

M2 ESET

EIEAE3DM : Circuits optoélectroniques et hyperfréquences

Télécommunications sur Fibres Optiques

(Enseignement prévu : 3 C + 1 TD)

Philippe ARGUEL
arguel@laas.fr

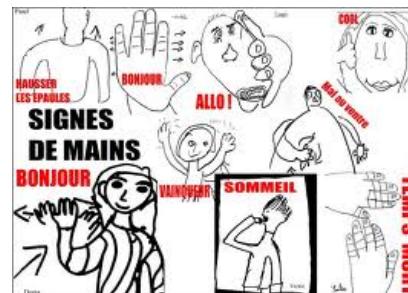
Télécommunications Optiques ?

Rappel de quelques notions...

Signalisation :



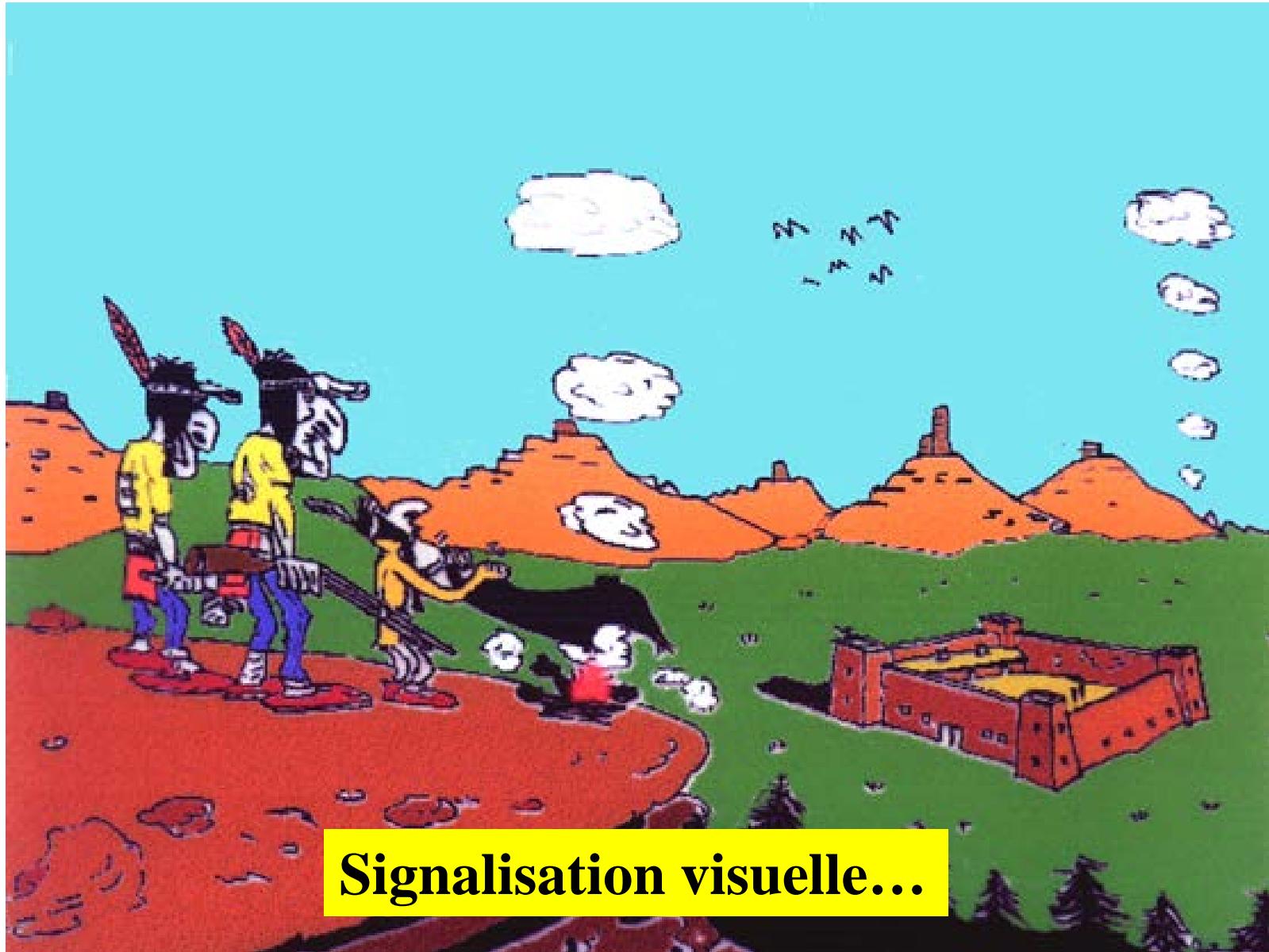
Communication :



Télécommunication :



Prémices des télécommunications optiques ?



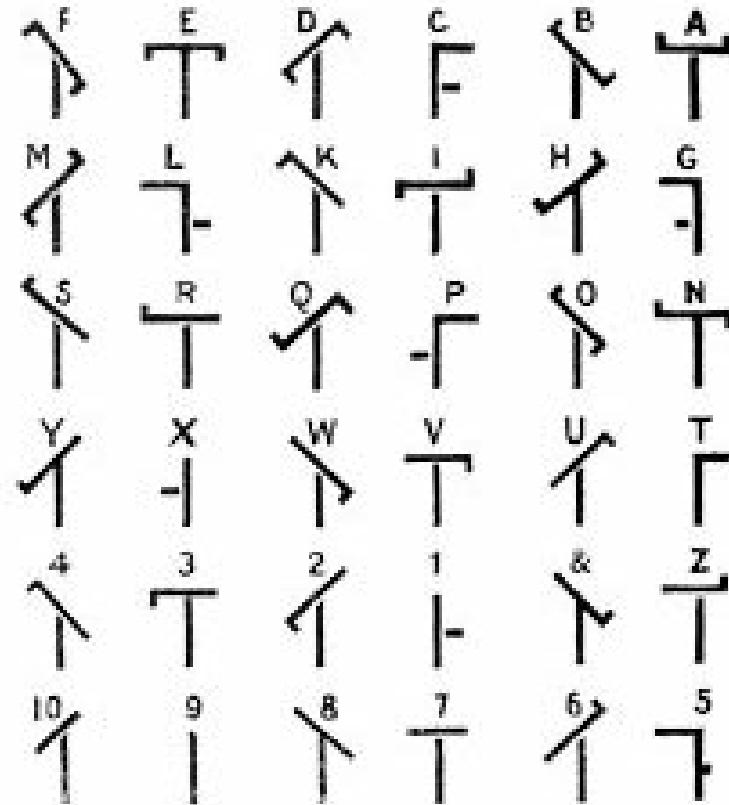
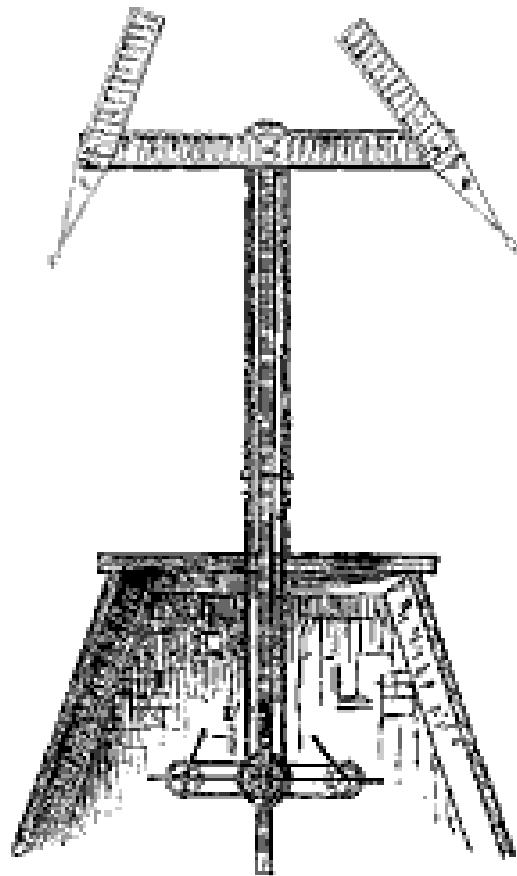
Signalisation visuelle...

Télégraphe Chappe (1791)



5000 km de réseau et près de 533 stations ont été mis en place, couvrant une partie importante du territoire français (=> 1855)

Télégraphe Chappe (1791)

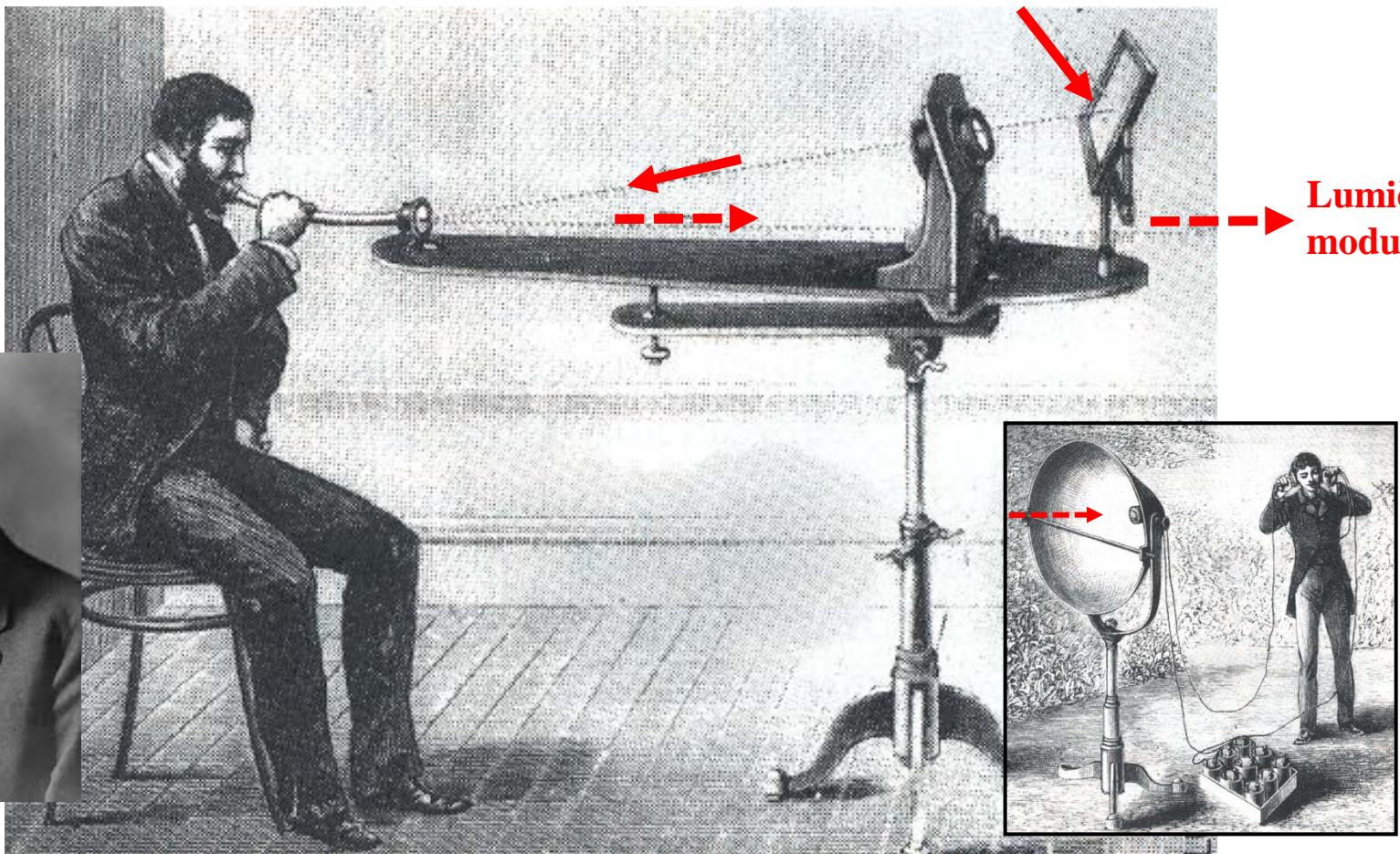


Communication visuelle...

Les codes utilisés n'étaient pas les mêmes selon les pays mais les objectifs restaient identiques : rapidité de transmission et confidentialité du message.

Première expérience de télécommunication optique

Alexander
Graham
BELL



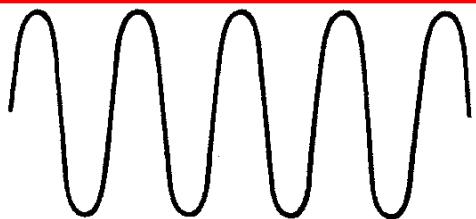
1^{ère} expérience : Photophone de BELL en 1880
(portée > 200 m ; détection par Sélénium)

(BELL : J'ai entendu un discours articulé produit par la lumière du soleil !
J'ai entendu un rayon du soleil rire, tousser et même chanter...)

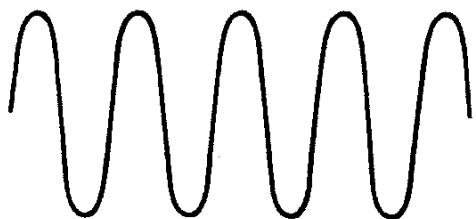
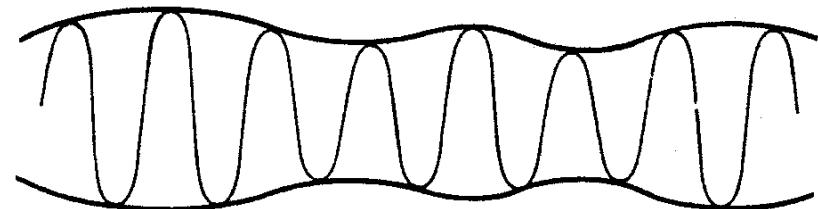
Modulation d'une onde porteuse

Forme générale d'une onde : $f(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, avec $\omega = 2\pi\nu$
=> on peut moduler : l'amplitude (**A**), la fréquence (**v**) ou la phase (**φ**)

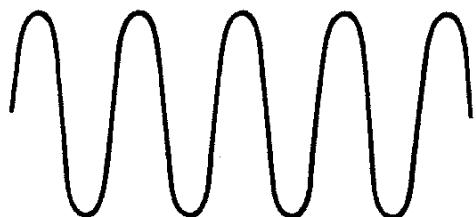
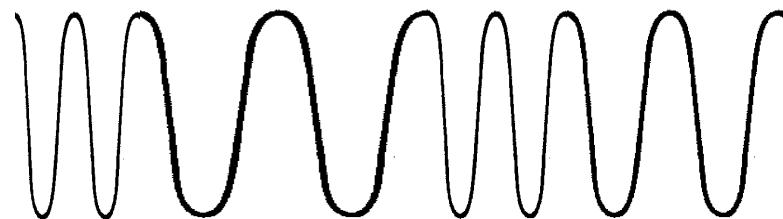
Onde originale
dite «porteuse»
(**A**, **v** et **φ** fixés)



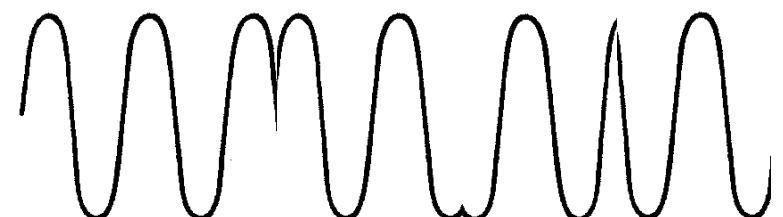
Modulation
→
de l'amplitude **A**



Modulation
→
de la fréquence **v**

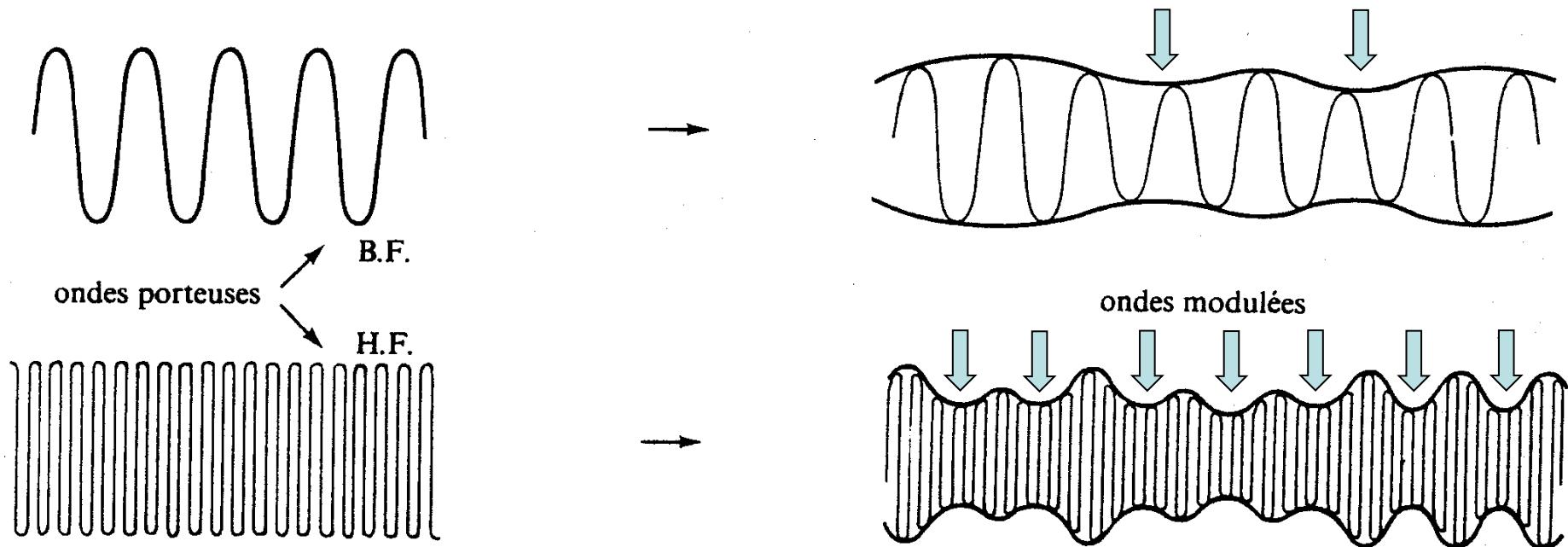


Modulation
→
de la phase **φ**

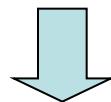


Modulation d'amplitude

(Télécommunications optiques)



La fréquence de modulation peut \uparrow si la fréquence de la porteuse \uparrow

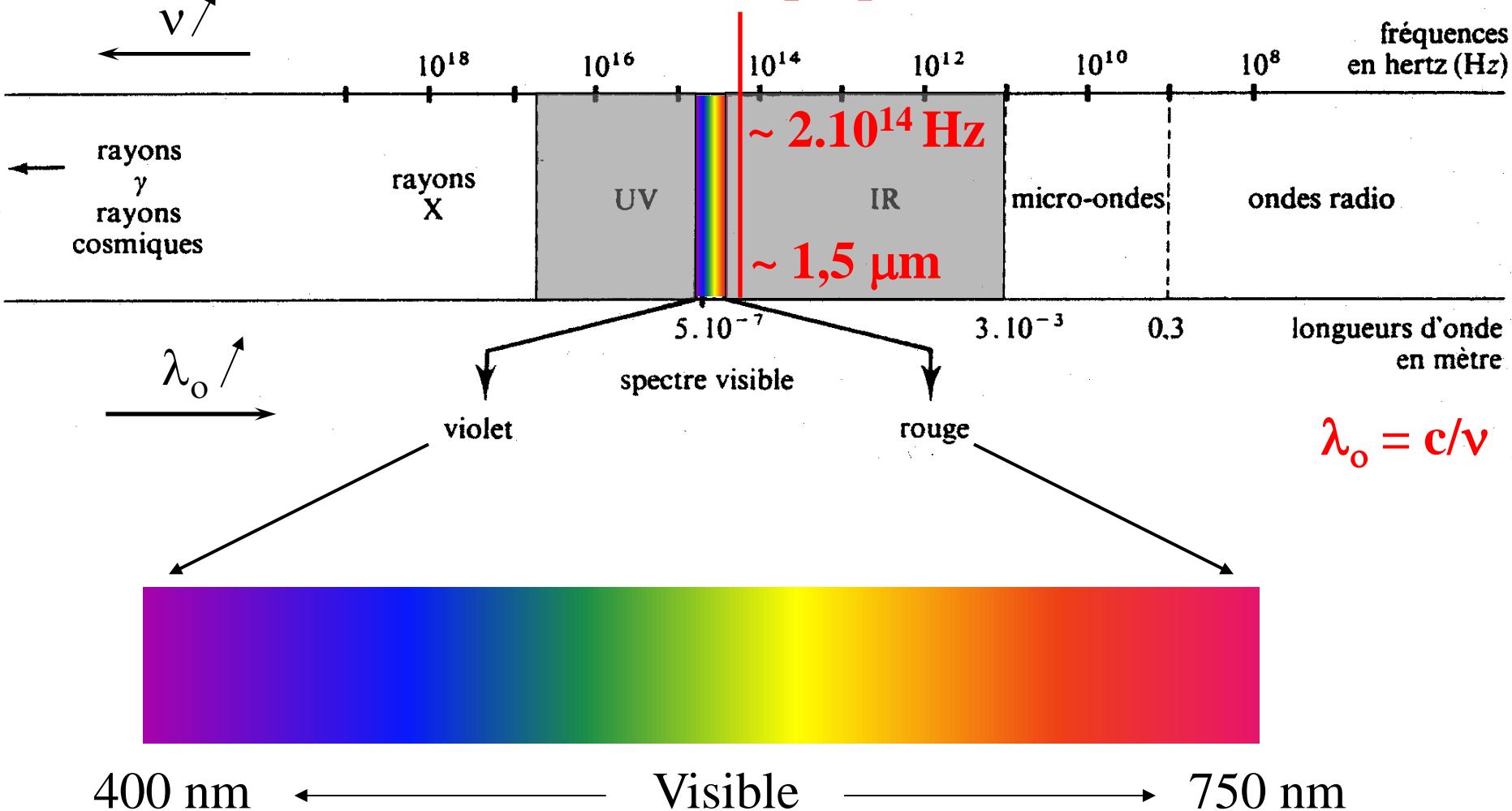


Intérêt des fréquences optiques

(~ 2000 fois + élevées que fréquences micro-ondes)

Gammes de fréquences ν (ou de λ_o) (ondes électromagnétiques)

Télécoms optiques



Télécommunications optiques en espace libre ?



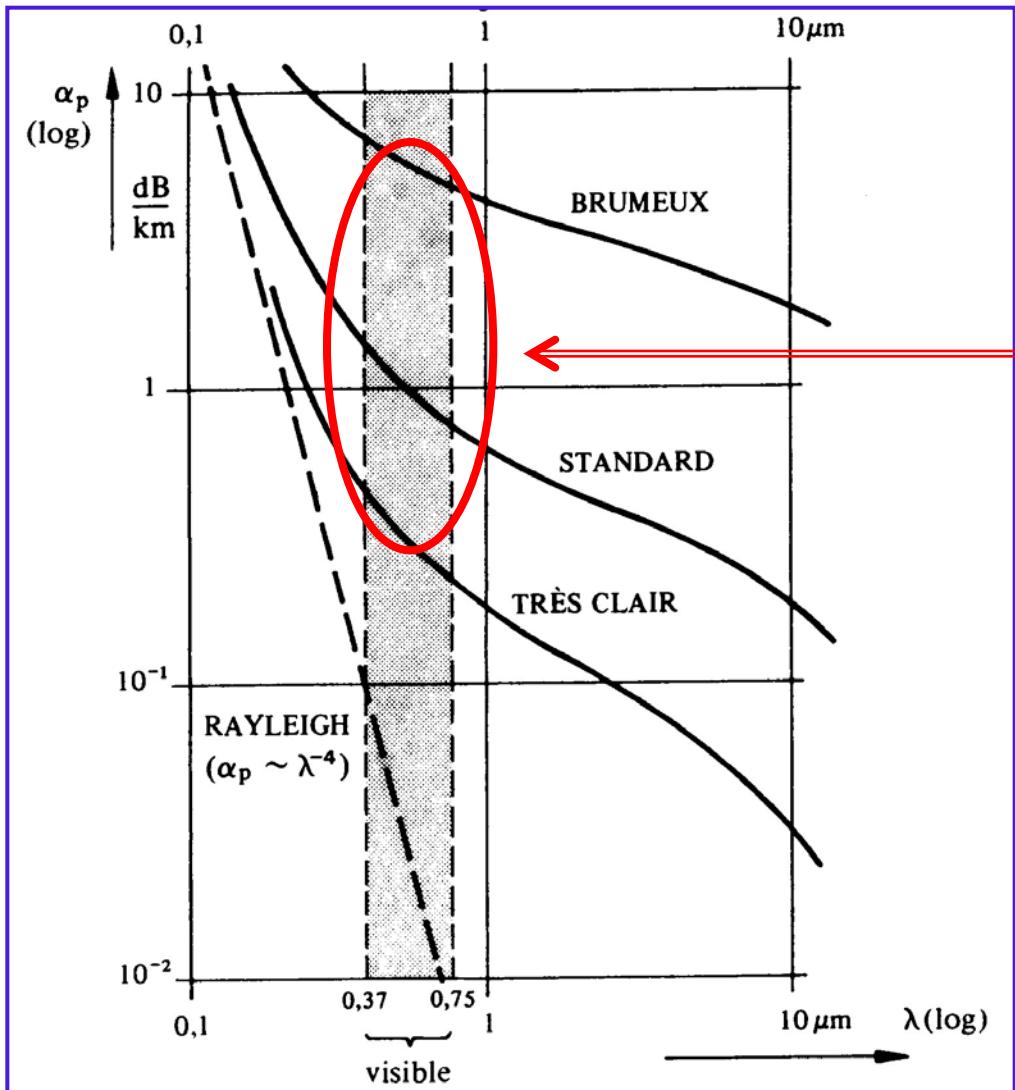
Mise en œuvre rapide et peu coûteuse

mais...

- ➡ Absorption par l'atmosphère
- ➡ Diffusion par l'atmosphère (Rayleigh)
- ➡ Sensibilité aux variations atmosphériques
- ➡ Élargissement du faisceau en cours de propagation
- ➡ Sécurité oculaire ?

**=> Domaine réservé aux courtes distances (< km)
ou aux liaisons hors atmosphère (satellites)**

Exemples d'atténuations atmosphériques



Att. $\sim 0,5$ à 5 dB/km

Intérêts des fibres optiques

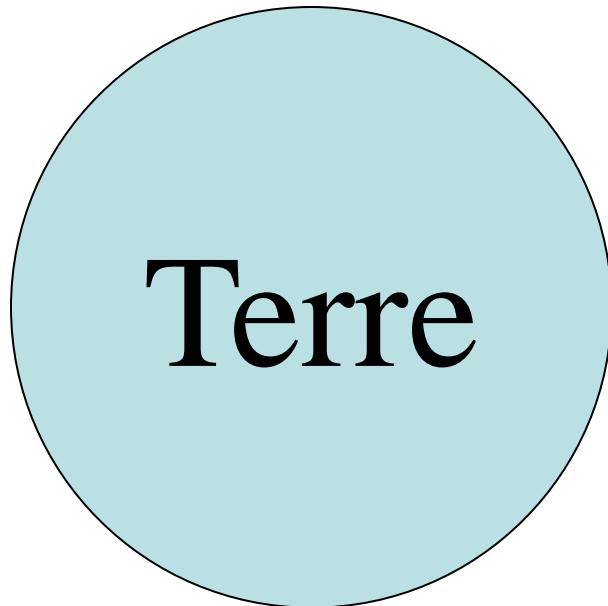
- Affaiblissement minimum du signal optique
~ 0,2 dB/km @ 1,55 µm, pour fibre optique en silice
- Très grande bande passante
possibilité de multiplexage en λ => potentiellement 100 Tbit/s
- Immunité aux perturbations électromagnétiques
utilisation en environnement « sévère »
- Isolation galvanique
pas d'étincelle, pas de destruction en chaîne
- Confidentialité
piratage difficile, détection d'intrusion
- Encombrement / Légèreté
faible diamètre, faible inertie, souple
- Coût limité
coût fibre optique < coût câble coaxial

Comparaison des divers supports de transmission guidée

	Paire télépho-nique	Paire blindée	Câble coaxial	Fibre optique	Ligne à bandes
Bandé passante (MHz)	2 <i>(100 ADSL)</i>	100	300 <i>à plusieurs GHz</i>	10 à 60 GHz	10 à 100 GHz
Affaiblis-sement (10 GHz, dB/km)			1000	< 1	10000
Sensibilité parasites	<i>forte</i>	<i>moyen</i>	<i>faible</i>	<i>nulle</i>	<i>forte</i>
Connexion Dérivation	<i>facile</i>	<i>facile</i>	<i>facile</i>	<i>délicat</i>	<i>facile</i>
Coût	<i>faible</i>	<i>faible</i>	<i>modéré à fort</i>	<i>modéré à faible</i>	<i>faible</i>

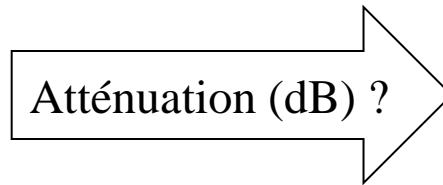
150 millions de km de fibres installés dont quelques millions de km sous-marins ; 15000 km en plus par jour ...

