAGE « CLASSIQUE » PAR REFLEXION TOTALE INTERNE

■ APPLICATIONS

- Monomode sur une large plage de λ .
- Réduction des effets non linéaires.
- Capteurs, spectroscopie, laser à fibre optique.

FIBRES A CŒUR D'AIR



- **GUIDAGE PAR BANDE INTERDITE PHOTONIQUE (BIP)**
 - Effet de bande interdite dans les structures périodiques, (analogie avec la BI électronique des semiconducteurs)
- **TRANSPORT DE FORTES PUISSANCES OPTIQUES**
- **EFFETS NON LINEAIRES QUASI-NULS.**

FORMULAIRE DES FIBRES OPTIQUES

- Réflexion totale
- Constante de propagation
- Ouverture numérique
- Paramètre D
- Angle d'acceptance
- Fréquence normalisée
- Nombre de modes (multimode)
 - Dispersion intermodale (saut d'indice)
 - Dispersion intermodale (gradient d'indice)
- Monomode (condition sur V)
- Dispersion chromatique
 - Dispersion matériau
 - Dispersion guide d'onde
- Dispersion de modes de polarisation (PMD)
- Atténuation linéique.