Ordres de grandeur / dB



Rayon : $R = 6400 \text{ km}$
Volume : $V_T = 4/3 (\pi.R^3)$
 $V_T = 10^{21} \text{ m}^3$

On considère
Volume \equiv Puissance



Rayon : $r = 3,2 \text{ cm}$
Volume : $v_B = 4/3 (\pi.r^3)$
 $v_B = 1,4.10^{-4} \text{ m}^3$

$$\text{Att(dB)} = -10 \log (v_B/V_T) = -10 \log (1,4.10^{-25})$$

Att(dB) = 248 dB

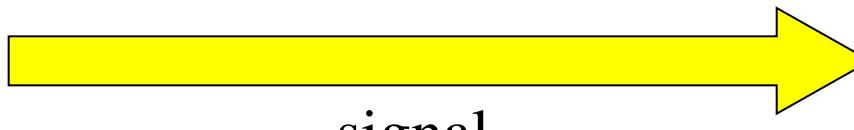


Capacité de transmission :
5 fibres optiques > 1000 paires de fils téléphoniques

SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS



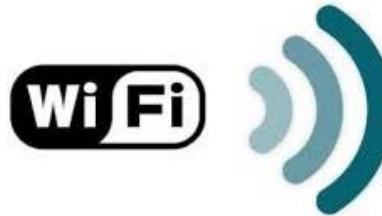
information



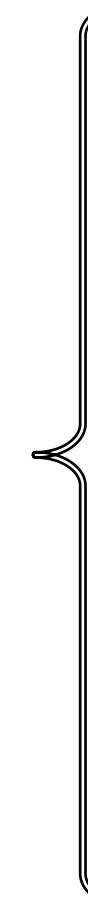
information



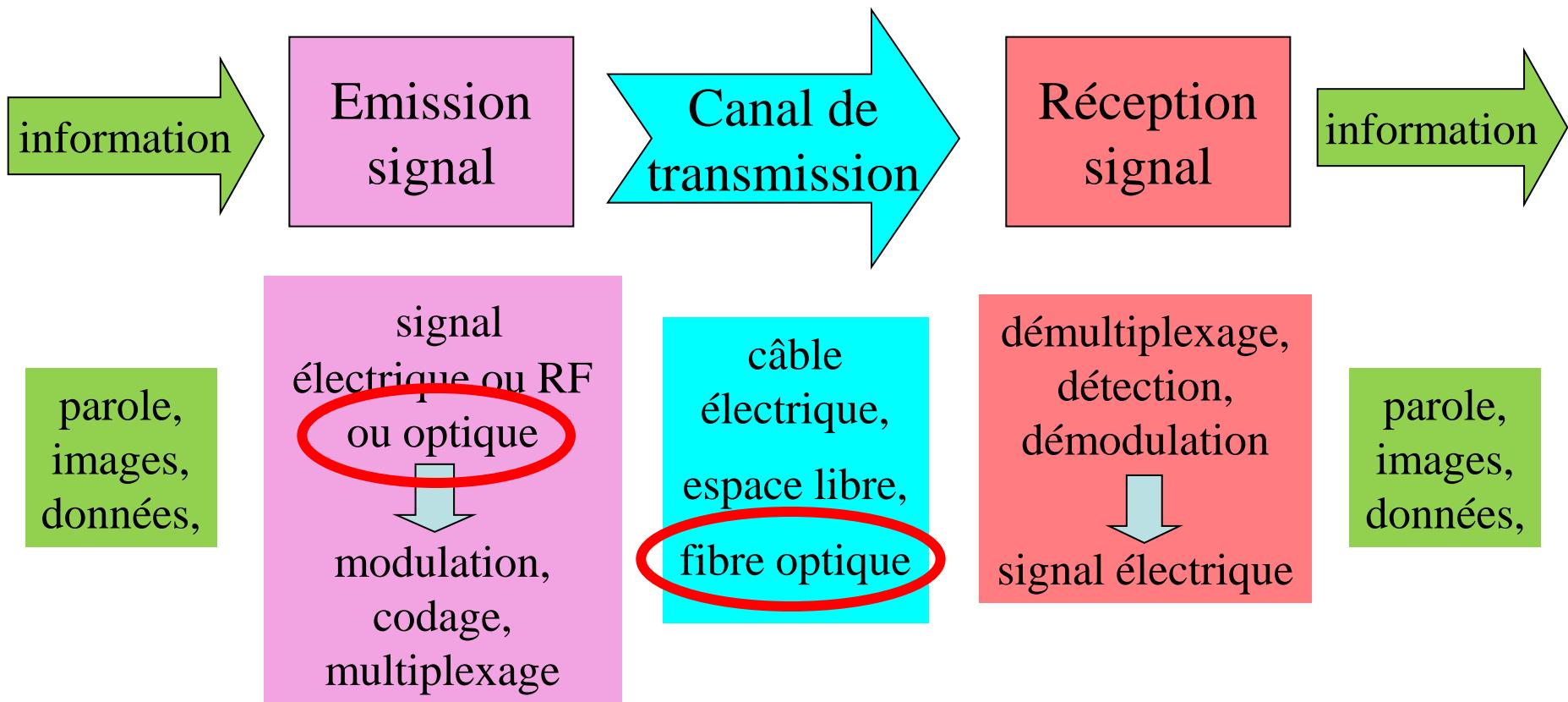
• • •



• • •

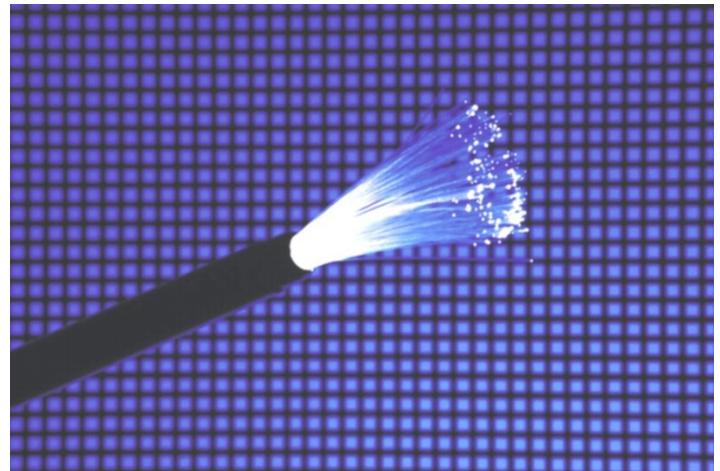
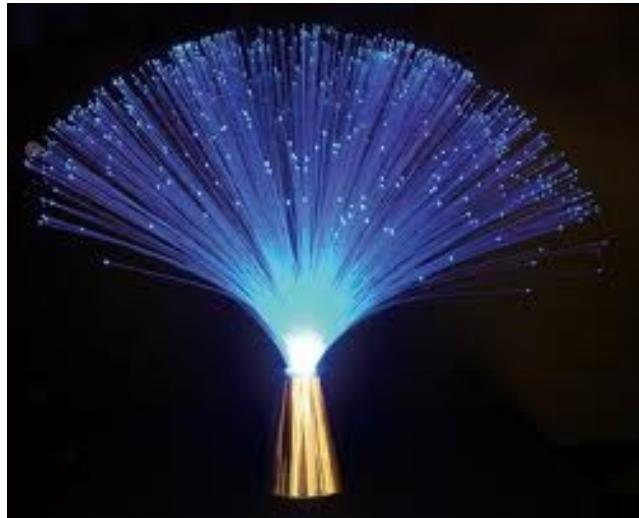


SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS



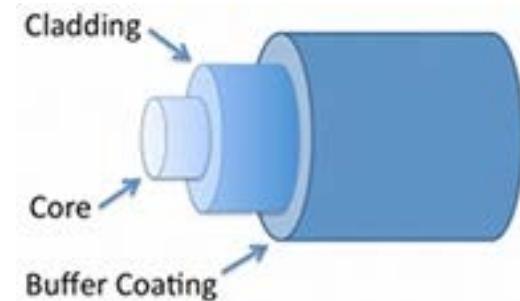
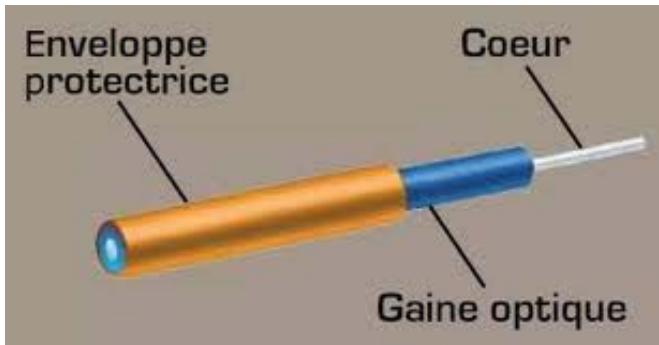
Structure d'une fibre optique

Structure de base :
guide simple cylindrique
(fibre optique pour l'éclairage)

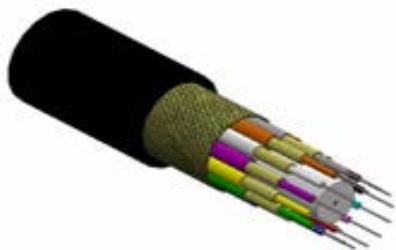
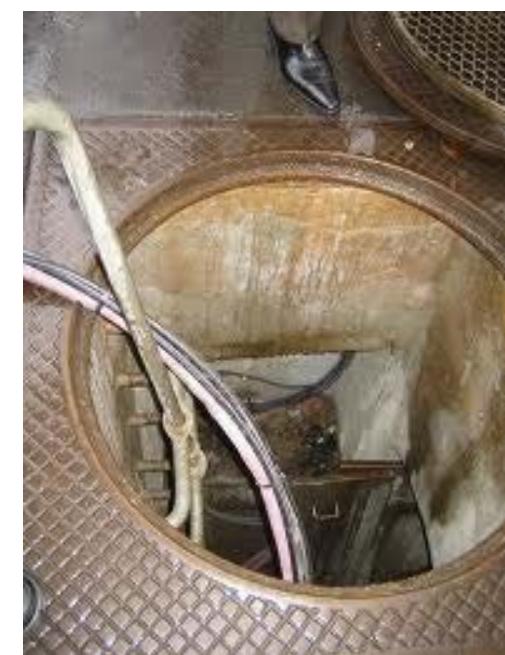
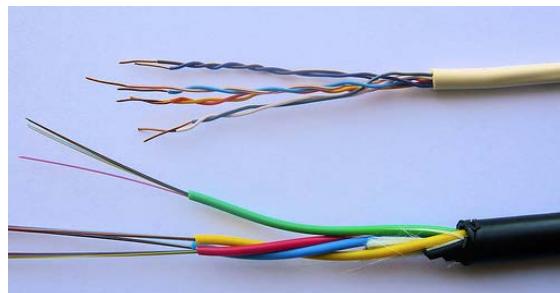


Structure d'une fibre optique

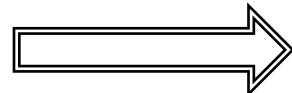
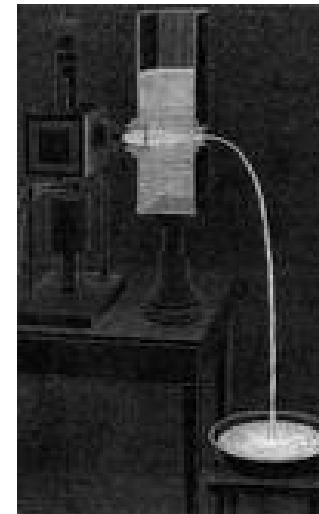
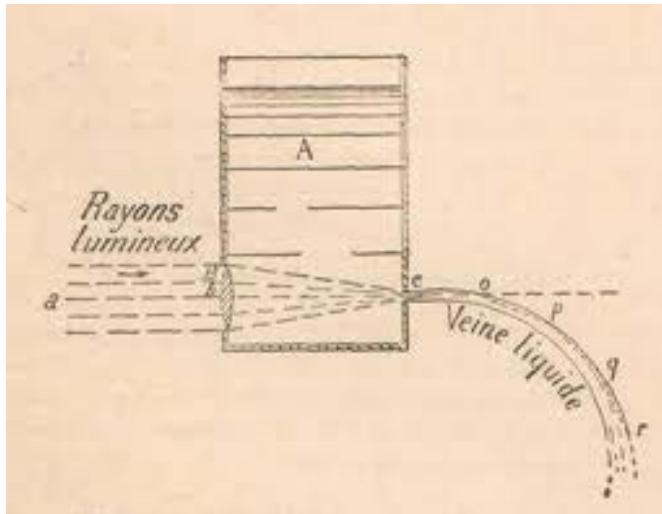
Fibre optique pour
télécommunications



Câble
optique



Principe du guidage optique ?



Rappels d'optique !...

Rappels d'optique

Optique physique / Optique géométrique

Optique physique :

- **nature ondulatoire** de la lumière
 - => propagation, interférences, diffraction
- **nature corpusculaire** de la lumière
 - => émission, interactions avec la matière

Optique géométrique :

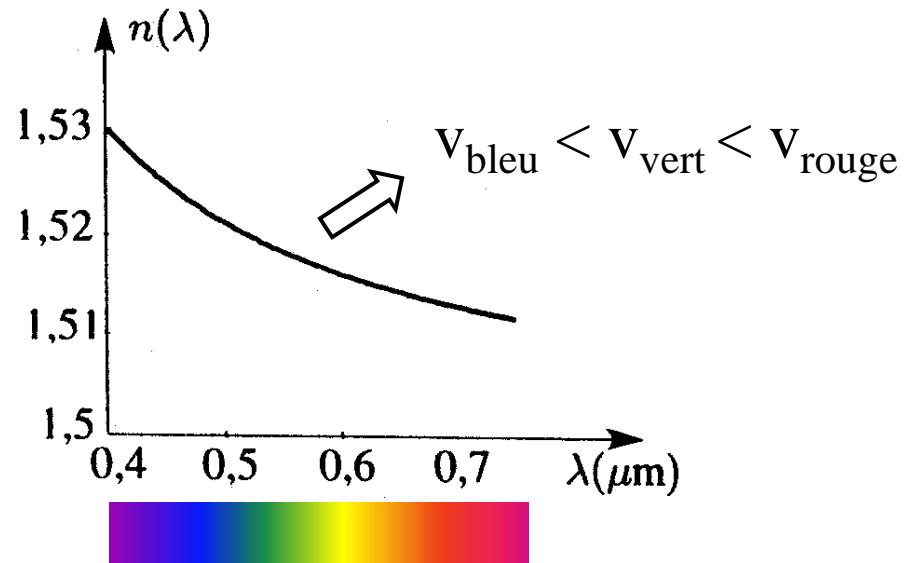
- théorie des **rayons lumineux**
 - => trajet de la lumière dans différents milieux
 - => formation des images dans les systèmes optiques
 - => applicable si on peut négliger la diffraction**

Indice de réfraction

Indice de réfraction : $n = \frac{\text{vitesse de la lumière dans le vide}}{\text{vitesse de la lumière dans le milieu}}$

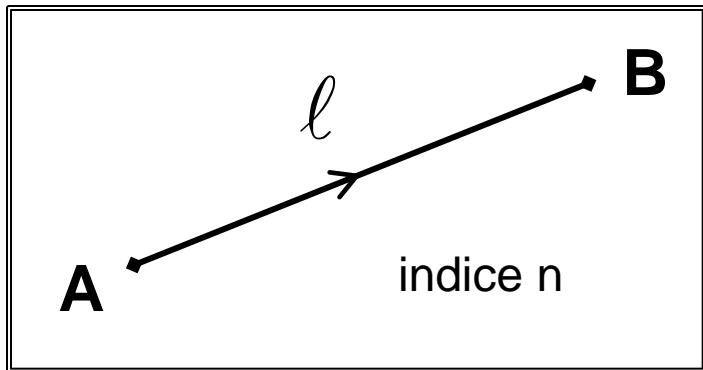
$$n = \frac{c}{v} \rightarrow v = \frac{c}{n}$$

Remarque : n dépend de $\lambda \Rightarrow n(\lambda)$



Phénomène de dispersion
de la lumière

Chemin optique



Attention : ℓ est le chemin géométrique (et non optique) séparant les points A et B

- Temps de parcours Δt (de A à B) dans le milieu d'indice n : $\Delta t = t_B - t_A = \ell / v$
- Distance L correspondante dans le vide : $L = c \times \Delta t = c \times (\ell / v) = n \times \ell$

Définition : Le **chemin optique** est la distance parcourue par la lumière dans le **vide** pendant la **durée de propagation** dans le milieu considéré.

Chemin optique de A à B (milieu homogène) = $L(AB) = c \cdot (t_B - t_A) = n \cdot \ell$

Remarque : Cas général d'un milieu non homogène => $L(AB) = c \cdot (t_B - t_A) = \int_A^B n \cdot d\ell$

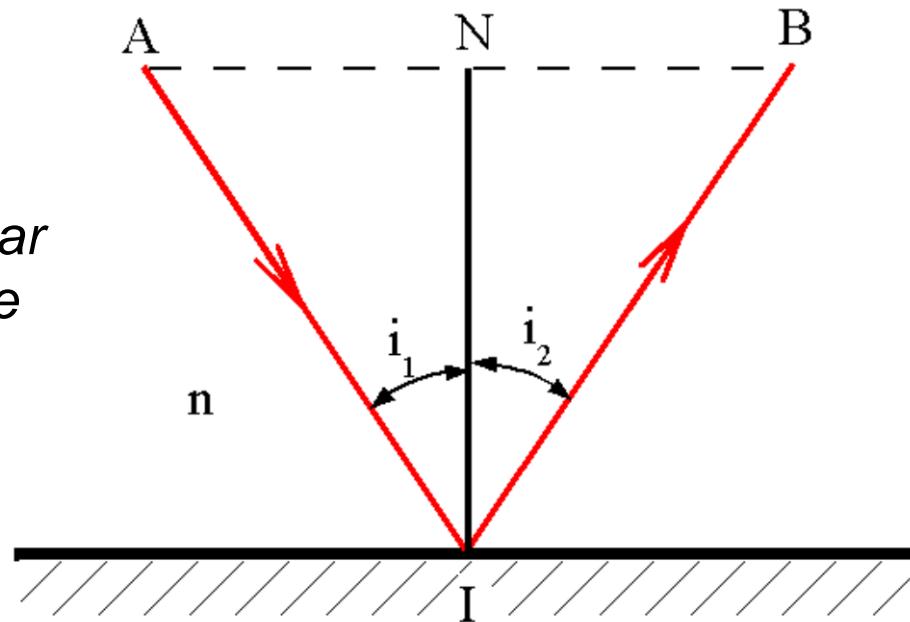
Lois de Snell-Descartes

✓ Loi de la réflexion :

Le rayon réfléchi est contenu dans le plan d'incidence

et : $i_1 = i_2$

Important : les angles sont définis par rapport à la normale IN à la surface rencontrée par le rayon incident



Définition : Le **plan d'incidence** est défini par le **rayon incident** et la **normale** à la surface rencontrée au point d'incidence.

Lois de Snell-Descartes

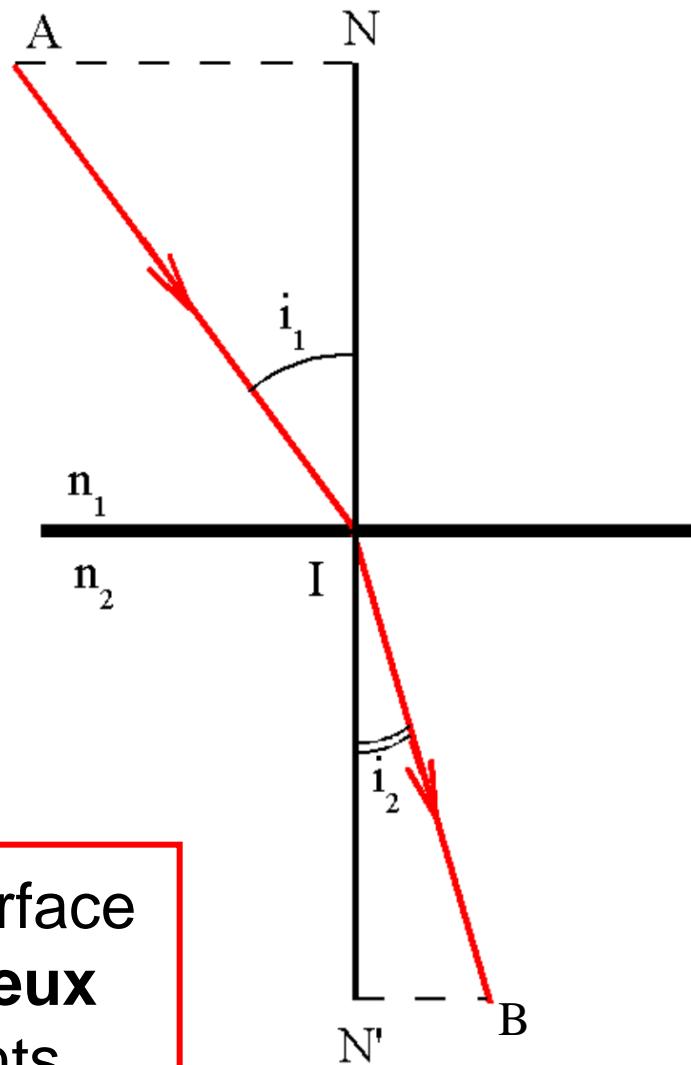
✓ Loi de la réfraction :

A la traversée d'un dioptre,
le rayon réfracté est contenu
dans le plan d'incidence

et : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Rappel : les angles sont définis par rapport à la normale IN à la surface rencontrée par le rayon incident

Définition : Un **dioptre** est la surface de séparation entre **deux milieux** transparents d'indices différents.



Réfraction limite / Réflexion totale

$$\underline{n_1 > n_2}$$



angle de réfraction limite = $i_{2\max} = \pi/2$

obtenu pour $i_1 = i_L$ = incidence limite

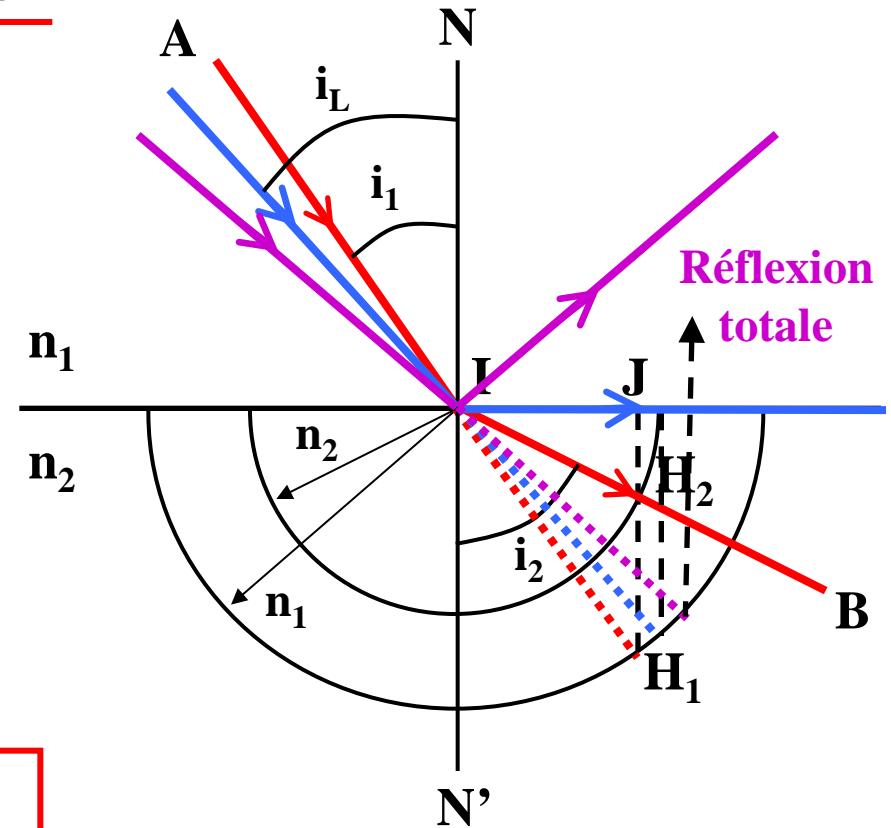


$$n_1 \sin i_L = n_2 \sin (\pi/2) = n_2$$



$$\boxed{\sin i_L = n_2/n_1}$$

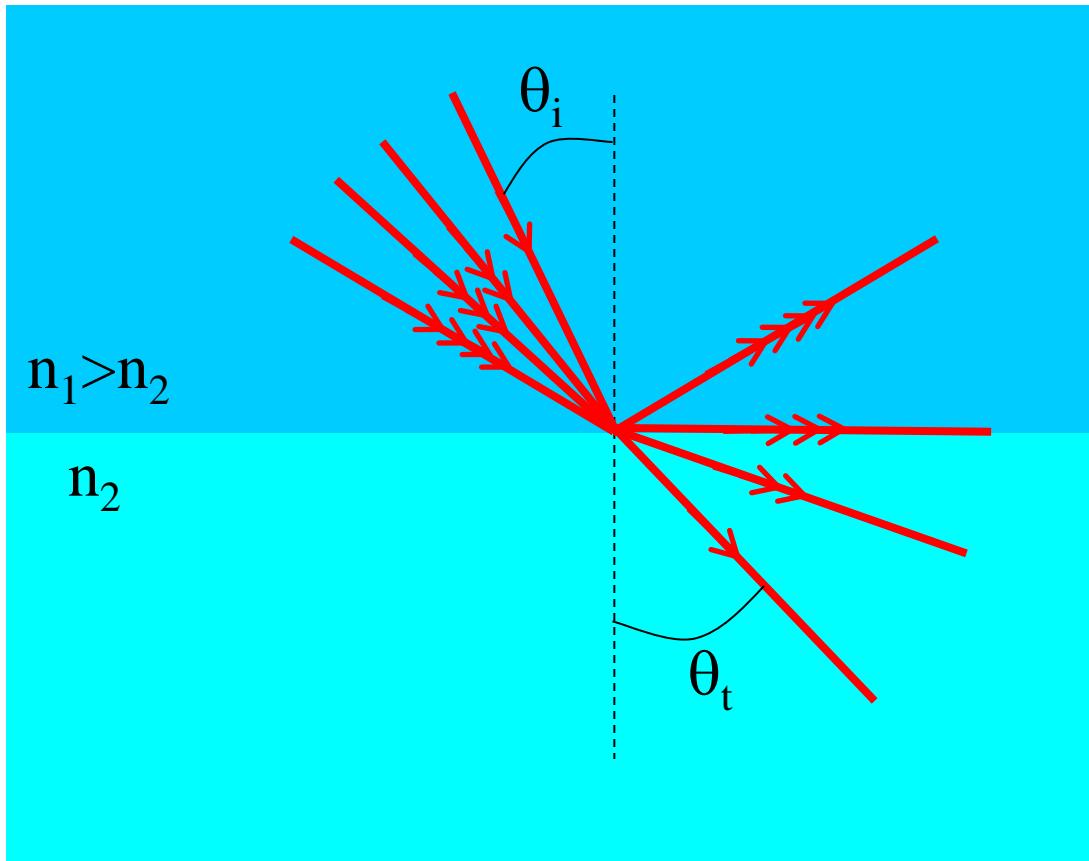
(uniquement pour $n_1 > n_2$)



Réflexion totale pour $i_1 > i_L$

(uniquement pour $n_1 > n_2$)

Principe du guidage optique



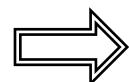
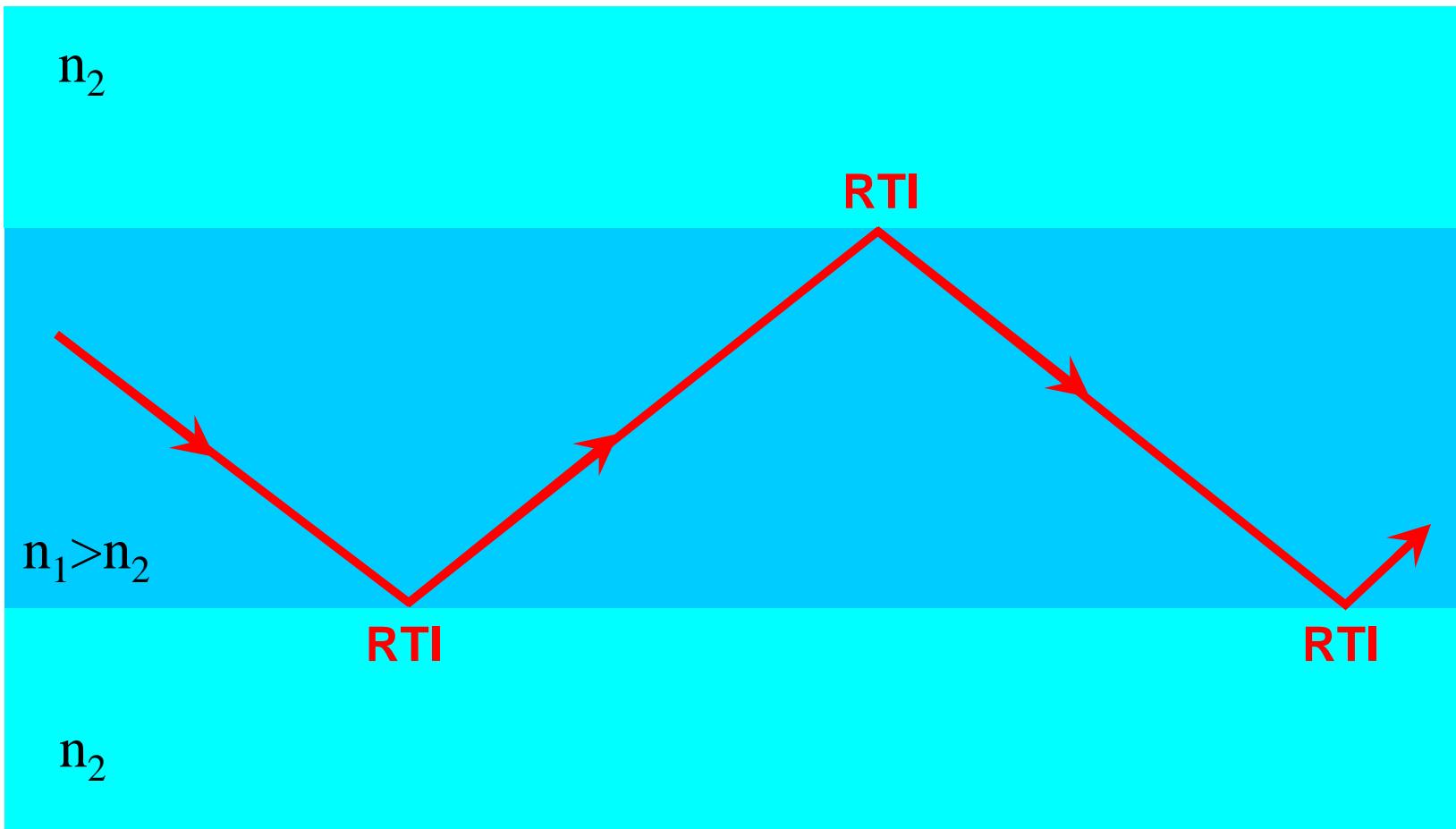
Réflexion totale interne

$$\theta_i > \theta_L$$

Angle limite : $\theta_i = \theta_L$

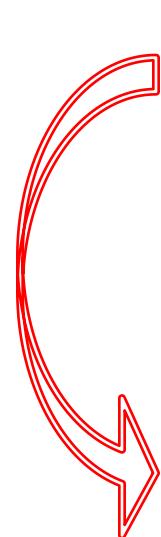
$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t)$$

Principe du guidage optique

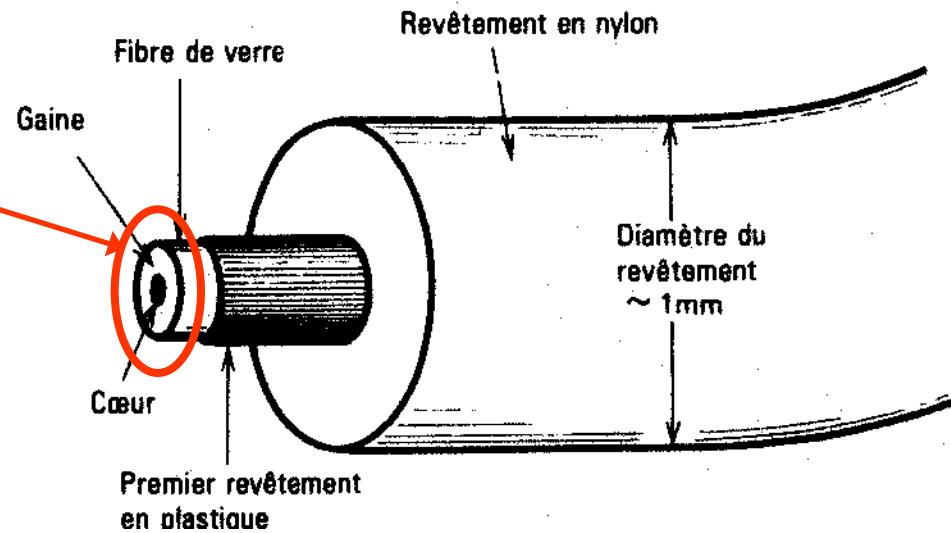


Sous certaines conditions (RTI), la lumière peut être guidée dans le milieu présentant le plus fort indice de réfraction

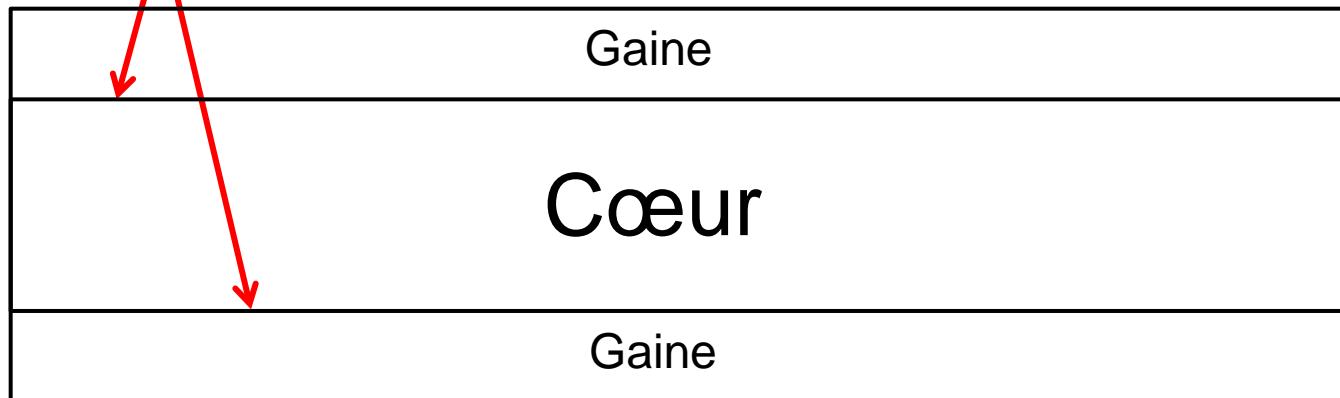
Cadre de l'étude des fibres optiques



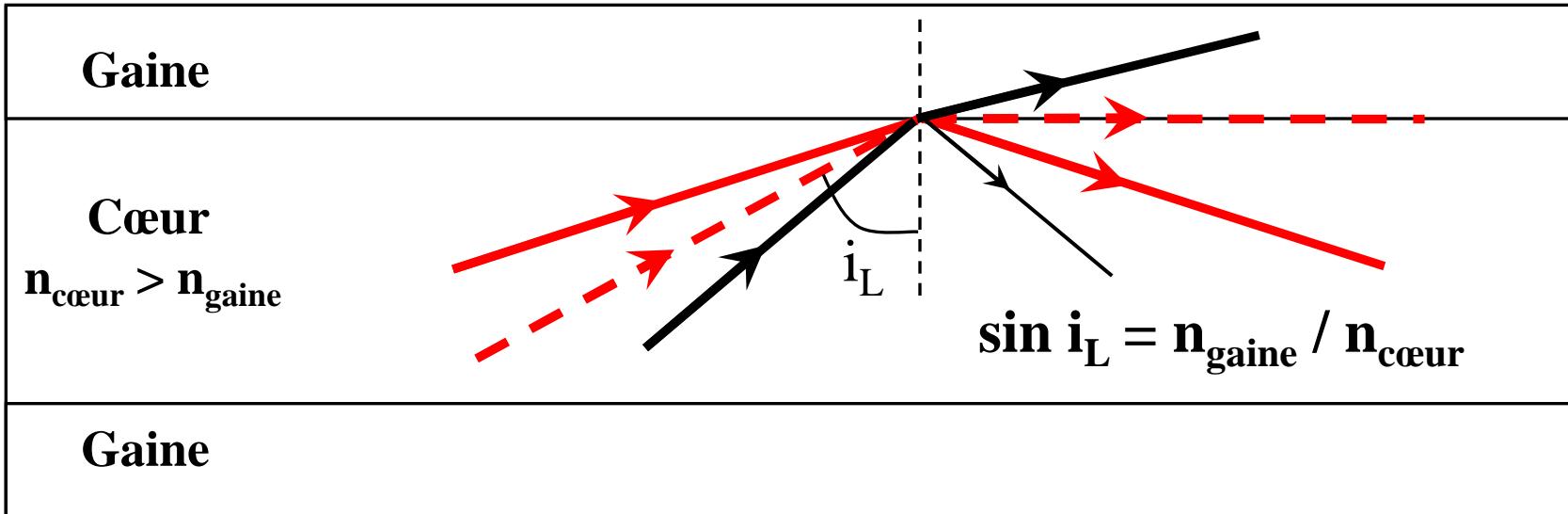
Suite de
l'étude



2 dioptrés

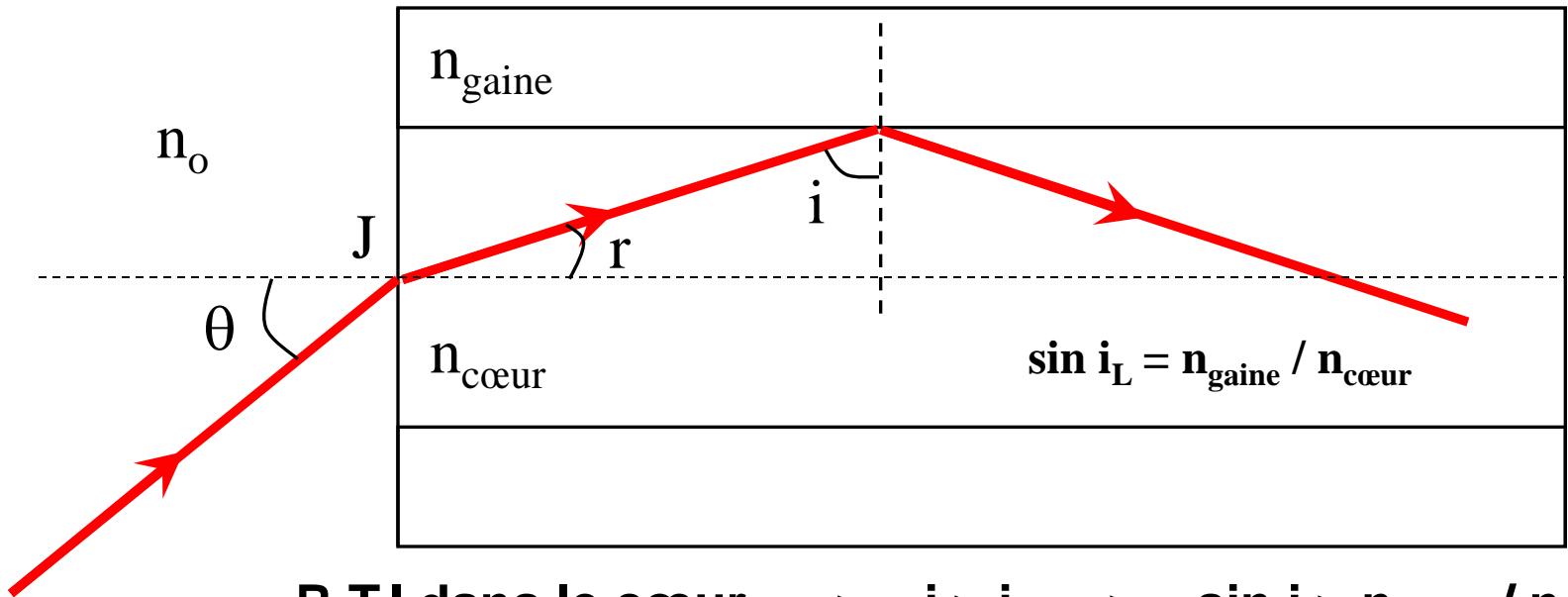


Guidage optique dans une fibre



- $i = i_L \Rightarrow$ réfraction limite = $\pi/2 \Rightarrow$ émergence rasante
- $i < i_L \Rightarrow$ rayon essentiellement réfracté dans la gaine
 \Rightarrow fuite du rayon \Rightarrow **pas de guidage**
- $i > i_L \Rightarrow$ R.T.I \Rightarrow **guidage** du rayon dans le cœur de la fibre par **réflexions successives**

Ouverture numérique



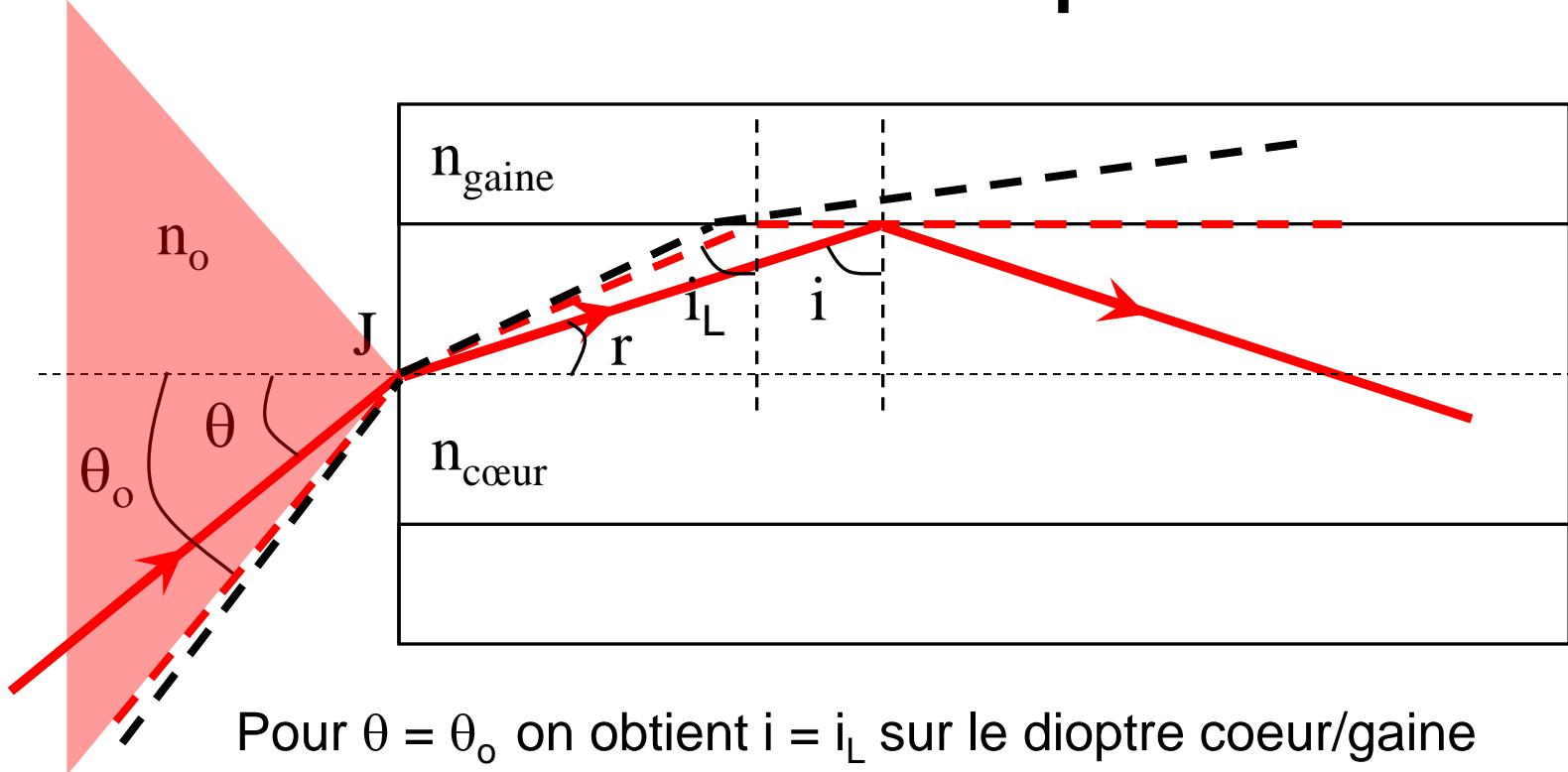
R.T.I dans le cœur $\Rightarrow i > i_L \Rightarrow \sin i > n_{\text{gaine}} / n_{\text{cœur}}$

Au point J : $n_o \sin \theta = n_{\text{cœur}} \sin r = n_{\text{cœur}} \cos i = n_{\text{cœur}} (1 - \sin^2 i)^{1/2}$

$$\Rightarrow n_o \sin \theta < n_{\text{cœur}} [1 - (n_{\text{gaine}} / n_{\text{cœur}})^2]^{1/2}$$

\Rightarrow **R.T.I dans le cœur si :** $n_o \sin \theta < \sqrt{(n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2)}$

Ouverture numérique



Pour $\theta = \theta_o$ on obtient $i = i_L$ sur le dioptre cœur/gaine

Pour $\theta > \theta_o$ on obtient $i < i_L \Rightarrow$ réfraction \Rightarrow pas de R.T.I dans le cœur

=> Cône d'acceptance : cône de demi-angle au sommet θ_o

Pour FO baignée dans
un milieu d'indice n_o

$$\text{ON} = n_o \sin \theta_o = \sqrt{(n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2)}$$

Exemples de produits commerciaux

ON = Ouverture Numérique = Numerical Aperture = NA

(pour FO baignée dans l'air => on prend $n_o = 1$)

Item #	Core	NA	Wavelength Range*	Fiber Used
<u>M14L</u>	50 µm	0.22	<u>400 to 2400 nm (Low OH)</u>	<u>AFS50/125Y</u>
<u>M15L</u>	105 µm	0.22	<u>400 to 2400 nm (Low OH)</u>	<u>AFS105/125Y</u>
<u>M25L</u>	200 µm	0.22	<u>350 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>FG200LCC</u>
<u>M38L</u>	200 µm	0.39	<u>400 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>FT200EMT</u>
<u>M28L</u>	400 µm	0.39	<u>400 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>FT400EMT</u>
<u>M40L</u>	400 µm	0.48	<u>400 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>BFL48-400</u>
<u>M37L</u>	550 µm	0.22	<u>350 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>FG550LEC</u>
<u>M29L</u>	600 µm	0.39	<u>400 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>FT600EMT</u>
<u>M41L</u>	600 µm	0.48	<u>400 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>BFL48-600</u>
<u>M35L</u>	1000 µm	0.39	<u>400 to 2200 nm (Low OH)</u>	<u>FT1000EMT</u>

Atténuation de la lumière dans une FO

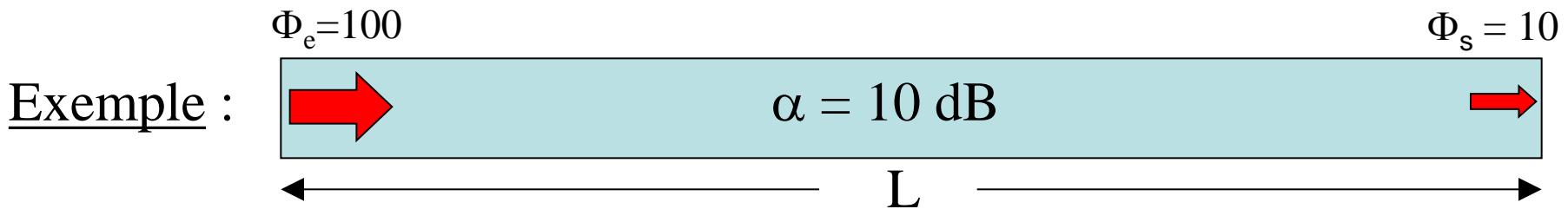
Atténuation intrinsèque (ou linéique) : α en dB (ou α_L en dB/km)

α dépend de l'**absorption** par des impuretés et de la **diffusion** :

les progrès dans l'élaboration des matériaux ont permis le développement de la fibre optique pour les télécommunications...

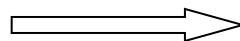
$$\alpha_{(\text{dB})} = -10 \log \frac{\Phi_s}{\Phi_e}$$

$$\alpha_{L(\text{dB/km})} = -\frac{10}{L} \log \frac{\Phi_s}{\Phi_e}$$



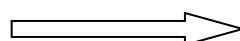
Quelle longueur L pour une transmission de 10% ?

1968



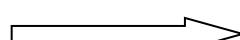
$L = 10 \text{ m}$

1975



$L = 500 \text{ m}$

1990

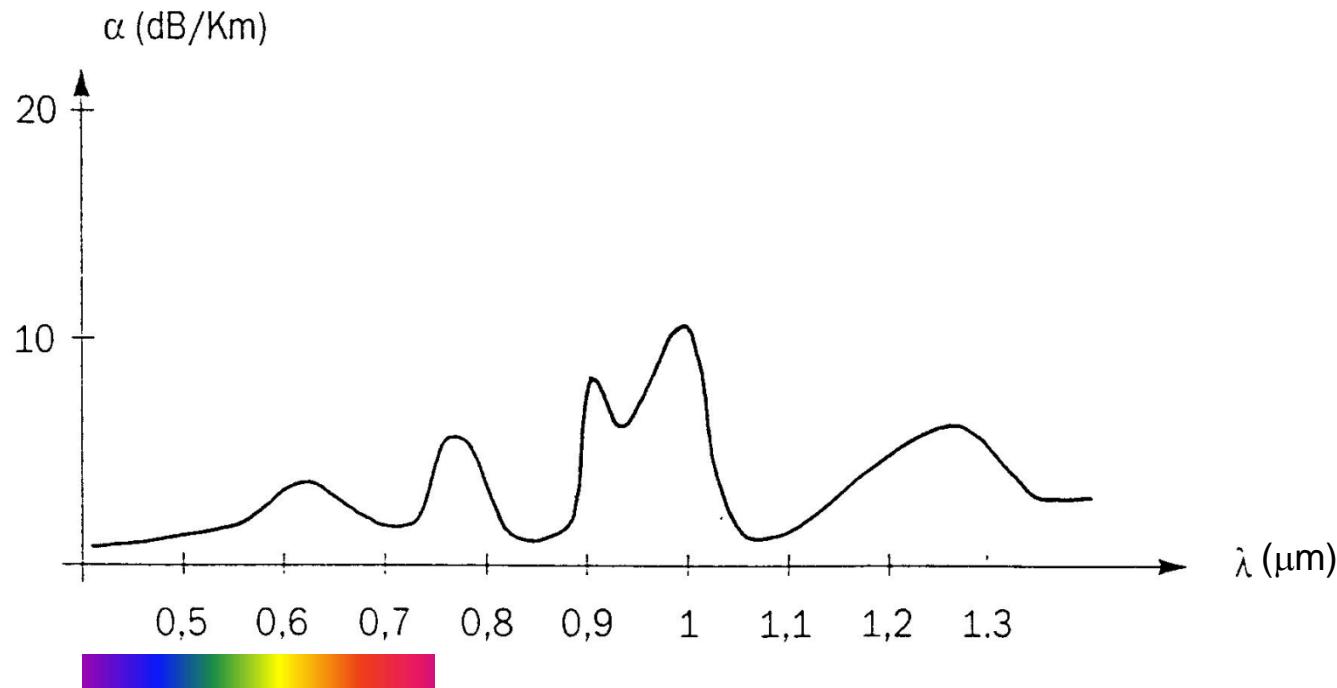


$L = 50 \text{ km}$

Atténuation de la lumière dans une FO

Atténuation due à l'absorption

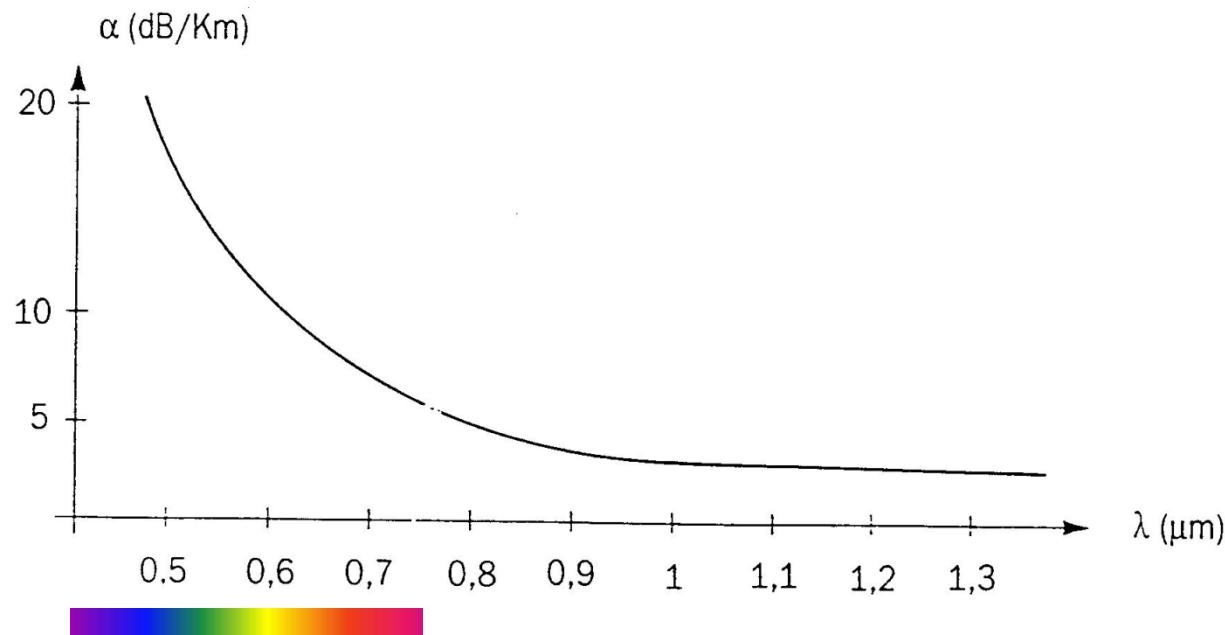
- Echange d'énergie avec les atomes constituant le matériau
- Echange d'énergie avec les impuretés (principalement ions OH⁻)



Atténuation de la lumière dans une FO

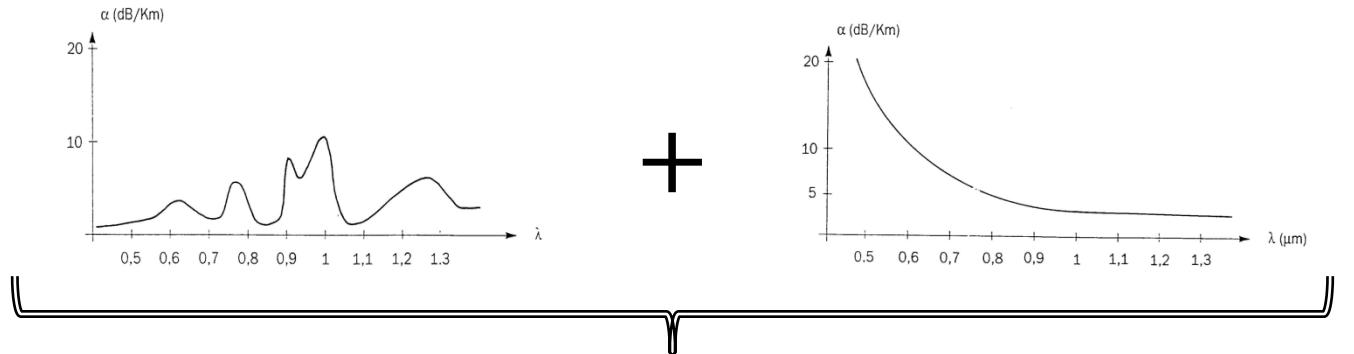
Atténuation due à la diffusion

- {
 - Essentiellement diffusion de Rayleigh (en $1/\lambda^4$) produite par les fluctuations locales de densité du matériau ou de concentration de dopants
 - Diffusion sur les imperfections de la fibre (microcourbures, rugosités,...)

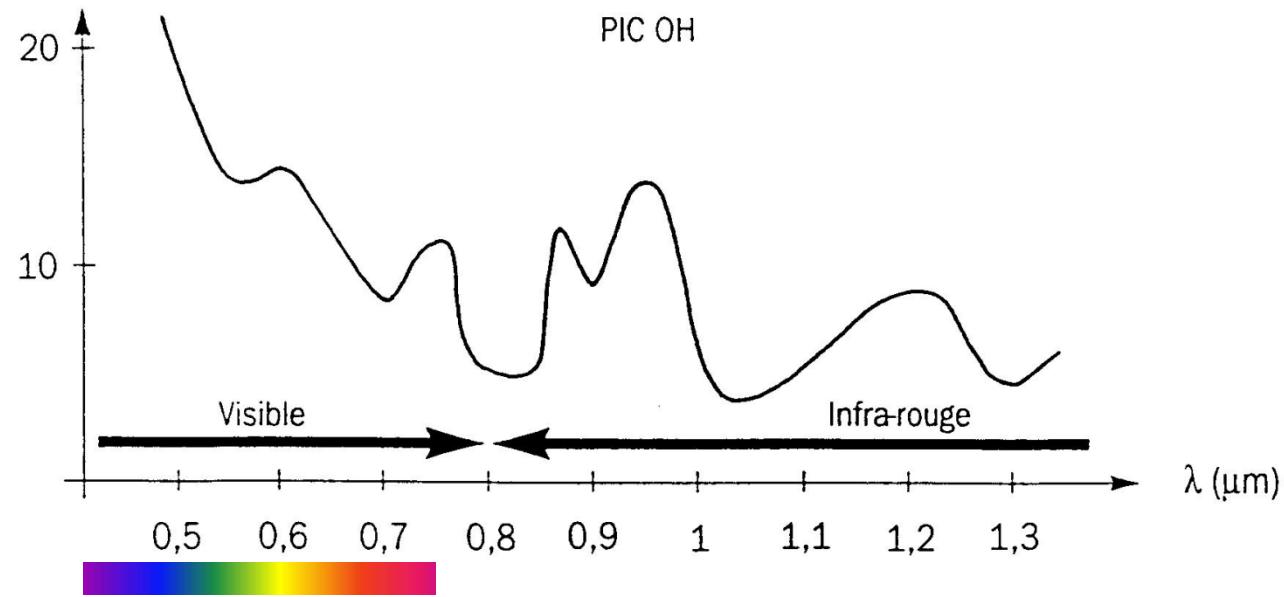


Atténuation de la lumière dans une FO

Atténuation totale : absorption + diffusion



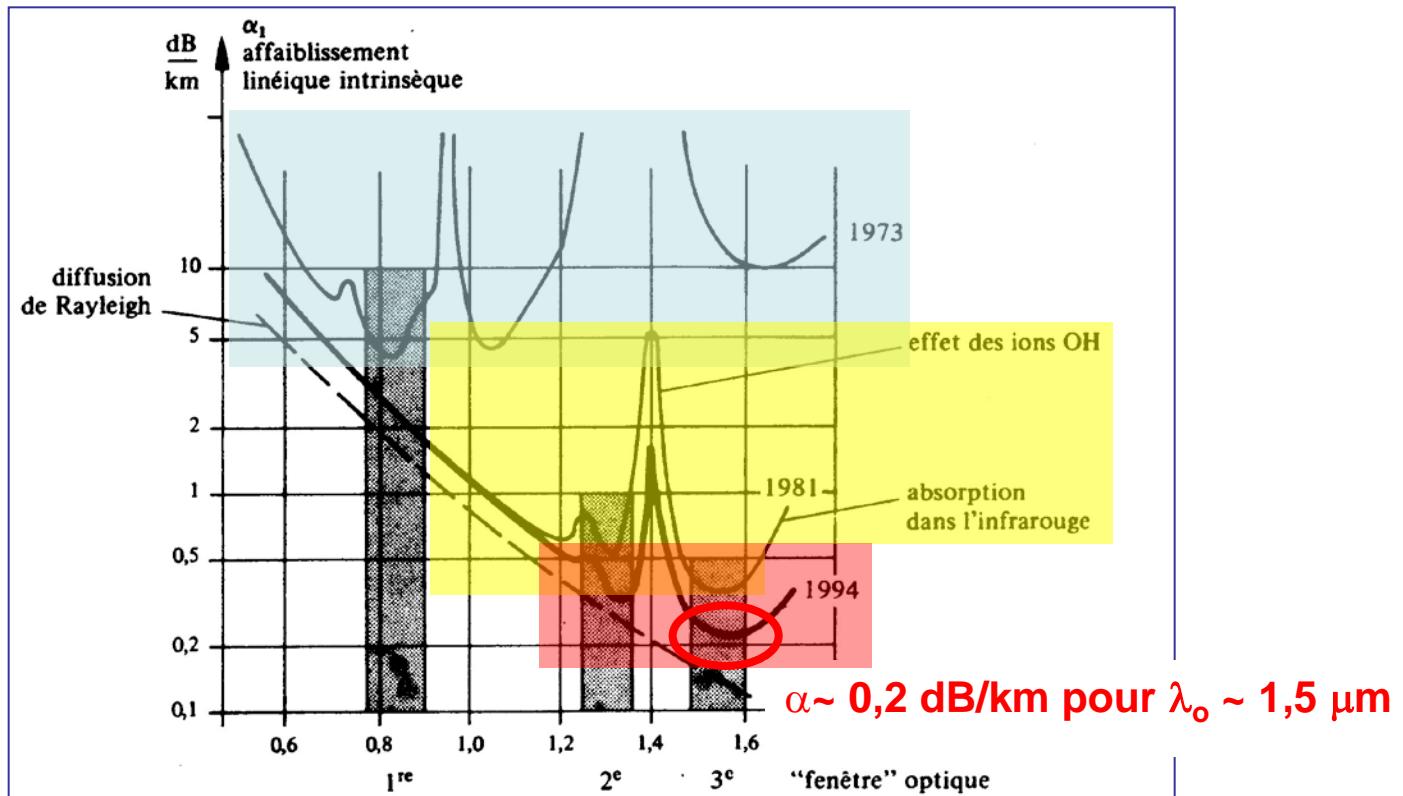
α (dB/Km)



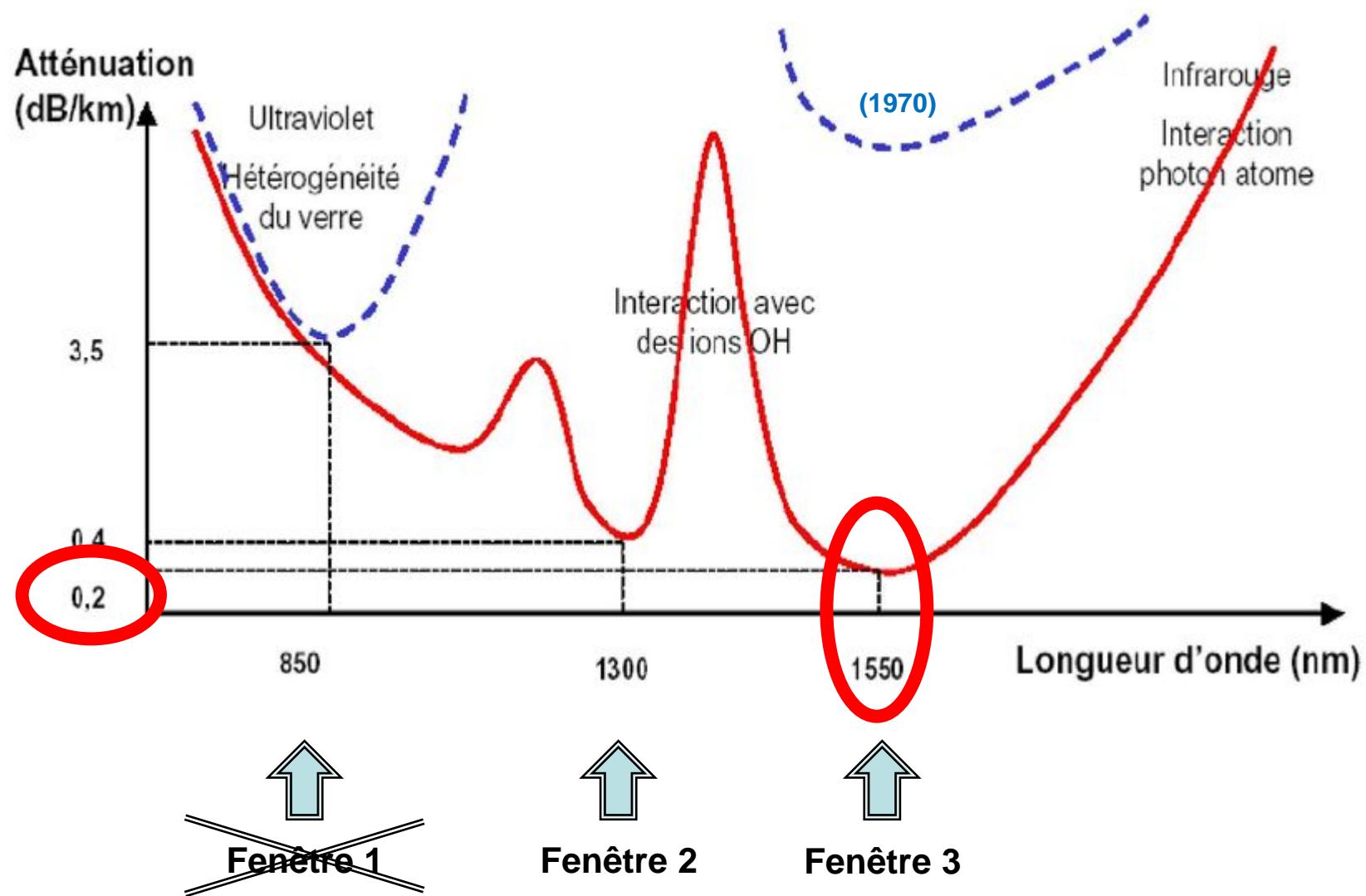
Atténuation de la lumière dans une FO

Atténuation totale : absorption + diffusion

Remarque : aujourd'hui, les progrès technologiques ont permis de rendre négligeables les pertes par absorption



Atténuation de la lumière dans une FO en silice



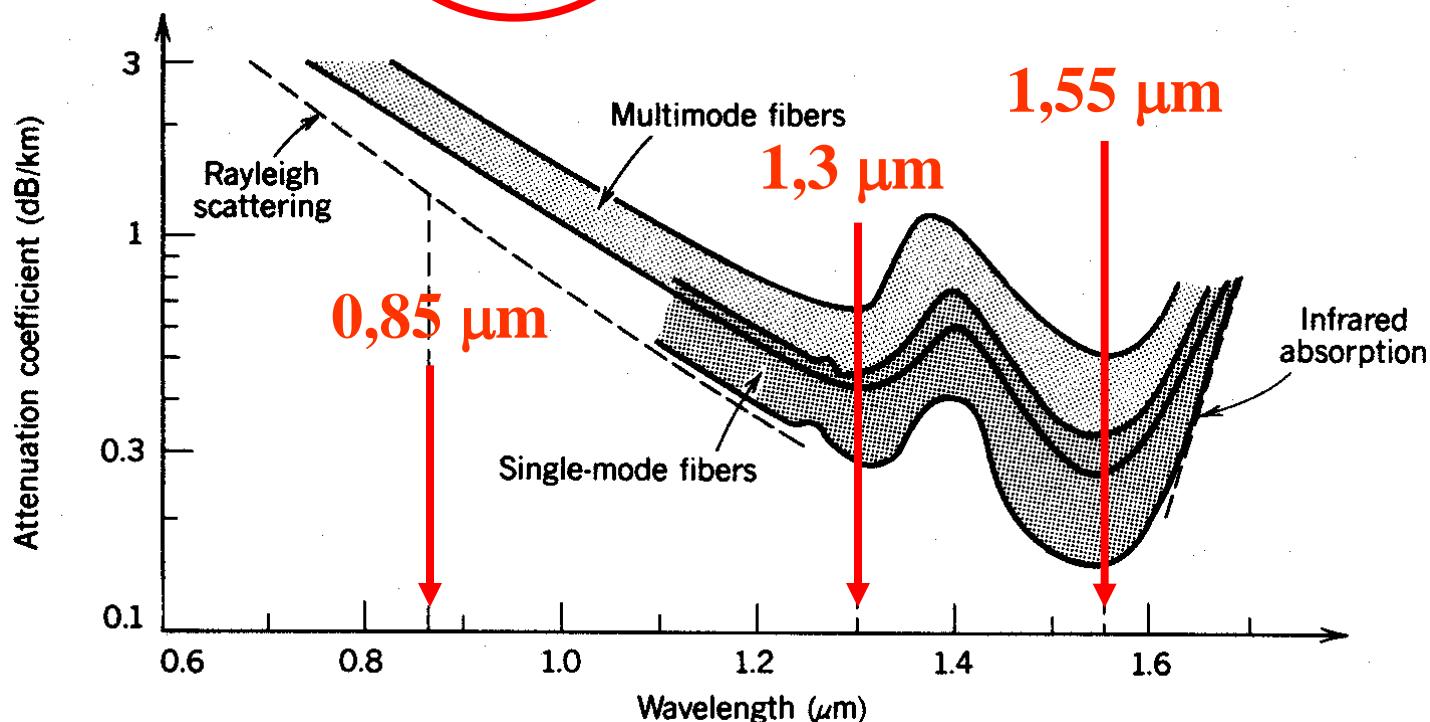
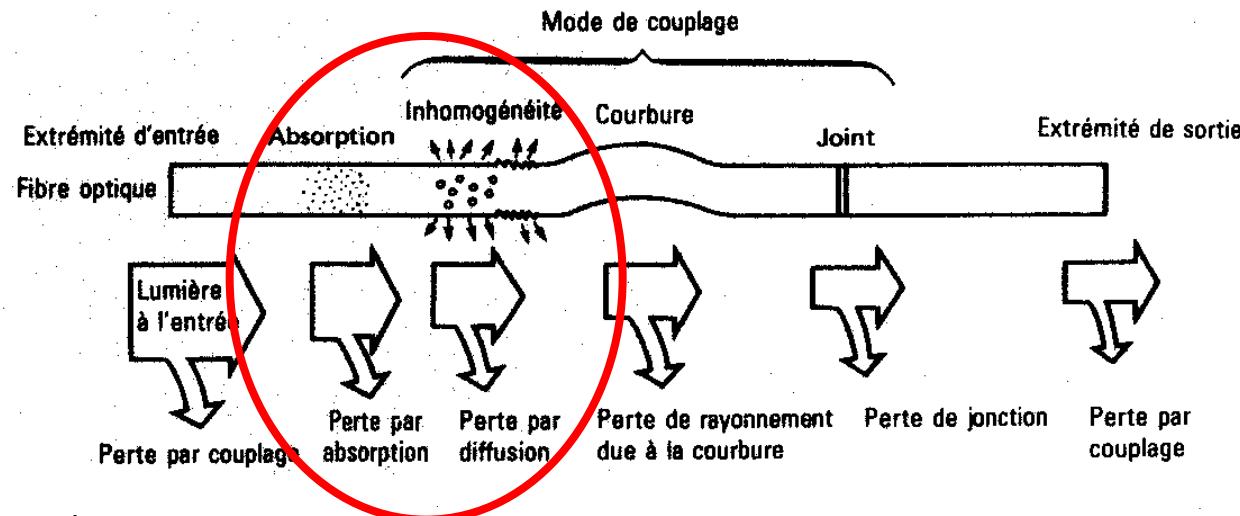
Atténuation de la lumière dans une FO

Atténuation optimale α en dB/km

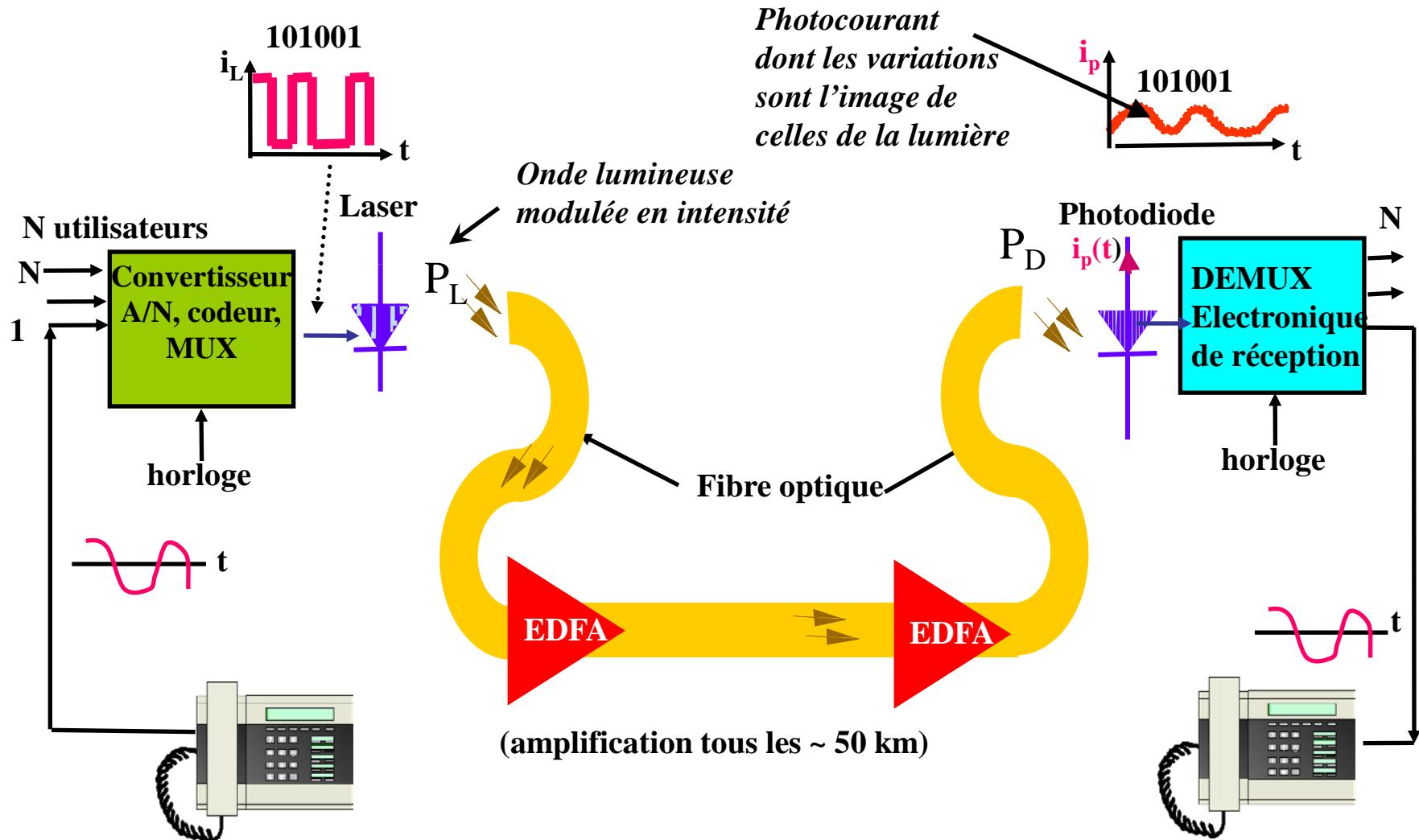
Verre	Taux d'impuretés	Atténuation en dB/km	L pour 1% transmission
Bouteille	10 kg/tonne	$2 \cdot 10^6$	1 cm
Vitre	1 kg/tonne	$2 \cdot 10^5$	10 cm
Lunettes	100 g/tonne	$2 \cdot 10^4$	1 m
Optique	10 g/tonne	$2 \cdot 10^3$	10 m
Sodocalcique	100 mg/tonne	20	1 km
Silice	1 mg/tonne	0,2	100 km

$\alpha \sim 0,2 \text{ dB/km}$ pour $\lambda_0 \sim 1,5 \mu\text{m}$

Atténuation dans une fibre optique en silice

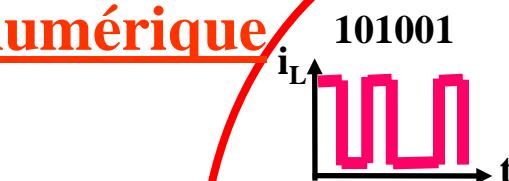


Liaison optique numérique longue distance

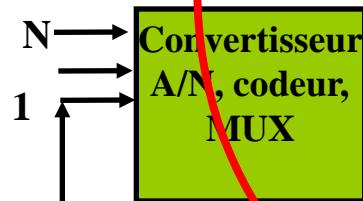


Liaison optique numérique longue distance

Signal
numérique



N utilisateurs



Photocourant
dont les variations
sont l'image de
celles de la lumière

**Distorsion
du signal**



Onde lumineuse
modulée en intensité

Fibre optique

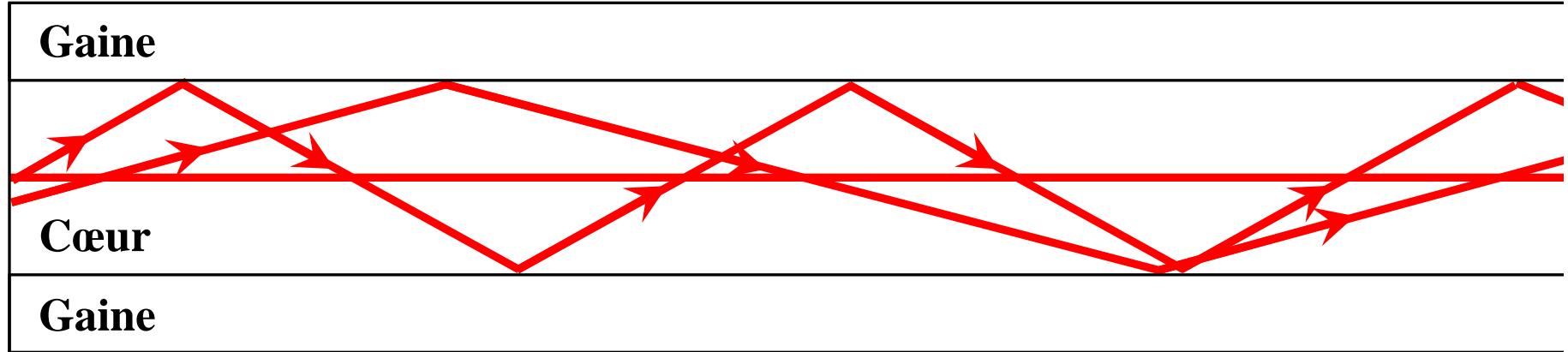
EDFA

EDFA

(amplification tous les ~ 50 km)



Dispersion modale dans une fibre optique

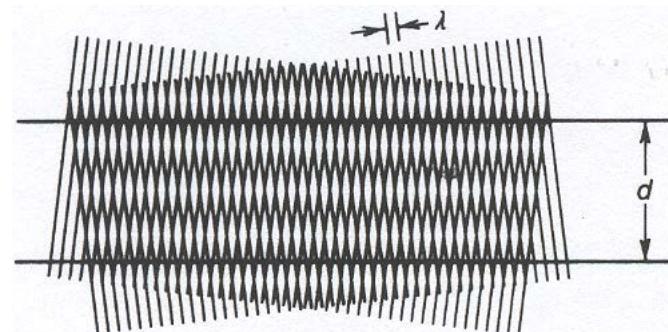
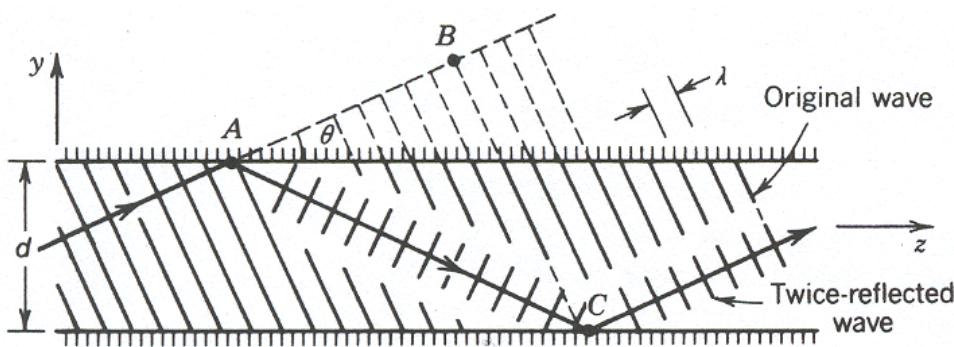


- la lumière peut se propager suivant plusieurs **modes** (trajets qui diffèrent par le nombre de réflexions totales sur la gaine)
- le temps de parcours de la lumière à l'intérieur de la fibre optique (cœur homogène) dépend donc du mode considéré

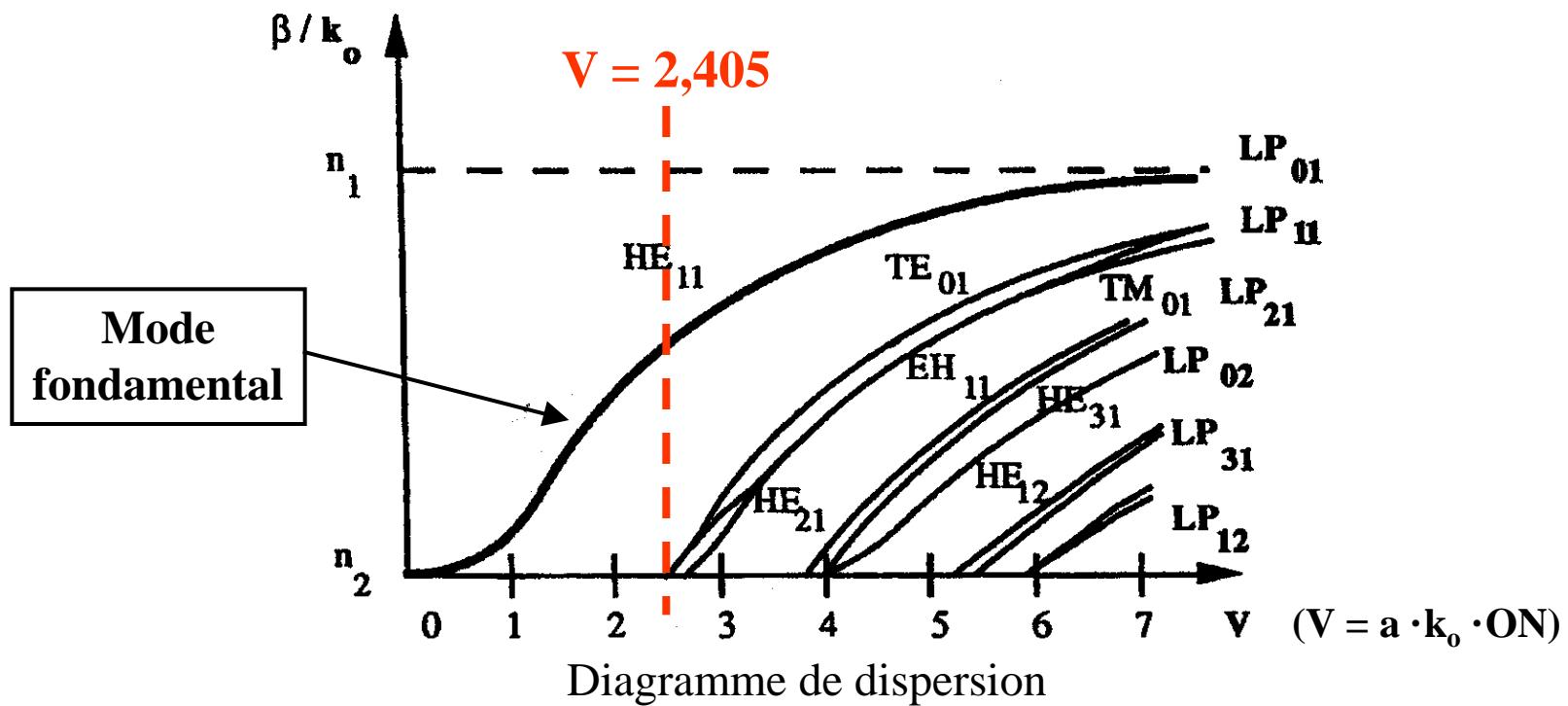
L'existence de plusieurs modes entraîne l'**élargissement temporel** d'une impulsion de lumière au cours de sa propagation : c'est le phénomène de **dispersion modale**

(Remarque : le nombre de modes dépend du rayon du cœur de la fibre)

Modes de propagation

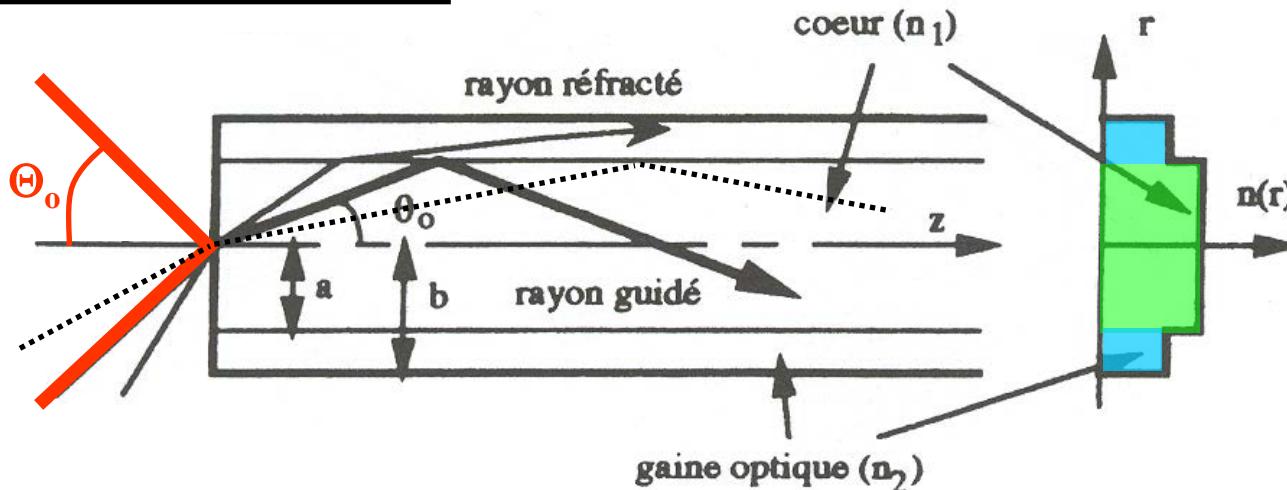


Condition d'auto-consistance et modes de propagation dans un guide



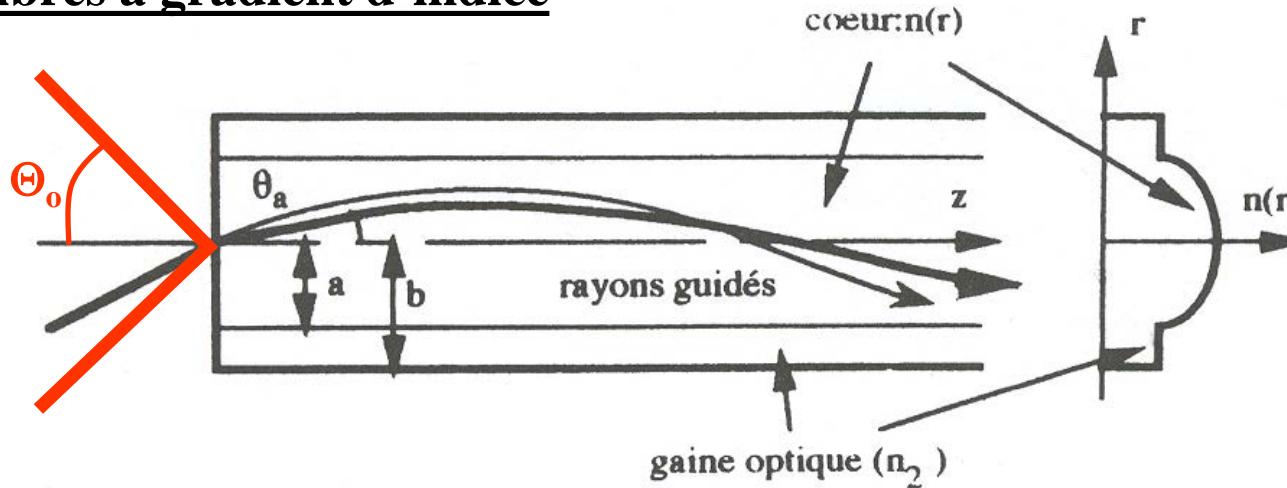
Profil d'indice d'une fibre optique

Fibres à saut d'indice



Guidage pour
 $n_1 \cdot \cos \theta_o \geq n_2$

Fibres à gradient d'indice



Guidage pour
 $n(r) \cdot \cos \theta(r) = n_1 \cdot \cos \theta_a$

Ouverture Numérique = ON = $\sin \Theta_o$ = NA = Numerical Aperture

Fibres optiques (récapitulatif)

Paramètres utiles (le rayon du cœur de la fibre est noté : a)

Ouverture numérique :

$$O.N. = \sin \Theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Différence relative d'indices :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Profil d'indice (gradient, $\alpha > 1$) :

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

Fréquence réduite :

$$V = a \cdot k_o \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Nombre de modes d'une fibre :

$$N \approx \frac{\alpha}{\alpha + 2} \cdot \frac{V^2}{2}$$

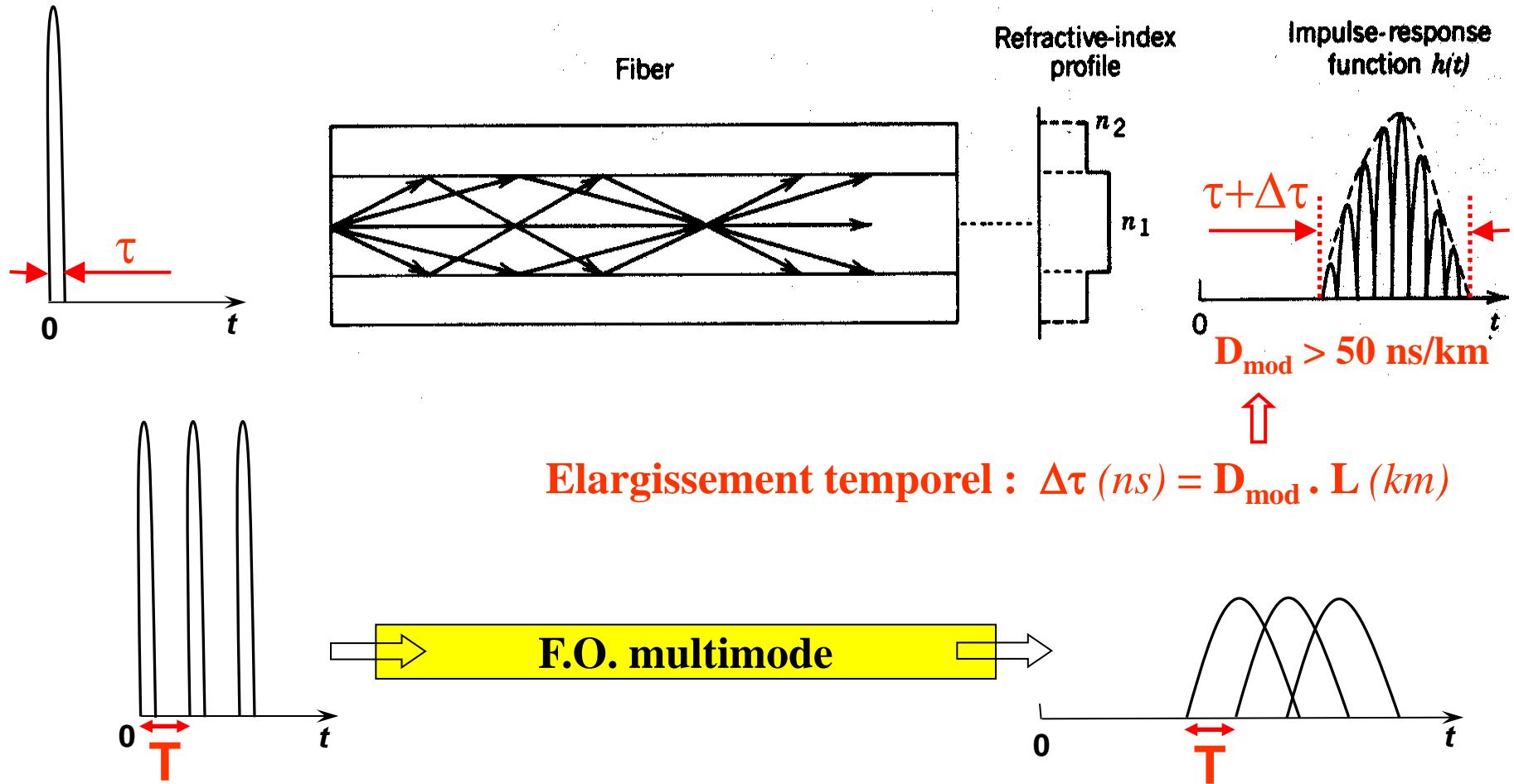
Régime monomode pour :

$$V < 2,405$$

et propagation monomode pour $\lambda_o > \lambda_c$ avec : $\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

(En effet : $V = a \cdot O.N. \cdot 2\pi / \lambda_o \Rightarrow$ si $V = 2,405$ pour λ_c , alors $V < 2,405$ pour $\lambda_o > \lambda_c$)

Dispersion modale dans une fibre optique (1)

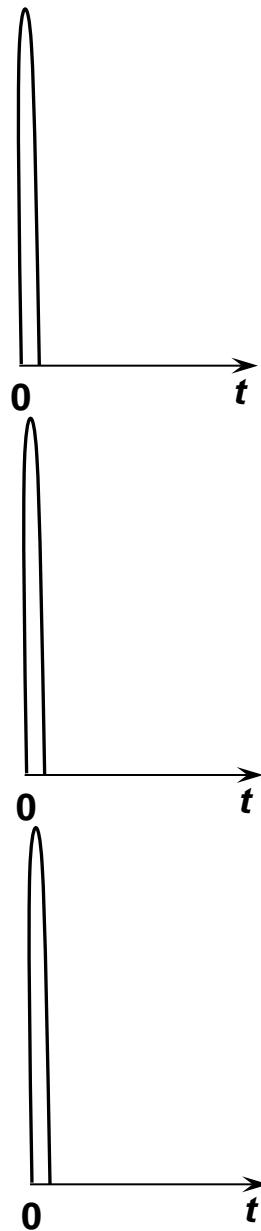


On doit $\triangleright T$ pour pouvoir discerner les impulsions en sortie de fibre

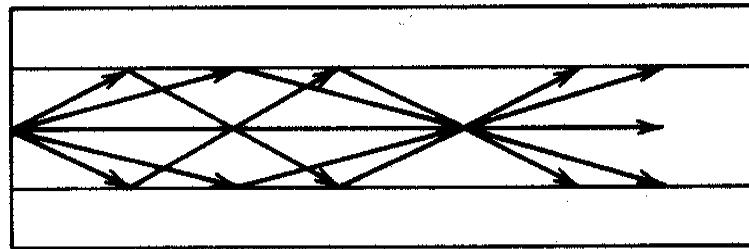
Débit = $1/T$ =>

La dispersion modale limite le débit de la liaison

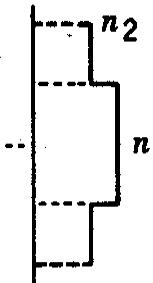
Dispersion modale dans une fibre optique (2)



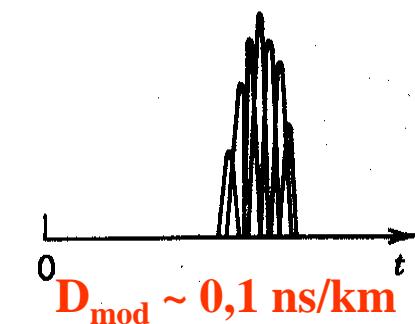
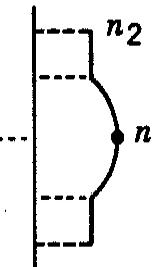
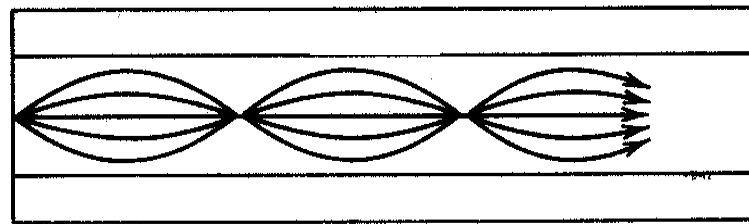
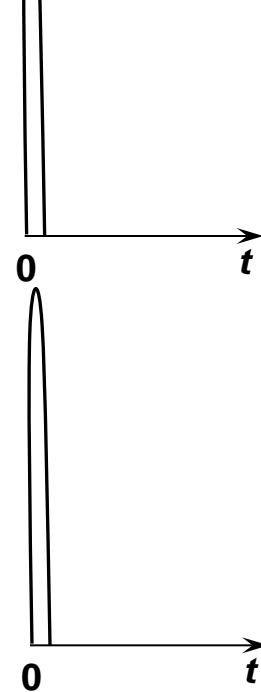
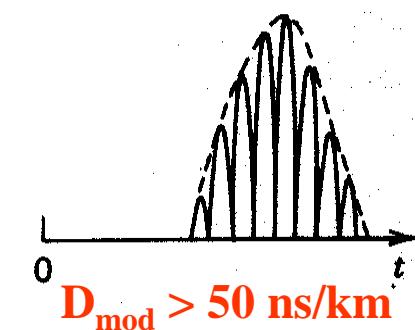
Fiber



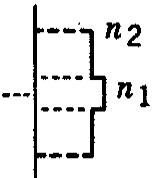
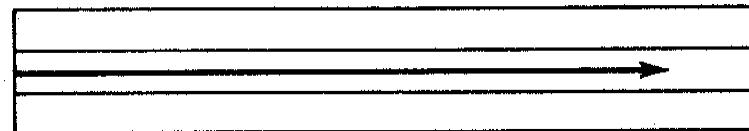
Refractive-index profile



Impulse-response function $h(t)$



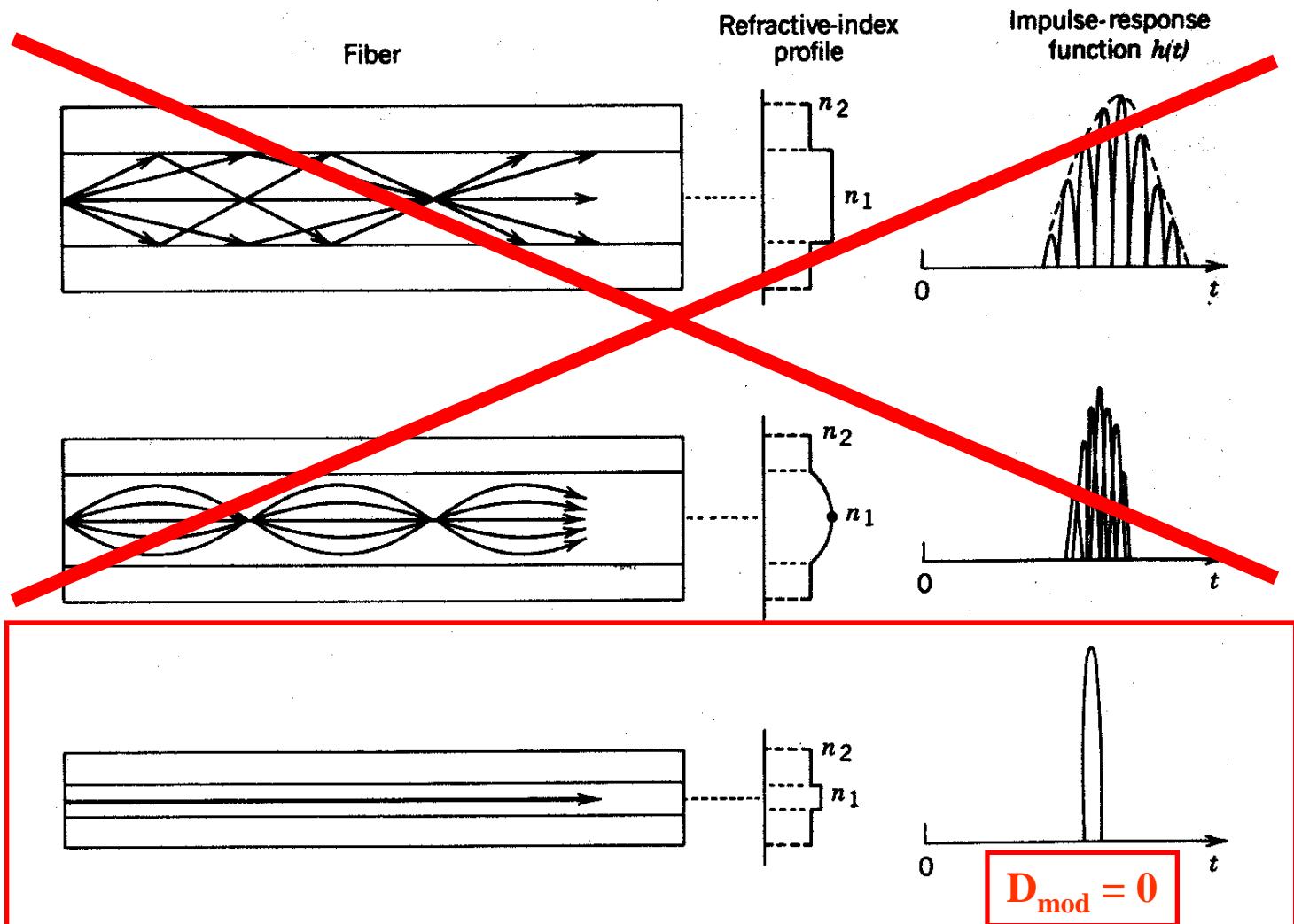
F.O. monomode



$V < 2,405$

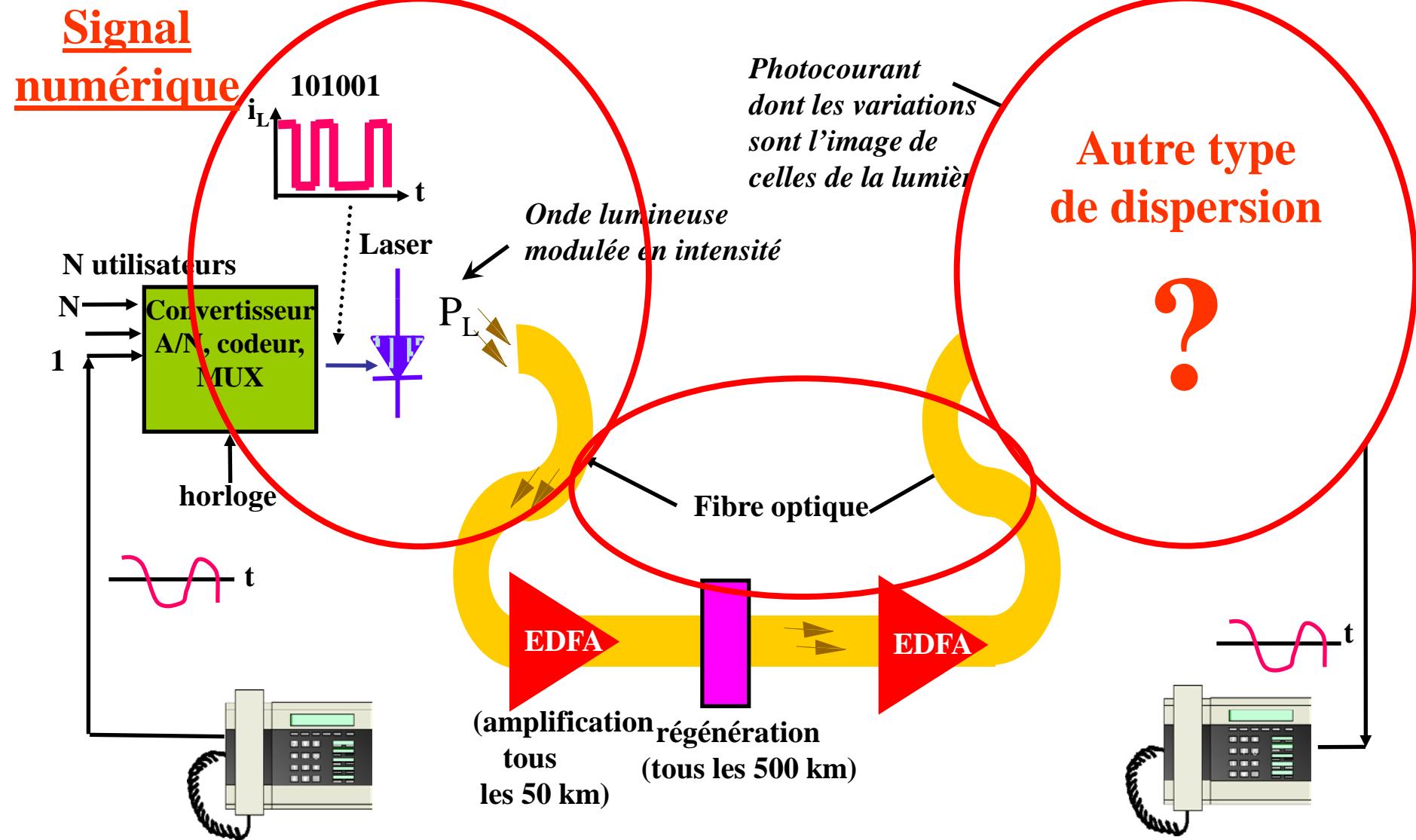


Dispersion modale dans une fibre optique (3)

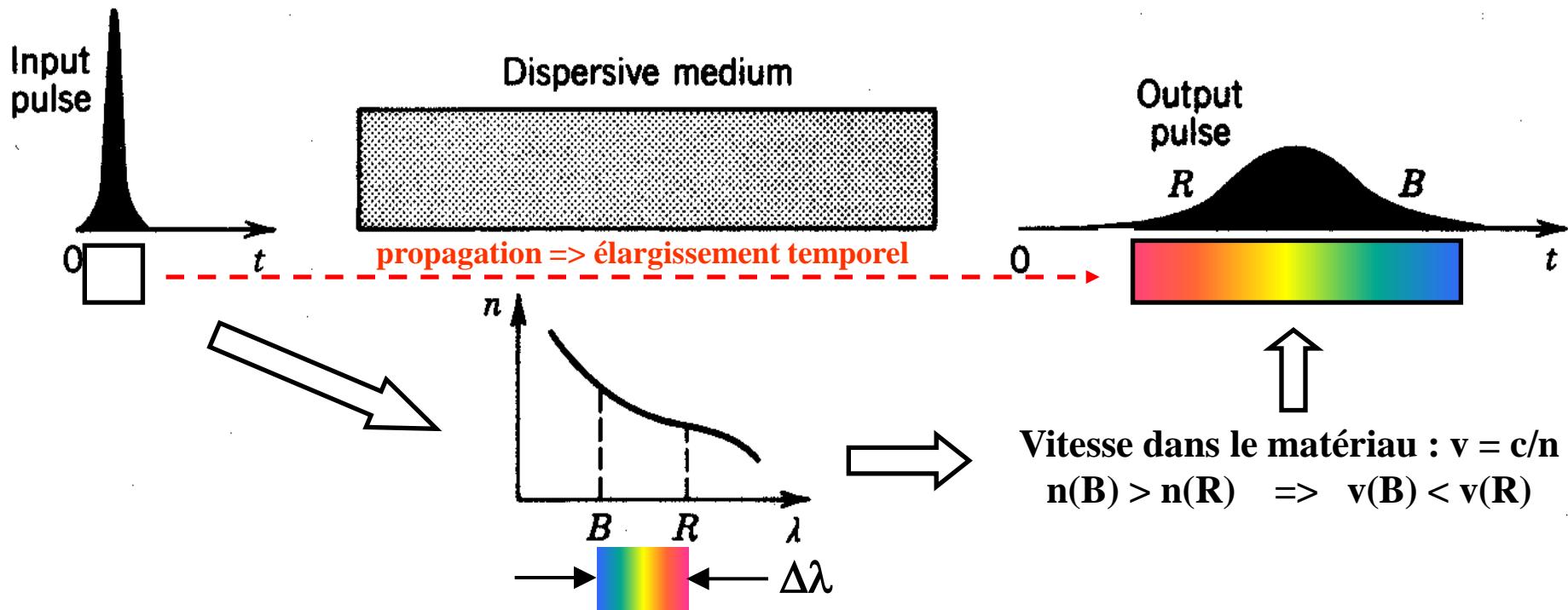


Les fibres optiques **monomodes** permettent de s'affranchir de la dispersion modale

Liaison optique numérique longue distance



Dispersion chromatique (1)



Élargissement temporel : $\Delta\tau$ (ps) = $D_c \cdot L$ (km) . $\Delta\lambda$ (nm)

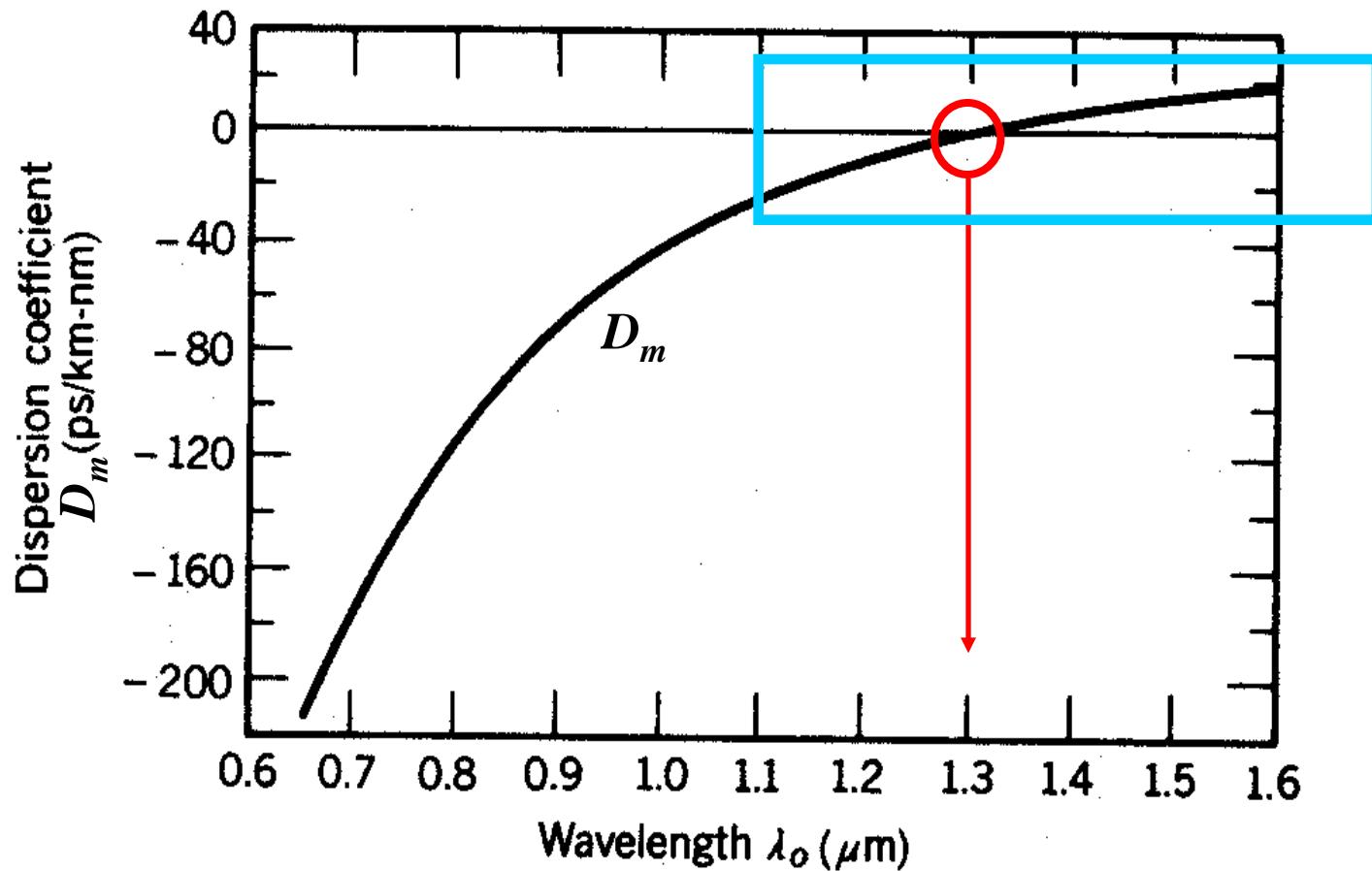
=> Coefficient de dispersion chromatique D_c exprimé en ps/(km.nm)

=> Recherche de fibres optiques monomodes ($D_{mod} = 0$)
à faible coefficient D_c de dispersion chromatique

Dispersion chromatique (2)

$$\Delta\tau (ps) = D_c \cdot L (km) \cdot \Delta\lambda (nm)$$

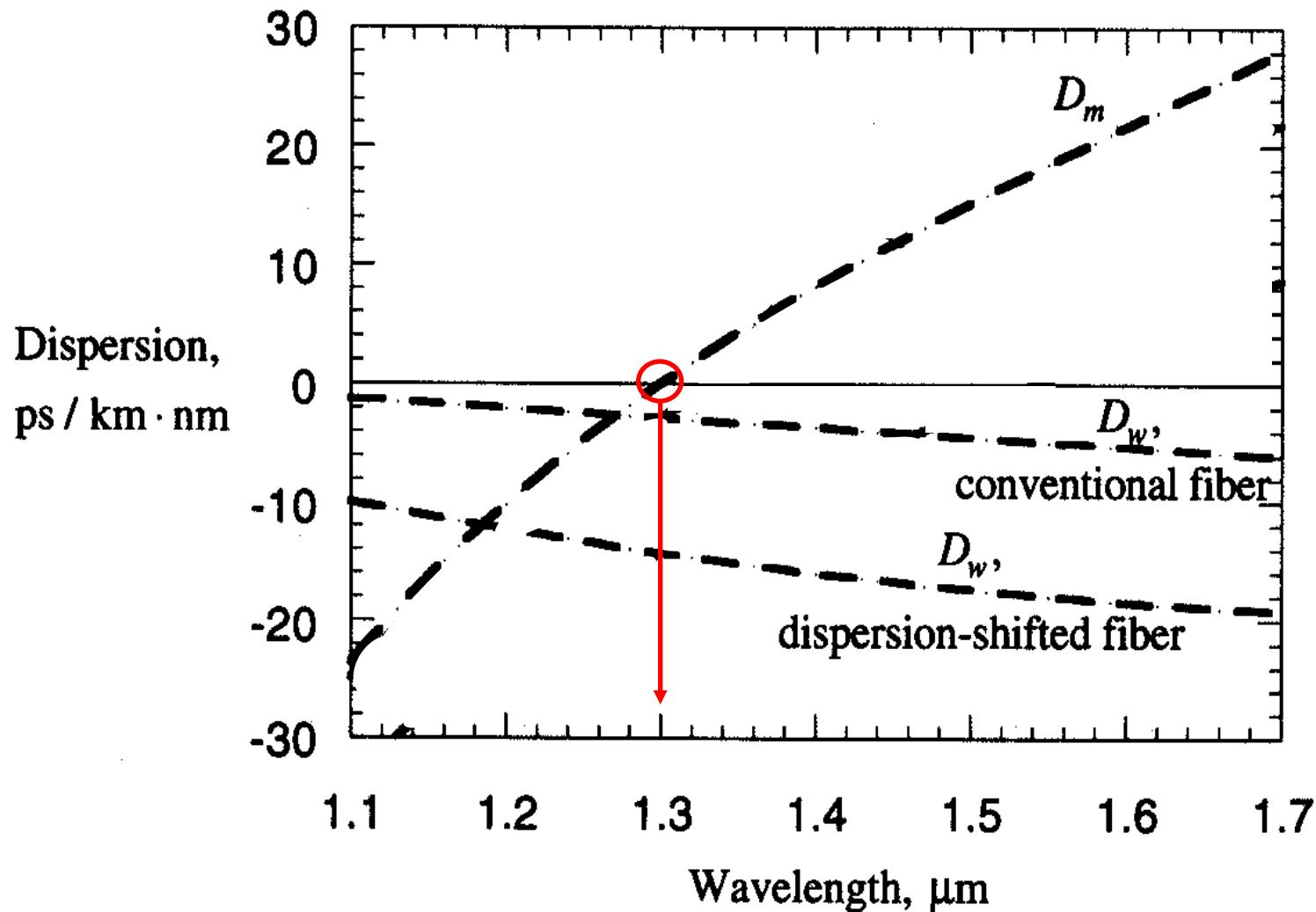
Coefficient de dispersion D_m de la silice en fonction de la longueur d'onde



(D_m = dispersion du matériau)

Dispersion chromatique (4)

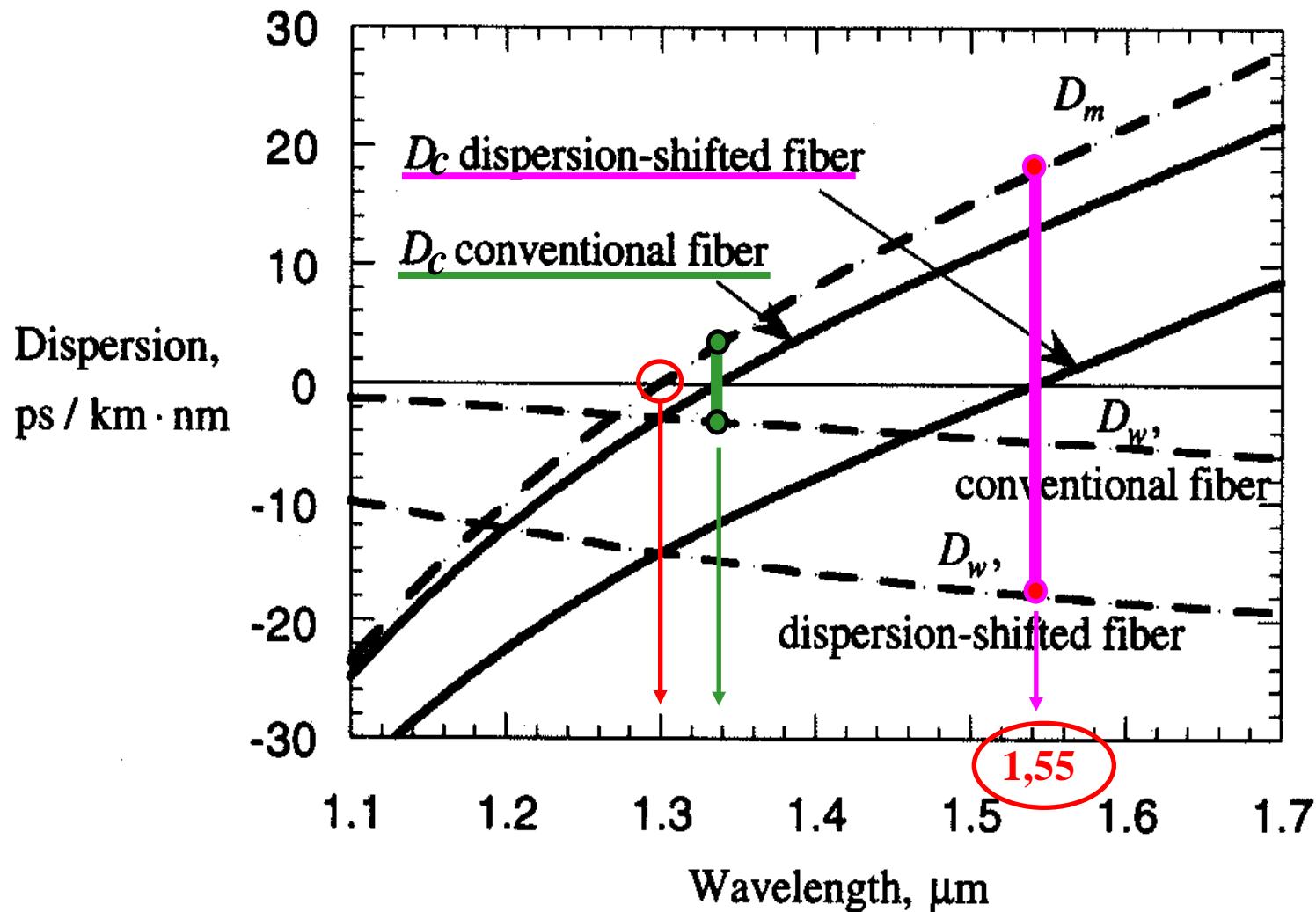
Coefficient de dispersion $D_c = D_m + D_w$ d'une fibre optique en silice



(D_m = dispersion du matériau ; D_w = dispersion du guide ; $D_c = D_m + D_w$ = dispersion totale)

Dispersion chromatique (6)

Coefficient de dispersion $D_c = D_m + D_w$ d'une fibre optique en silice



(D_m = dispersion du matériau ; D_w = dispersion du guide ; $D_c = D_m + D_w$ = dispersion totale)

Dispersion chromatique (7)

Influence du profil d'indice sur le coefficient de dispersion D_c d'une fibre

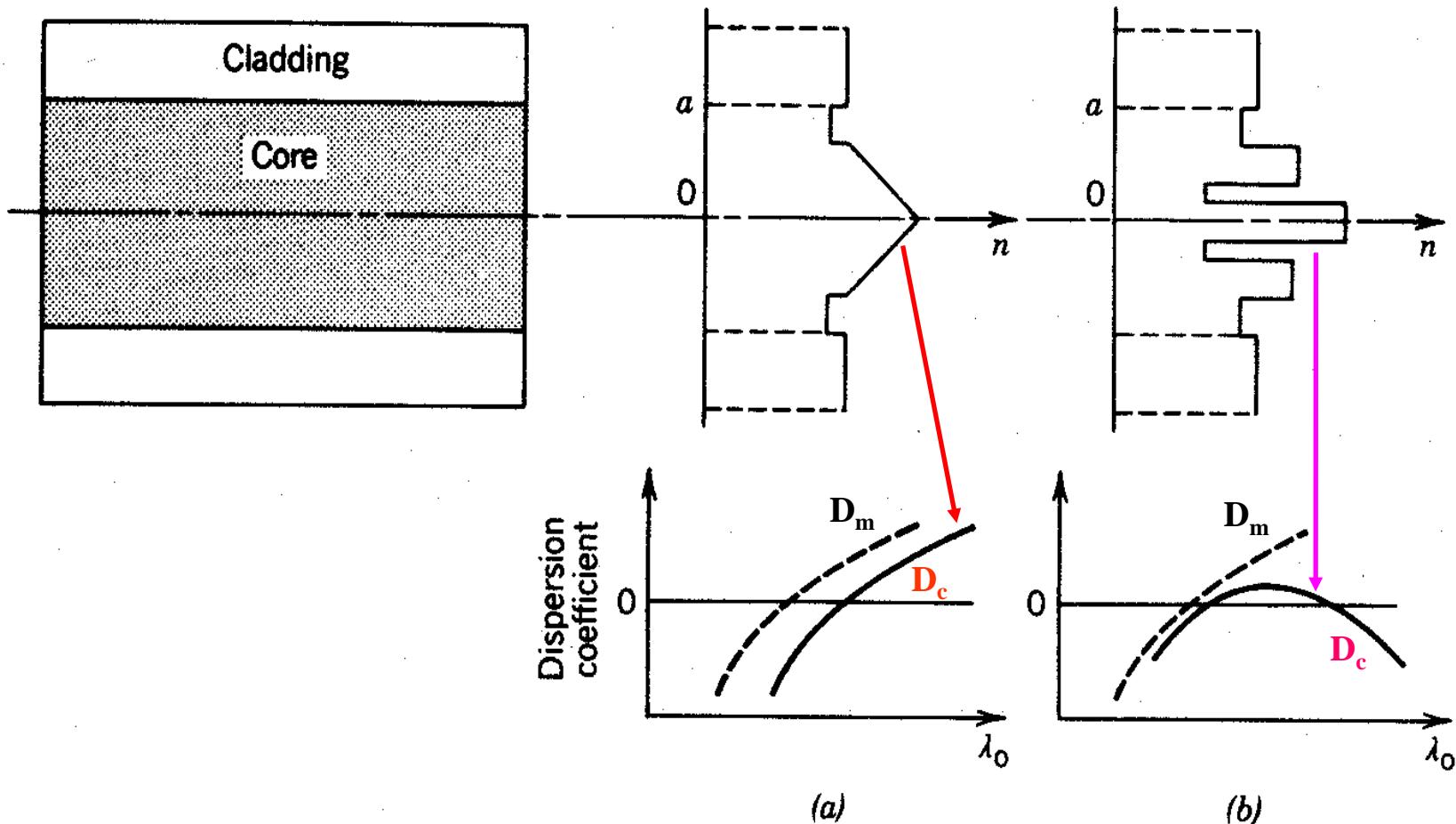
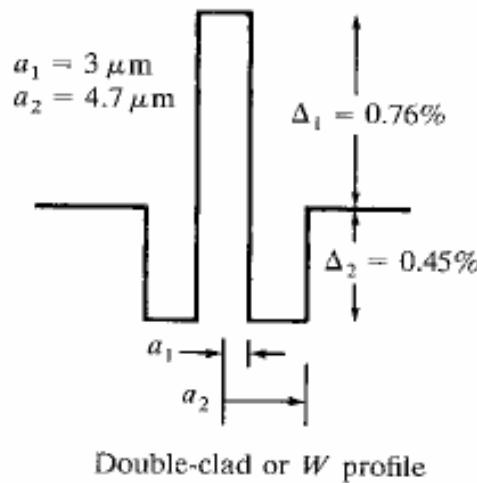


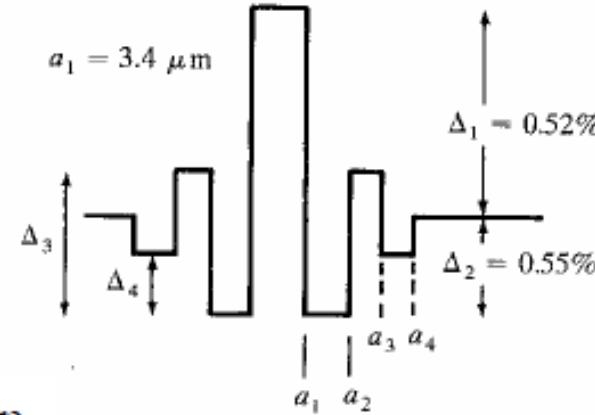
Figure 8.3-6 Refractive-index profiles and schematic wavelength dependences of the material dispersion coefficient (dashed curves) and the combined material and waveguide dispersion coefficients (solid curves) for (a) dispersion-shifted and (b) dispersion-flattened fibers.

Dispersion chromatique (8)

Quelques exemples de profils d'indice

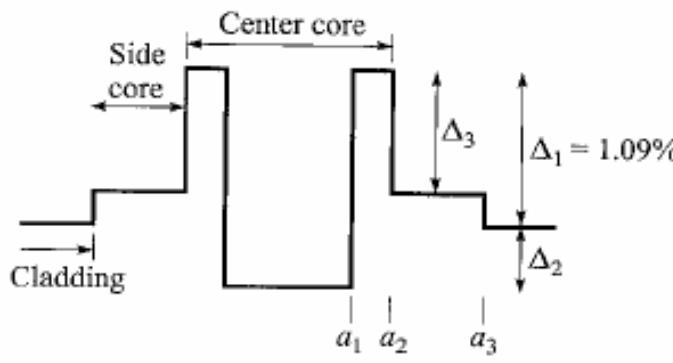


Double-clad or *W* profile

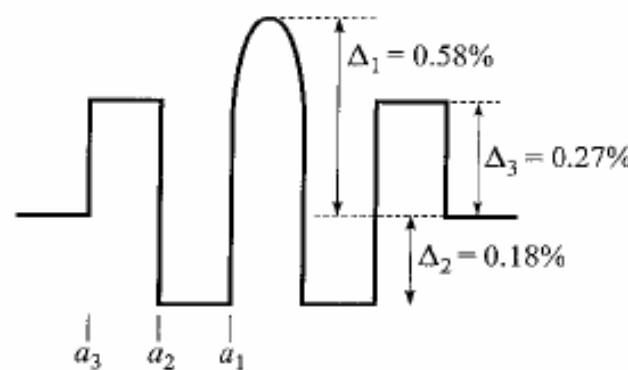


Quadruple-clad profile

Dispersion
Flattened

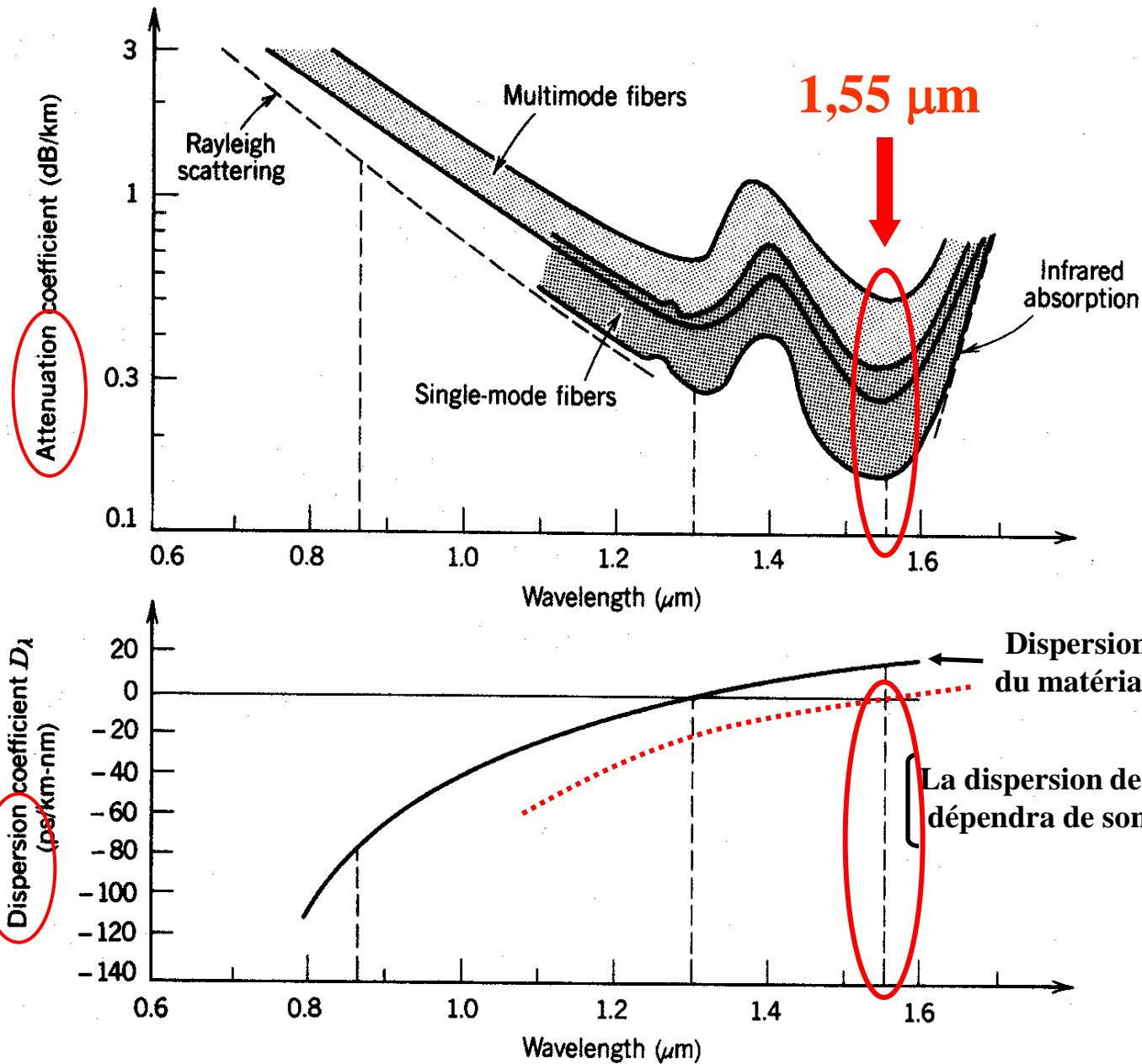


Large area dispersion shifted

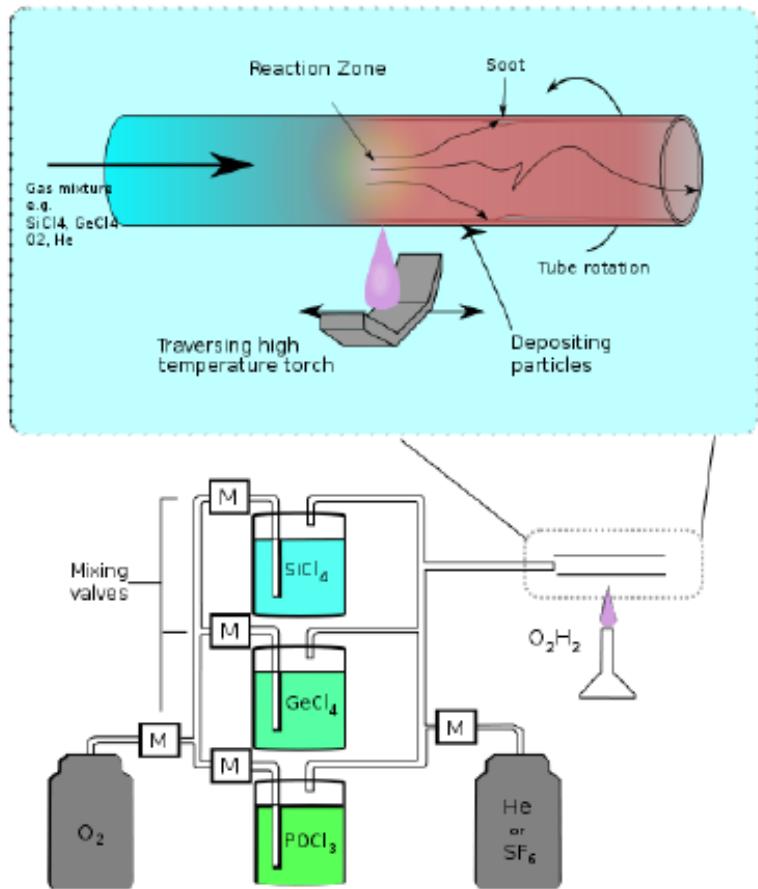


Large area dispersion flattened

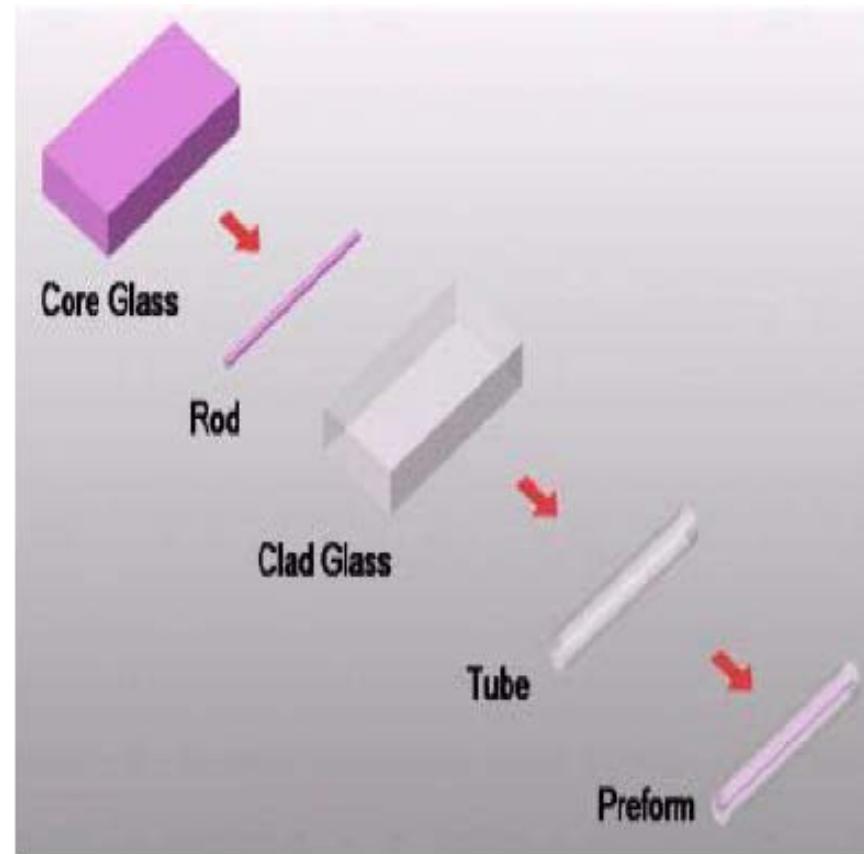
Récapitulatif : atténuation et dispersion pour une fibre de silice



Fabrication d'une fibre optique (1)

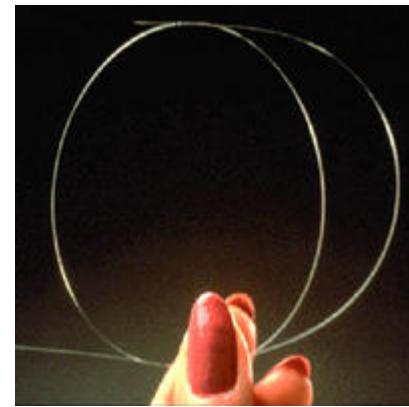
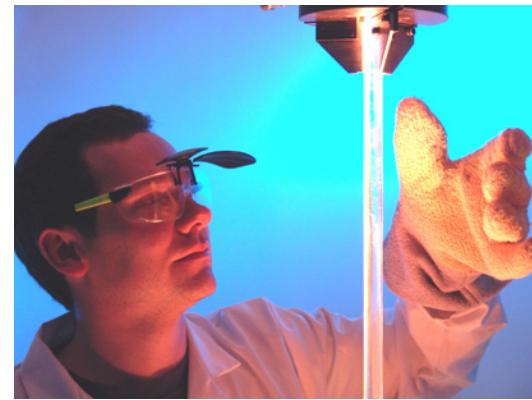
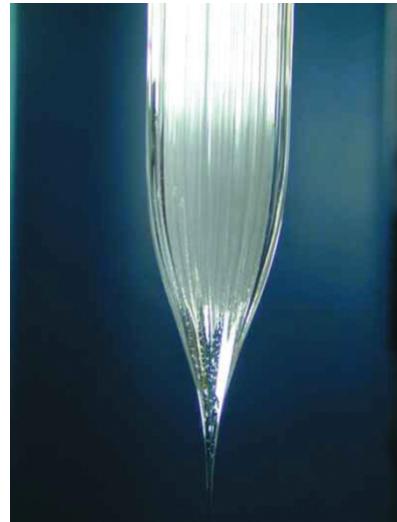
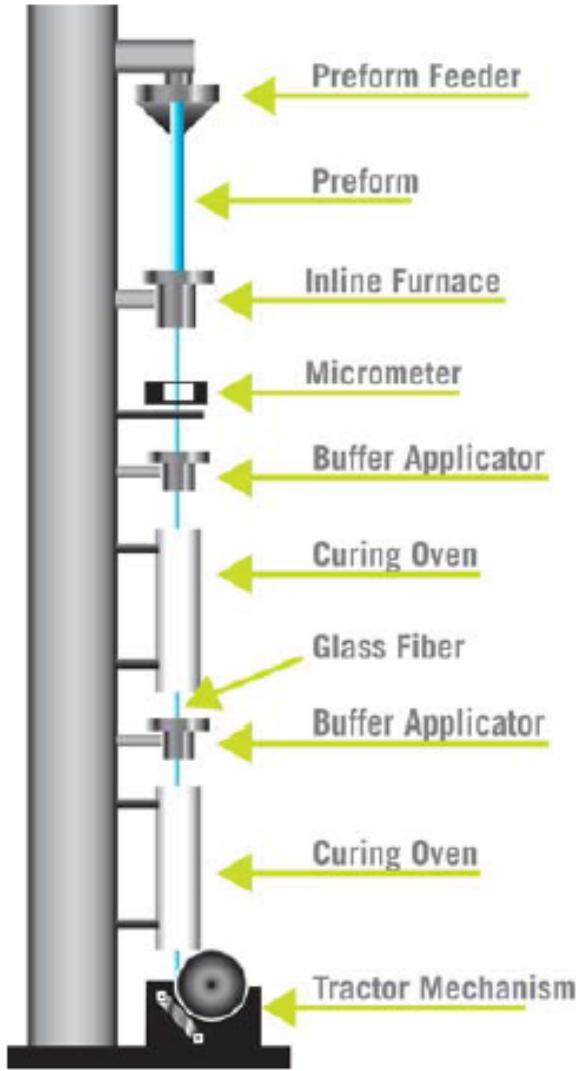


Modified chemical vapor deposition method

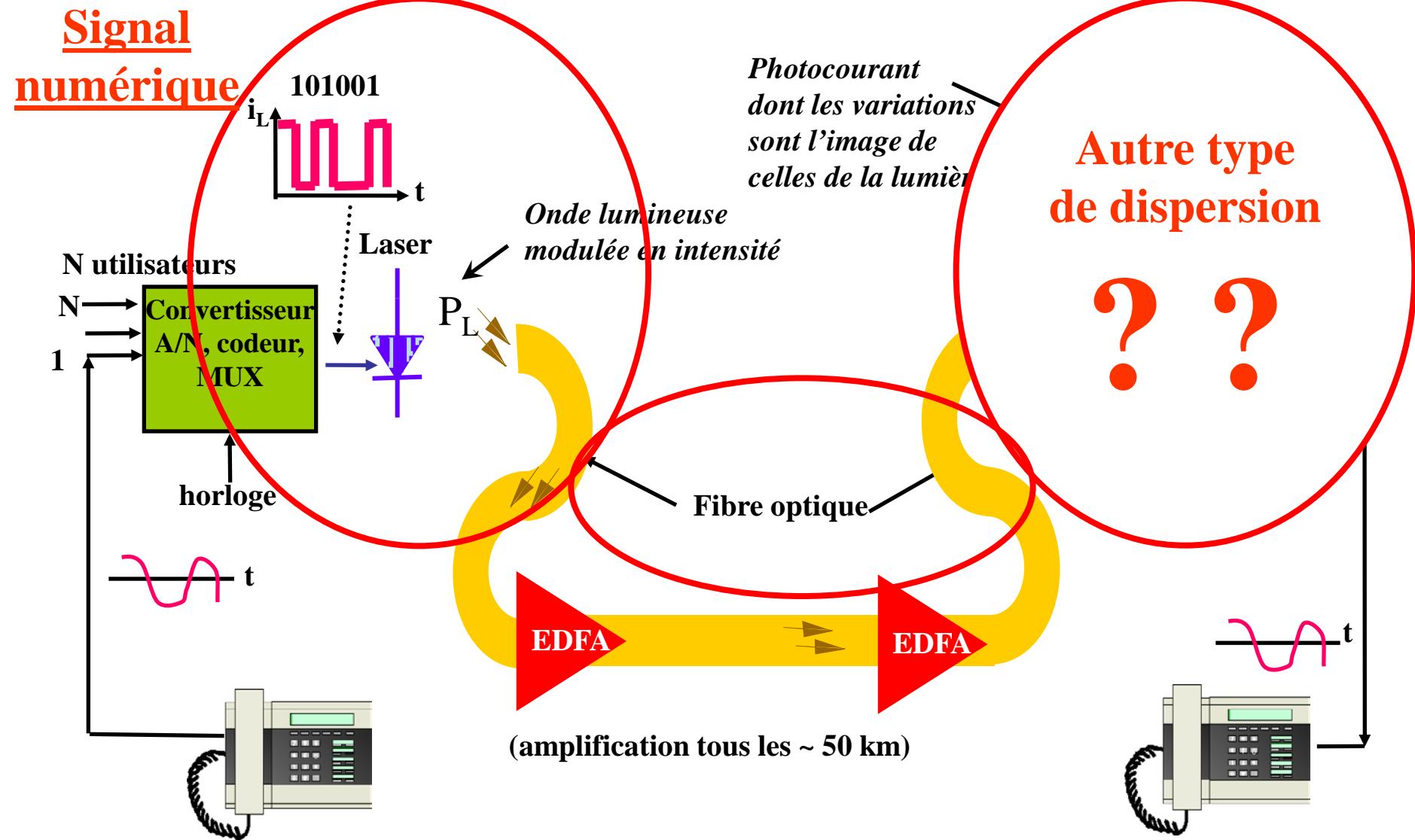


Rod-in-tube method: UoA

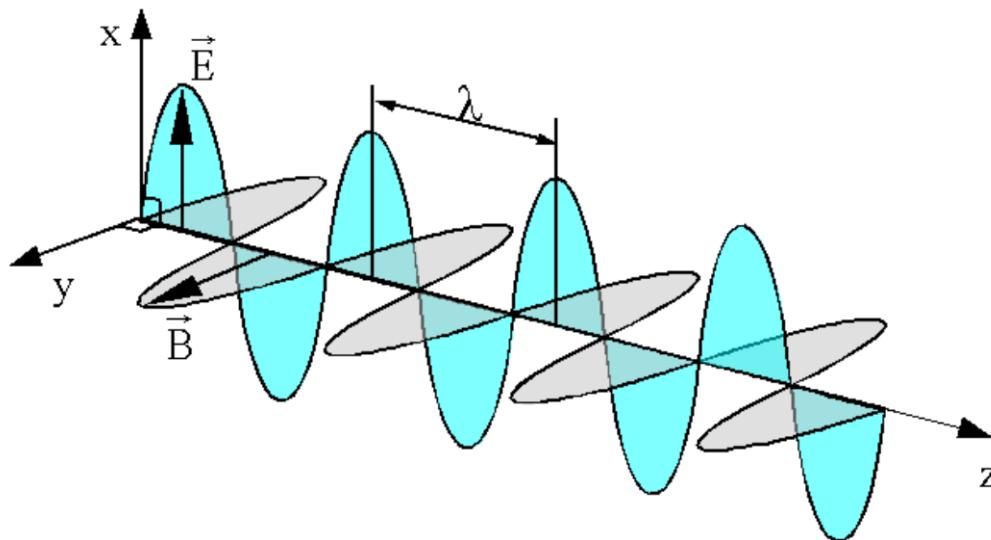
Fabrication d'une fibre optique (2)



Liaison optique numérique longue distance



RAPPEL : Polarisation d'une onde



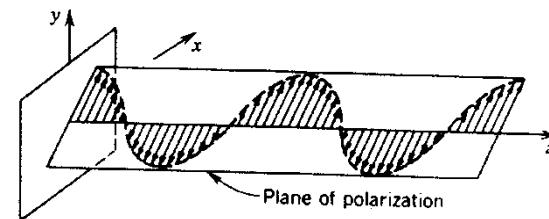
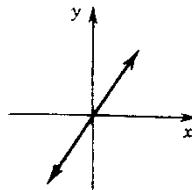
Polarisation d'une onde électromagnétique



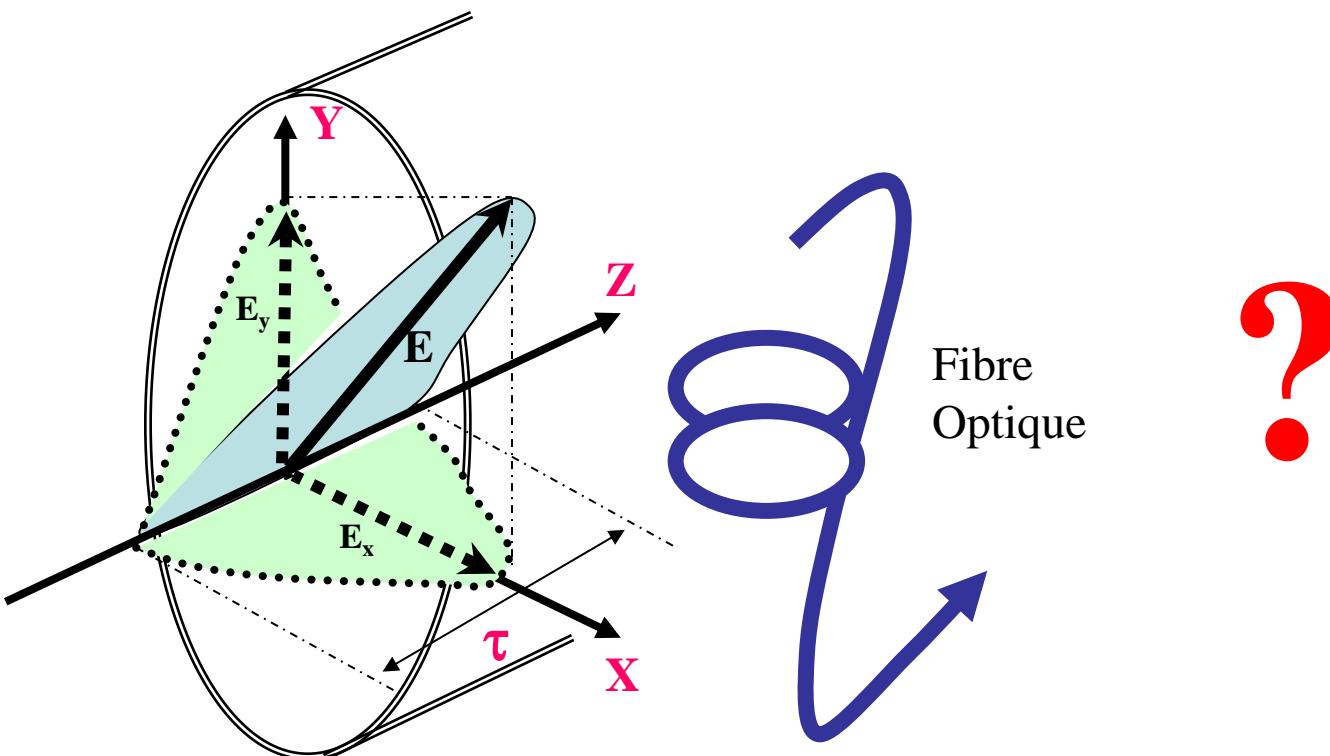
Direction du champ E

(Champ E : principal responsable des interactions avec la matière)

Exemple de la
polarisation linéaire



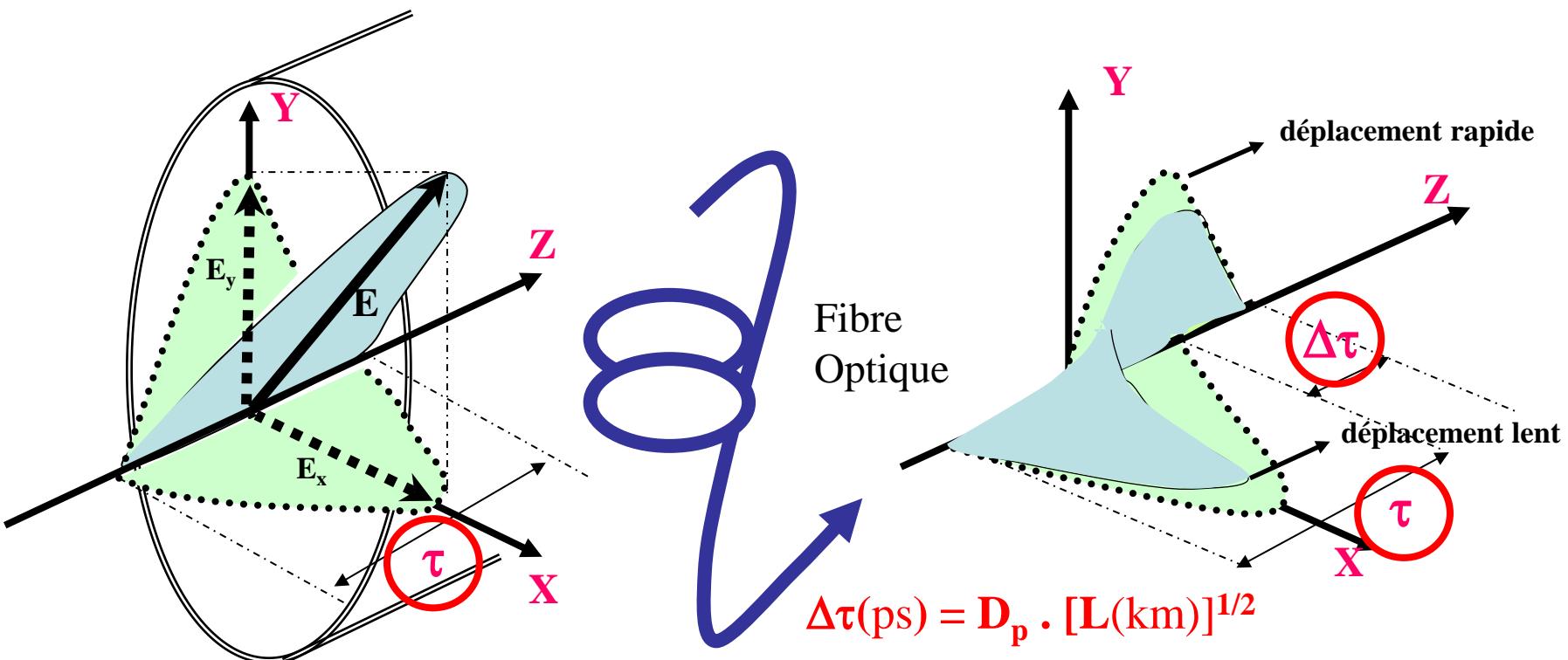
Dispersion de polarisation (1)



Supposons le signal transporté par la fibre polarisé linéairement : il existe des composantes des champs selon X et Y.

Si au cours du trajet dans la fibre, ces deux composantes transitent à des vitesses différentes (sur le schéma la vitesse de E_y est supposée supérieure à celle de E_x) => à la sortie de la fibre, la reconstitution correspond à une impulsion élargie de $\Delta\tau$: c'est la dispersion de polarisation.

Dispersion de polarisation (2)

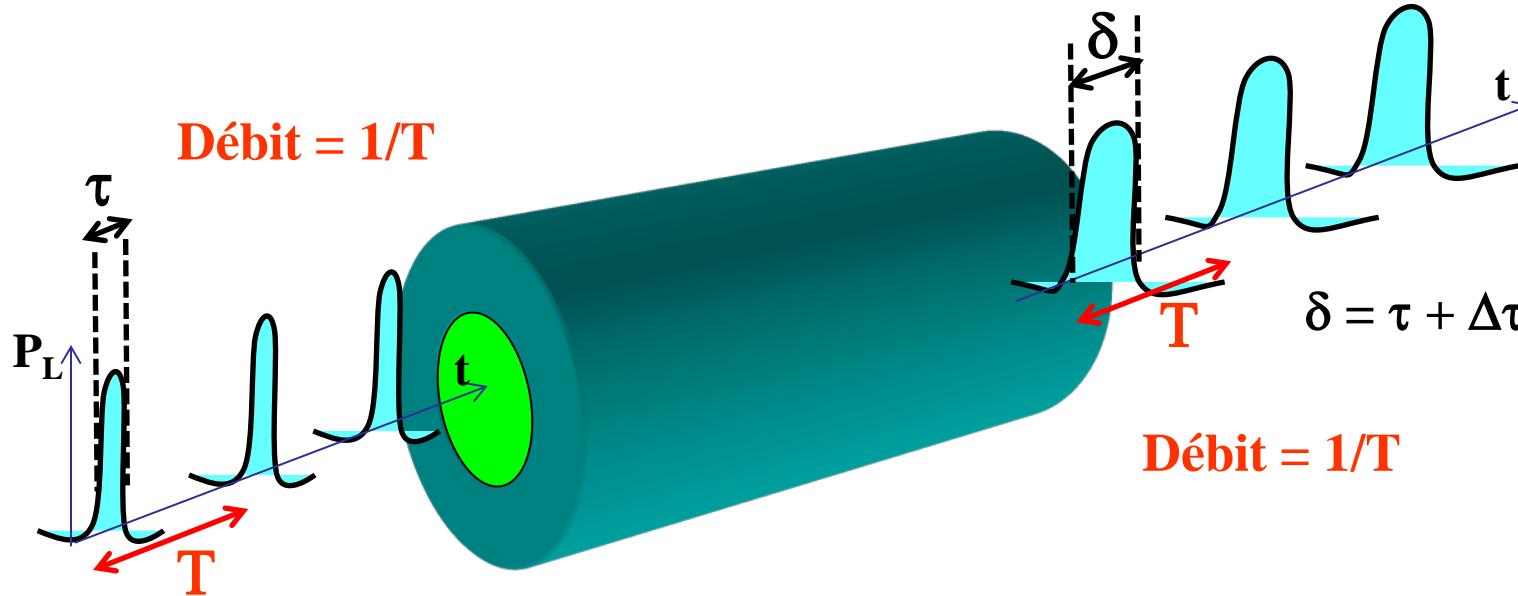


Le coefficient de dispersion de polarisation (D_p) est de l'ordre de 1 ps/(km) $^{1/2}$ pour les fibres actuelles.

Sur 100 km (distance typique entre répéteurs), l'élargissement temporel ($\Delta\tau$) est donc de 10 ps. Pour une transmission à 5 Gbit/s, la durée de chaque impulsion est approximativement de 100 ps et cette dispersion n'est pas trop gênante.

Par contre, pour un débit de 40 Gbit/s (impulsion d'environ 15 ps), le problème devient sérieux.

Récapitulatif sur la dispersion



Pour augmenter le débit de l'émetteur, il faut réduire T (en conservant $T > \tau$)

En pratique : $T \approx 2\tau \Rightarrow$ Débit maximum de l'émetteur : $B_0 \approx 1/(2\tau)$

Cependant, il intervient un élargissement $\Delta\tau$ des impulsions du à la dispersion et leur durée devient : $\delta > \tau \Rightarrow$ Débit maximum de la liaison : $B \approx 1/(2\delta) < B_0$

L'augmentation de la durée des impulsions, et donc l'augmentation de T qui devient nécessaire pour que les données restent récupérables, conduit à une diminution du débit maximum \Rightarrow c'est une conséquence de la DISPERSION.

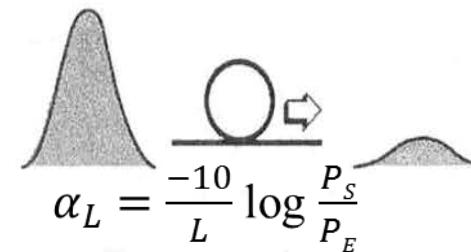
Récapitulatif des caractéristiques essentielles d'une Fibre optique **MONOMODE**

$$D_{\text{mod}} = 0$$

$$\Delta\tau = D_{\text{mod}} \cdot L$$

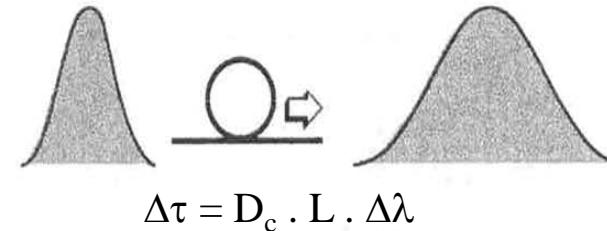
▼ Absorption de la fibre

$$\alpha_L \approx 0,2 \text{ dB/km} @ 1,55 \mu\text{m}$$



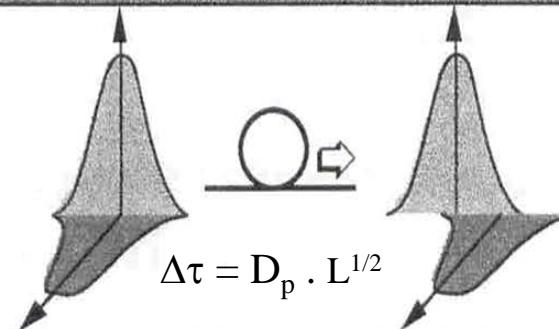
▼ Dispersion chromatique

$$D_c \approx \text{quelques ps/(km.nm)}$$



▼ Dispersion de polarisation

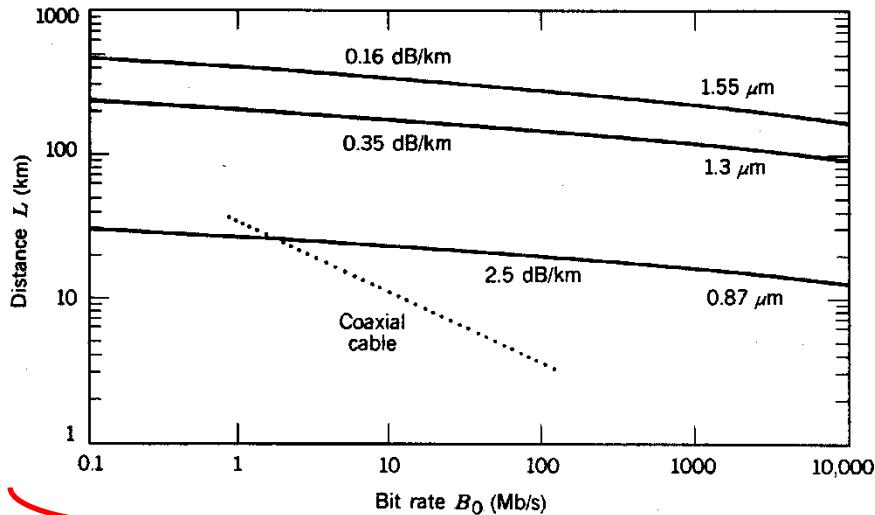
$$D_p \approx 1 \text{ ps/(km)}^{1/2}$$



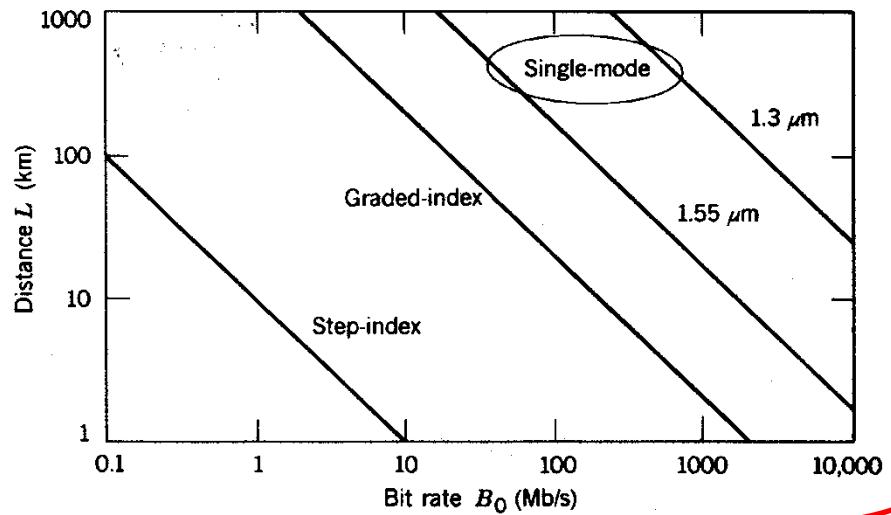
Bilan de liaison (4)

Bilan complet de liaison (atténuation + dispersion)

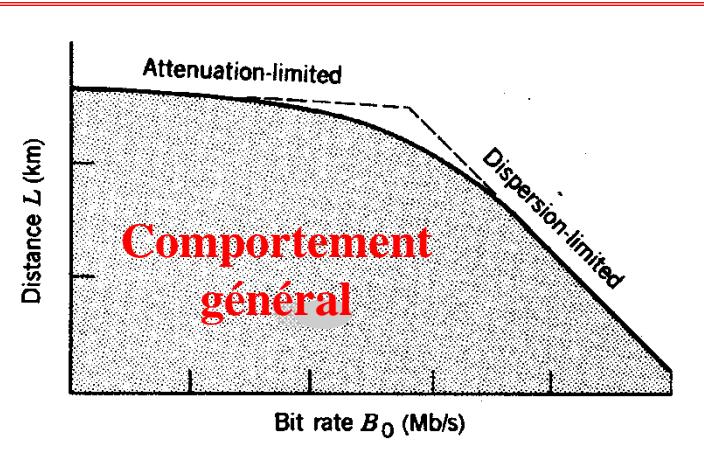
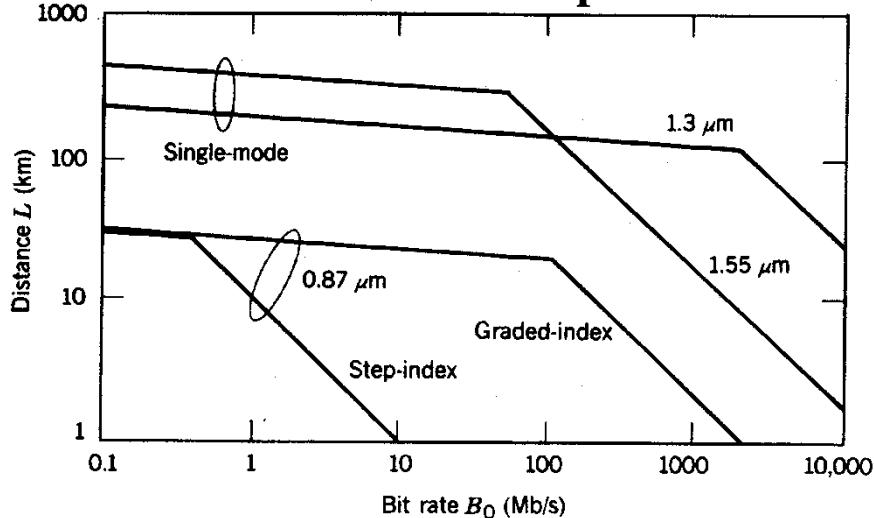
Atténuation



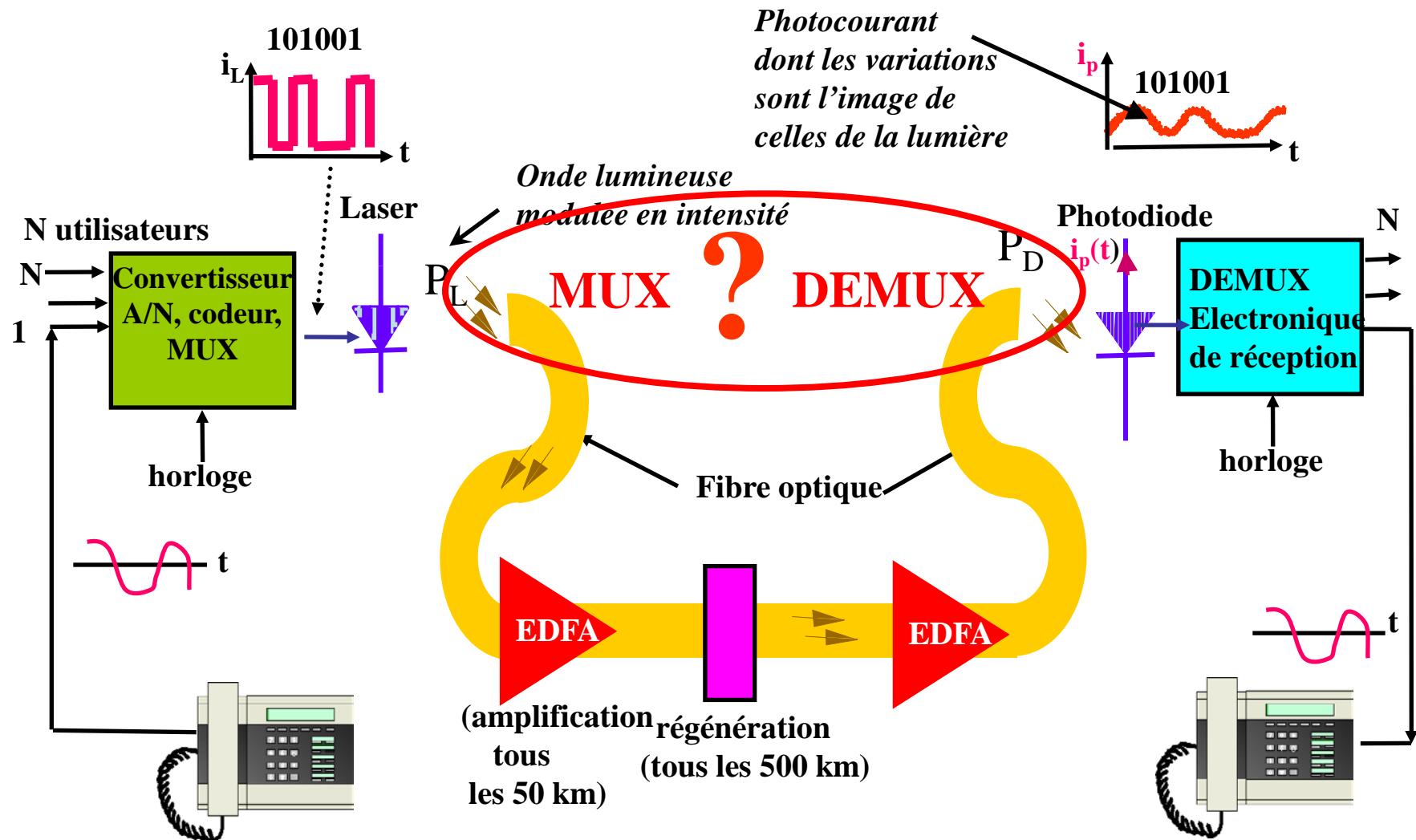
Dispersion



Atténuation + Dispersion

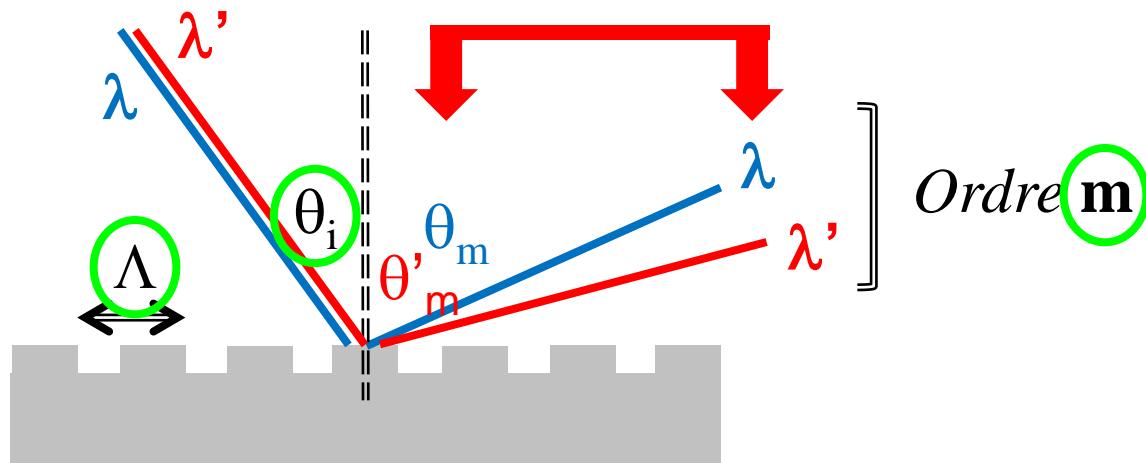


Synoptique d'une liaison optique numérique longue distance



RAPPEL

Réseaux de diffraction



Relation fondamentale des réseaux : (milieu unique d'indice $n \Rightarrow \lambda = \lambda_0/n$)

$$\Lambda(\sin \theta_i \pm \sin \theta_m) = m\lambda$$

Λ = pas du réseau

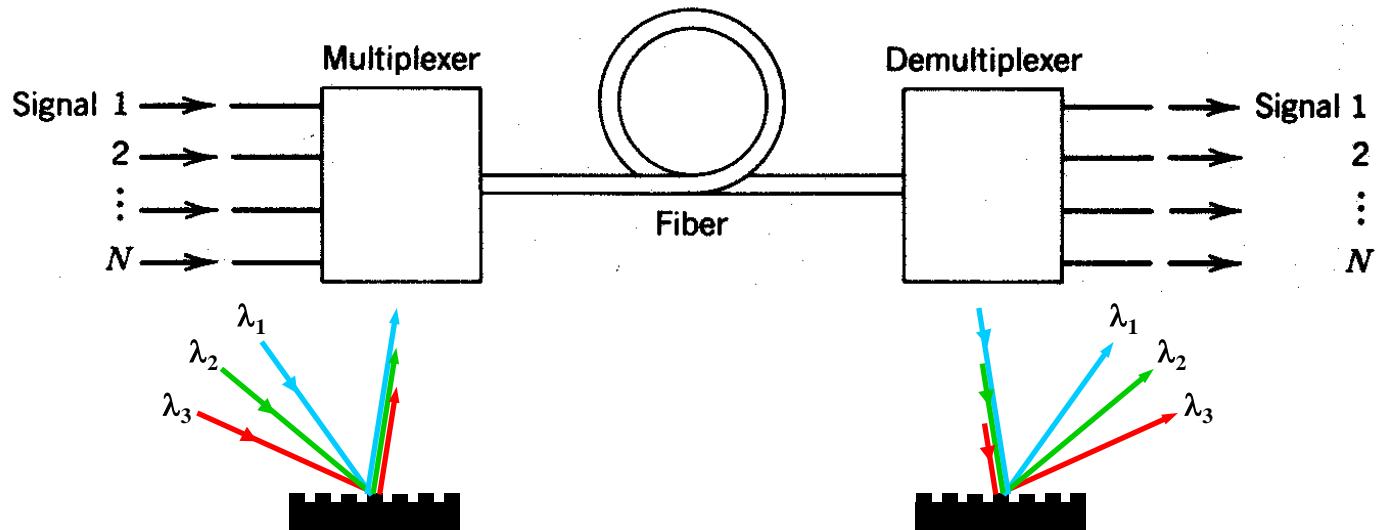
θ_i = angle d'incidence

θ_m = angle de diffraction du faisceau d'ordre m

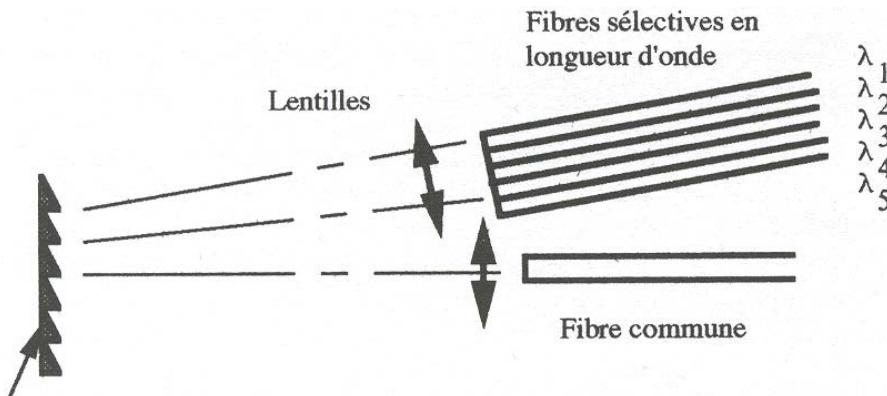
m = ordre de diffraction (entier)

Multiplexage en longueur d'onde

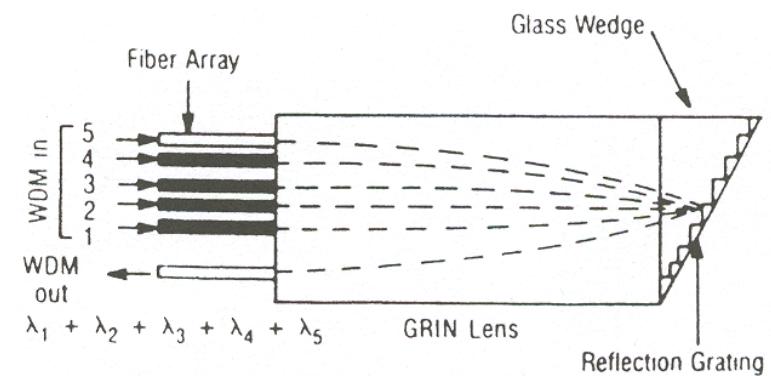
(WDM : Wavelength Division Multiplexing)



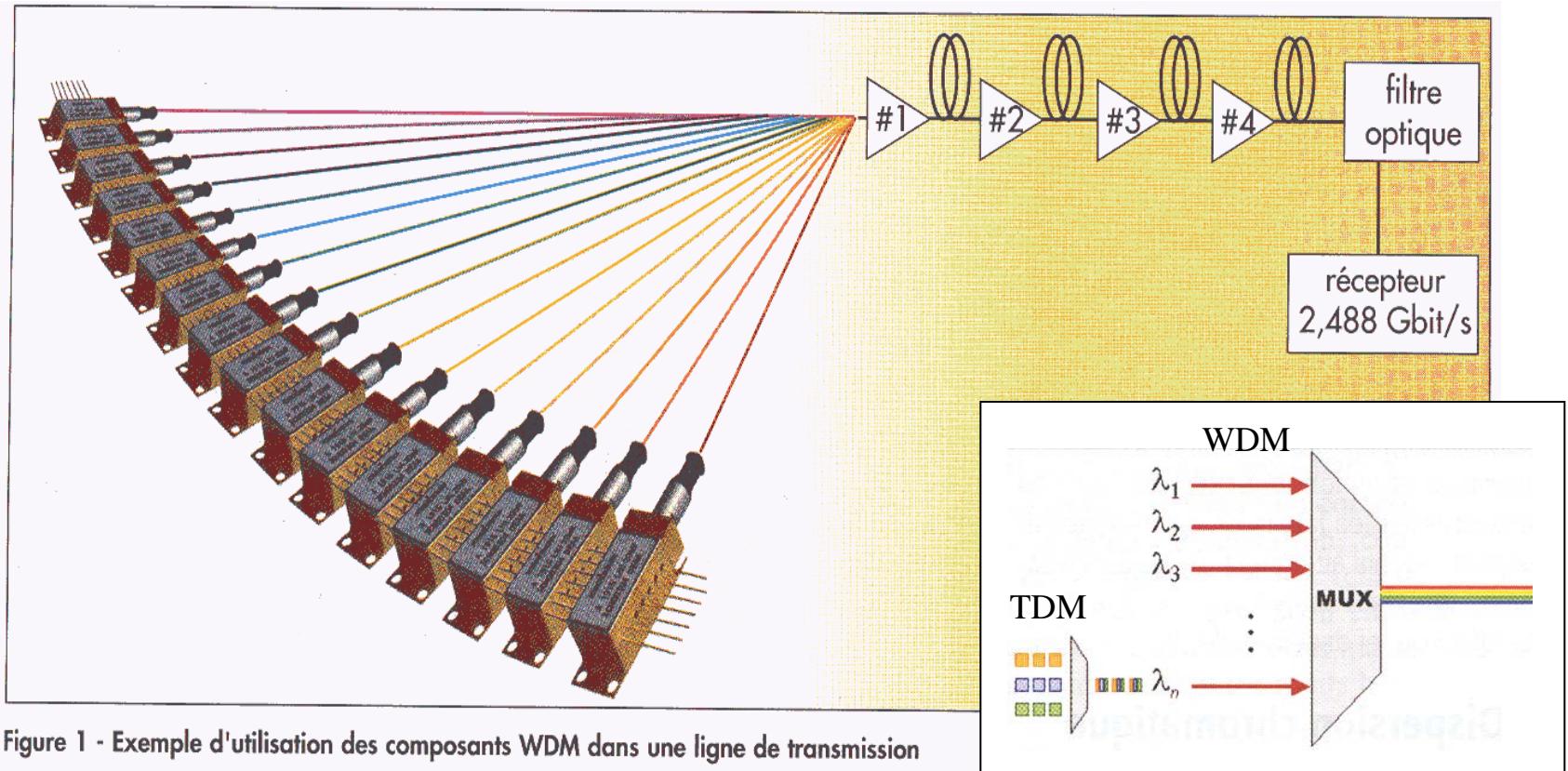
Exemples de MUX / DEMUX



Réseau de diffraction



Multiplexage de 16 longueurs d'onde



Espacement $\Delta\lambda$ des longueurs d'onde au voisinage de 1550 nm :

$$\Delta\nu = 100 \text{ GHz} \Leftrightarrow \Delta\lambda = 0,8 \text{ nm}$$

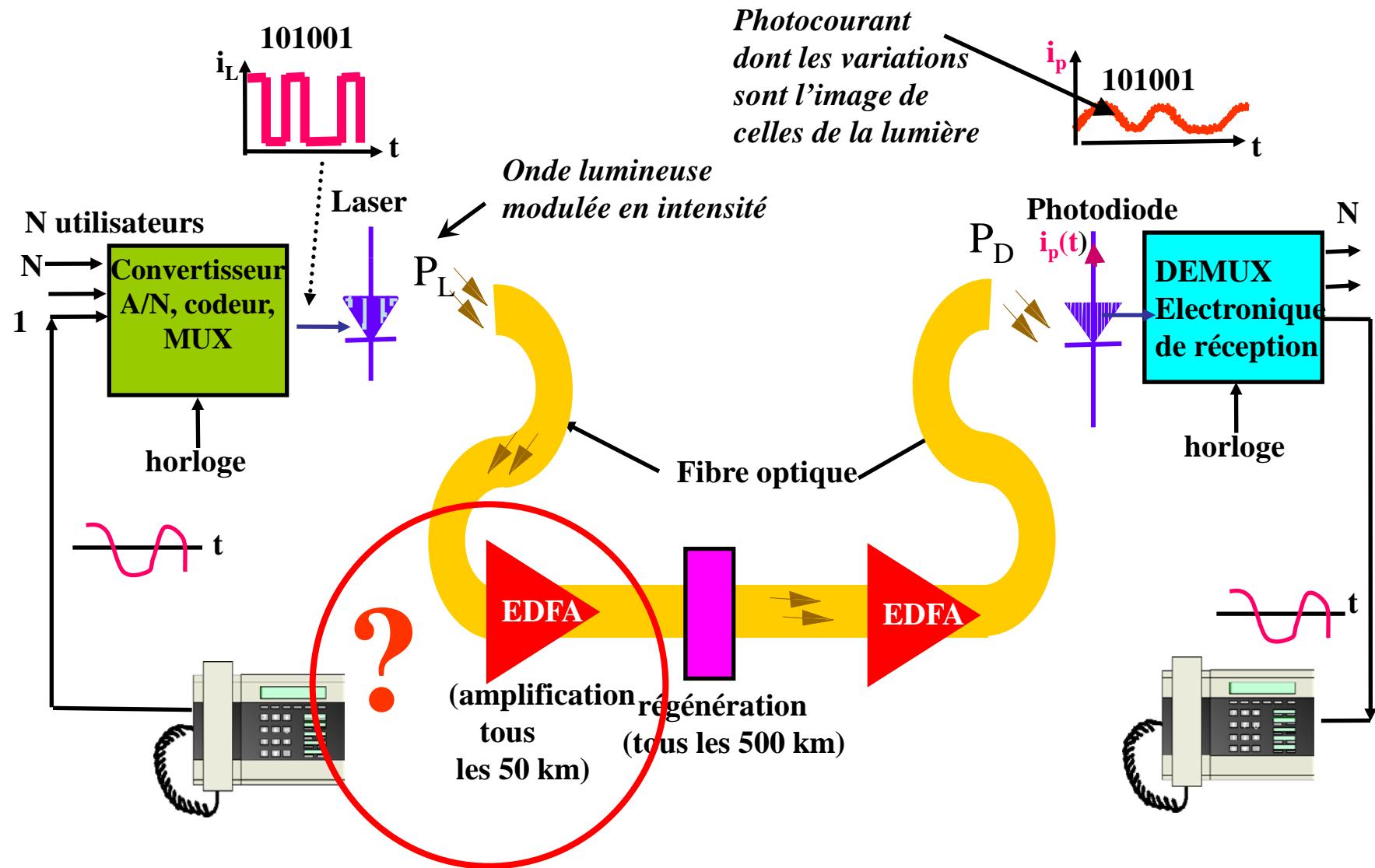
$$\Delta\nu = 50 \text{ GHz} \Leftrightarrow \Delta\lambda = 0,4 \text{ nm}$$

$$\Delta\nu = 31 \text{ GHz} \Leftrightarrow \Delta\lambda = 0,25 \text{ nm}$$

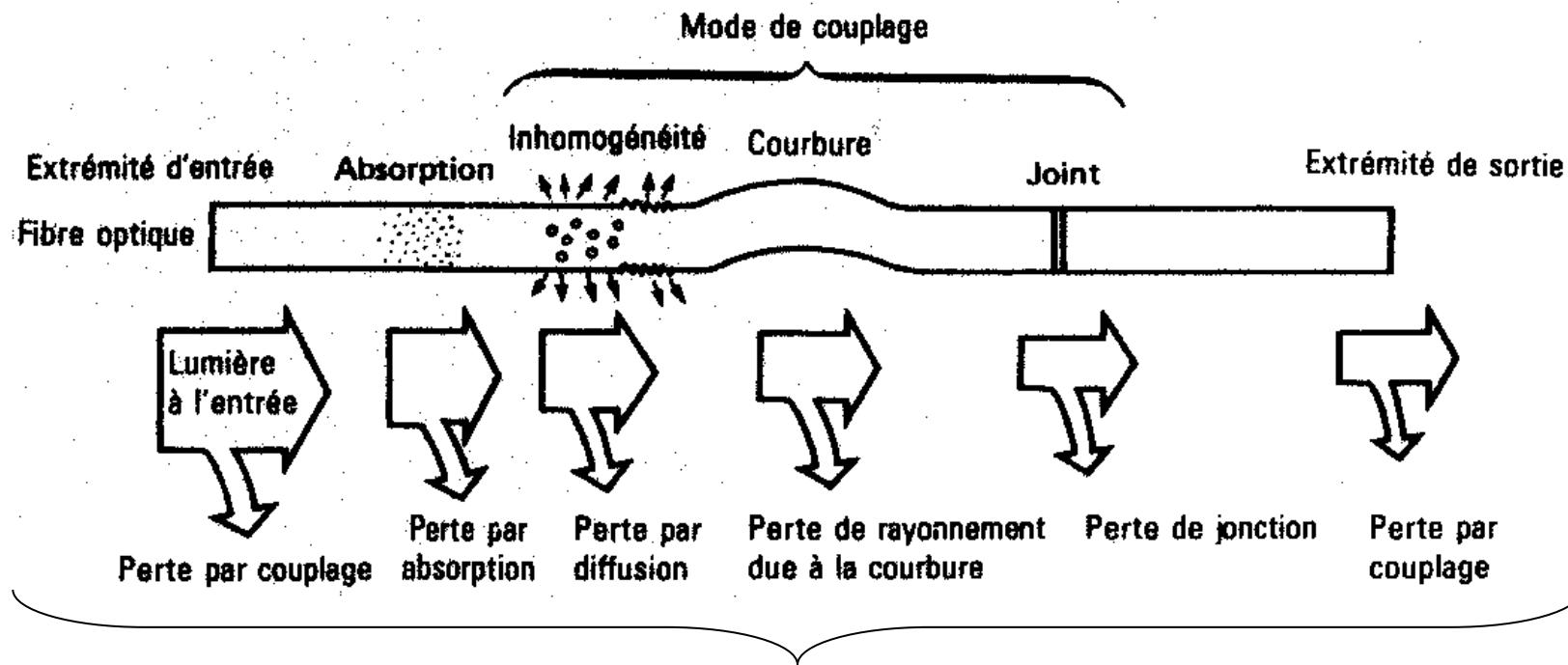
Record (07) : 160 canaux, chacun modulé à 80 Gbit/s, transmis sur 2550 km donc 12.8 Tbit/s.

Actuellement, les liaisons comportent 4 à 10 canaux à 10 Gbit/s.

Synoptique d'une liaison optique numérique longue distance



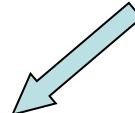
Régénération de signaux (1)



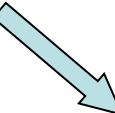
Recherche d'un système amplificateur



2 solutions



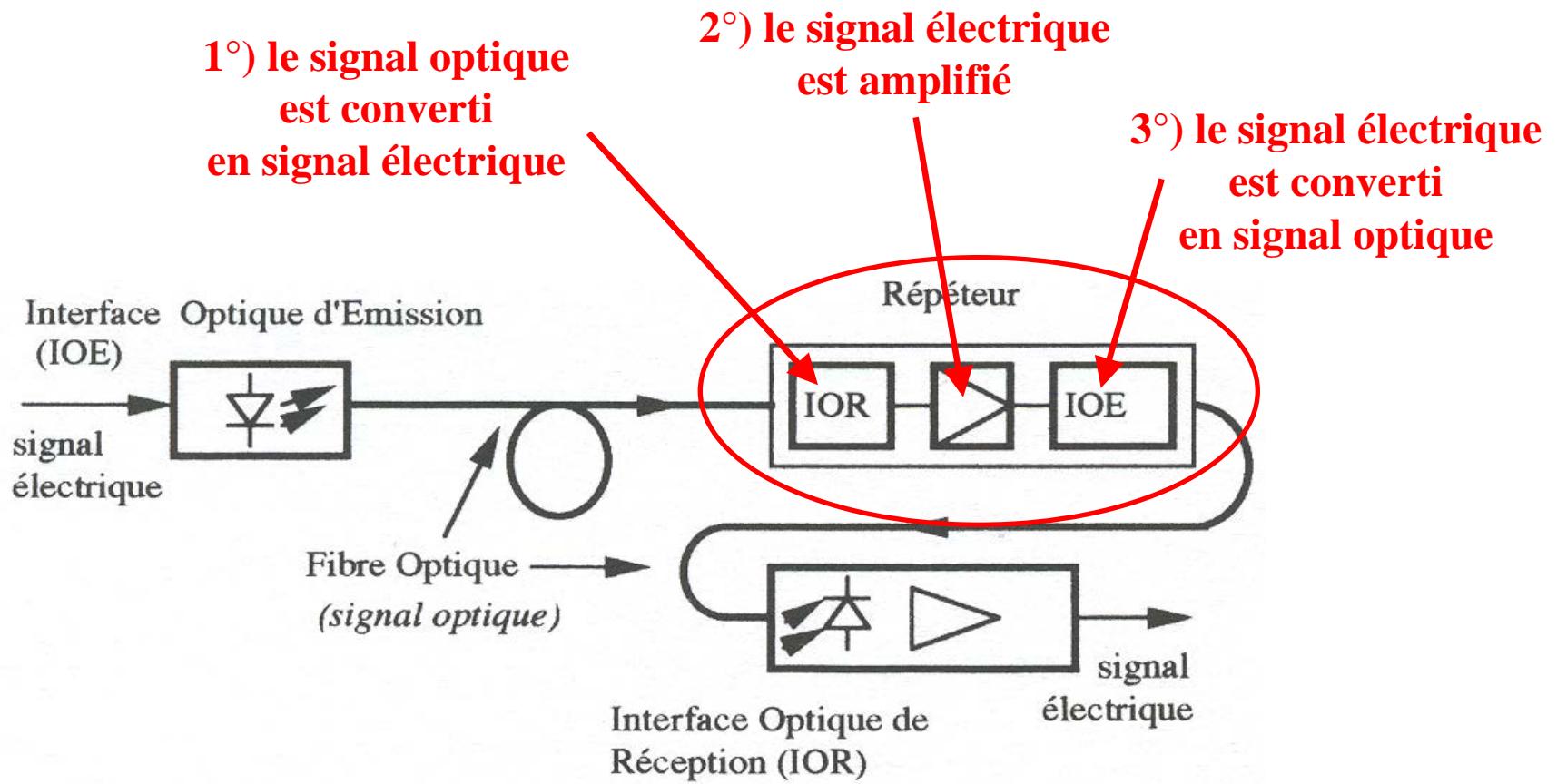
Double conversion
(historique)



Amplification optique
(actuel)

Régénération de signaux (2)

Double conversion : utilisation de convertisseurs O/E et E/O (historique)

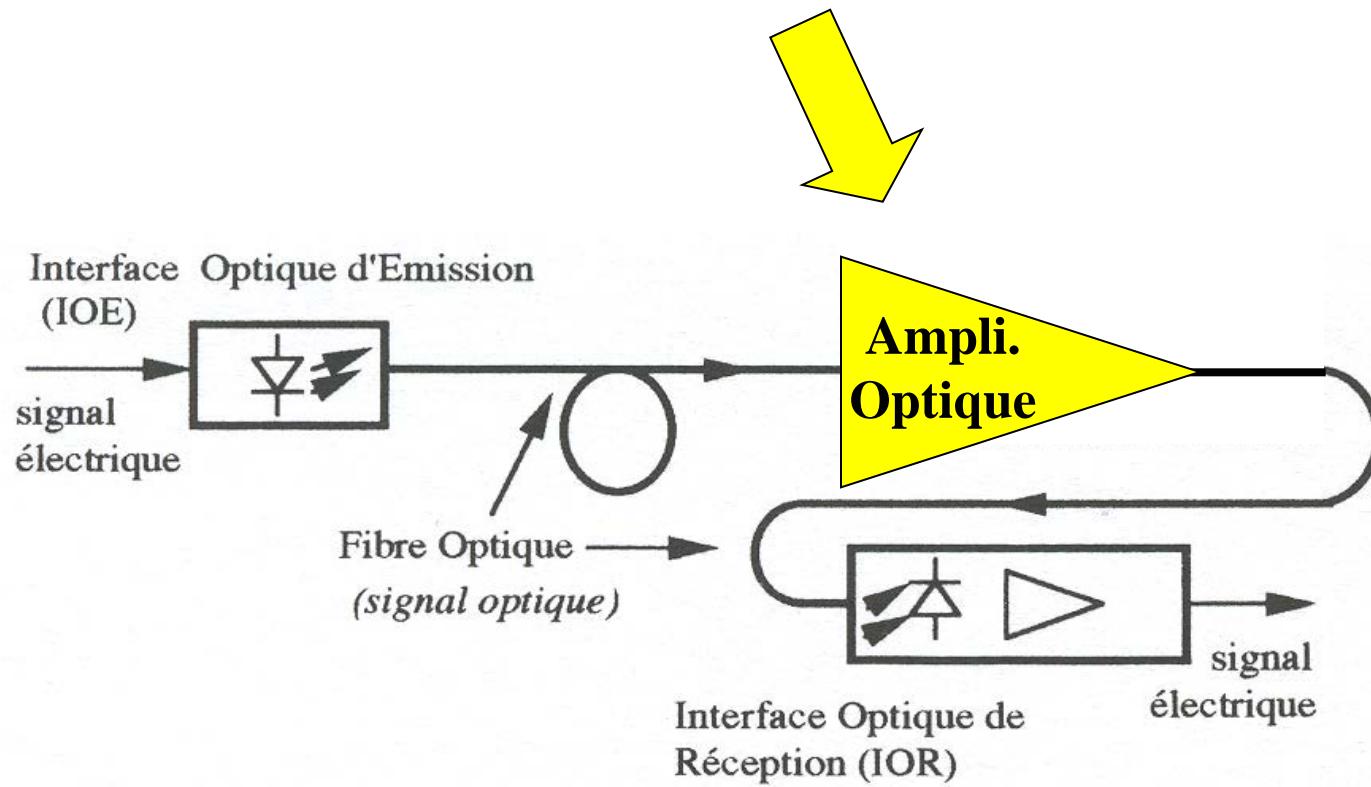


$$\text{Gain} = 40 \text{ à } 50 \text{ dB} \quad ; \quad P_o (\text{sortie}) < 10 \text{ dBm}$$

Limitation : amplification d'une seule λ

Régénération de signaux (3)

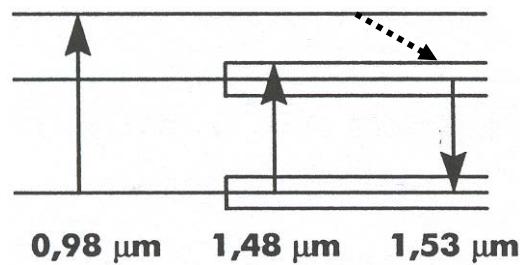
Amplification tout optique depuis 1995



Régénération de signaux (3)

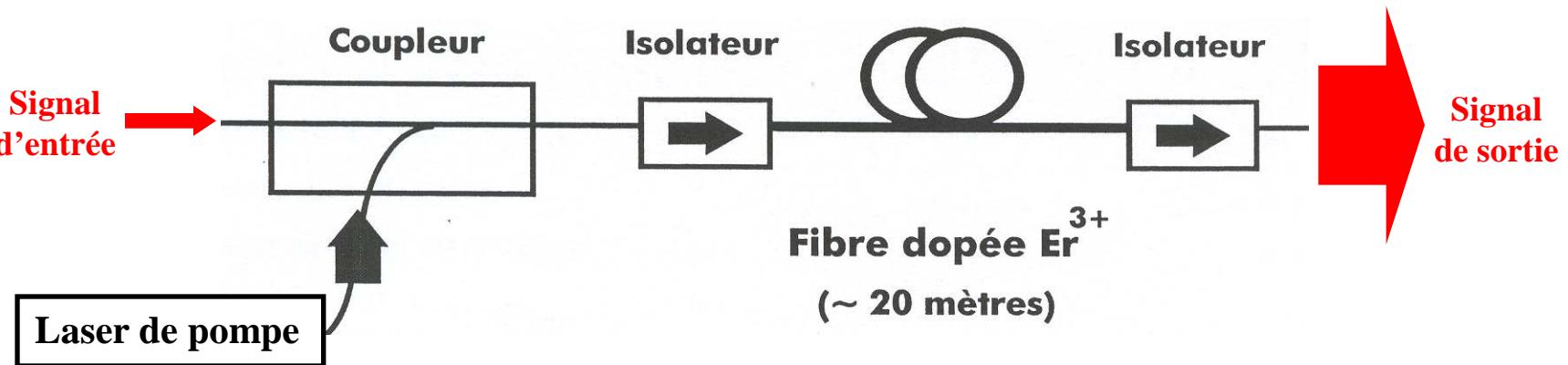
Amplification optique : utilisation de fibres dopées Erbium (pour $\lambda_0 \sim 1550$ nm)

Niveaux d'énergie de l'Erbium
dans une matrice de silice



- ➡ Deux raies de pompage optique : 0,98 μm et 1,48 μm
- ➡ Er présente des recombinaisons radiatives autour de 1,53 μm

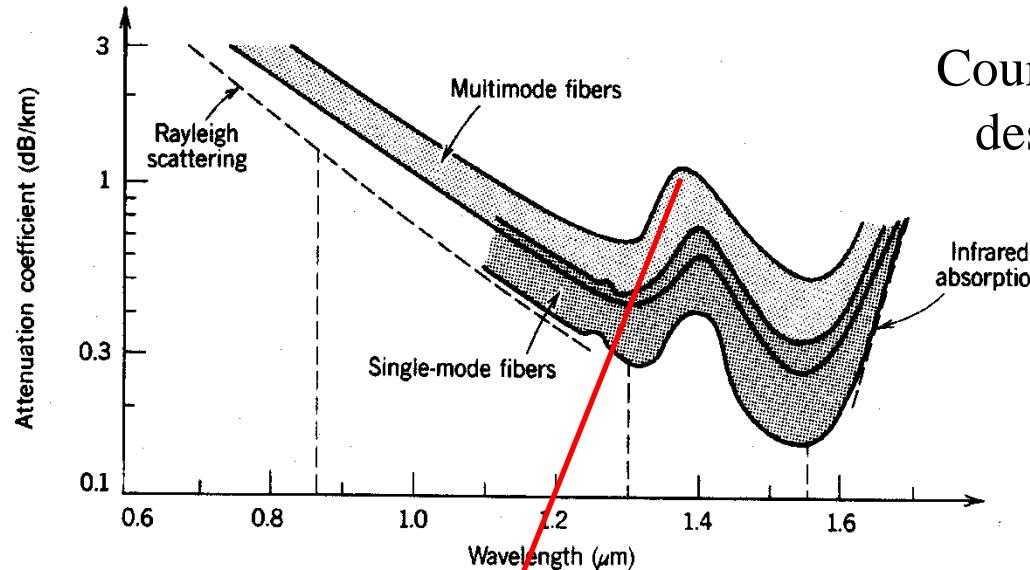
Schéma d'un amplificateur à fibre dopée Erbium



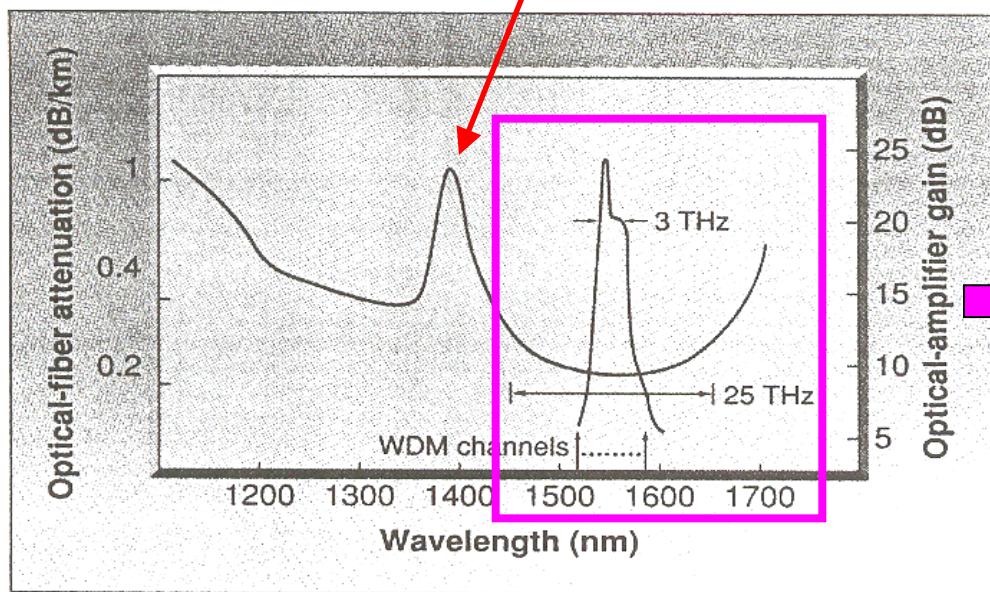
Gain = 30 à 40 dB ; P_o (sortie) ~ 20 dBm

Avantage : amplification simultanée de plusieurs λ voisines de 1,5 μm

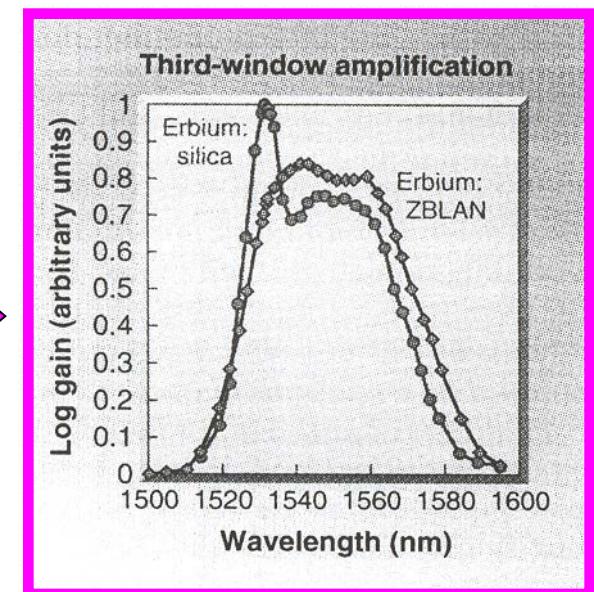
Les EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier)



Courbes d'atténuation
des fibres de silice

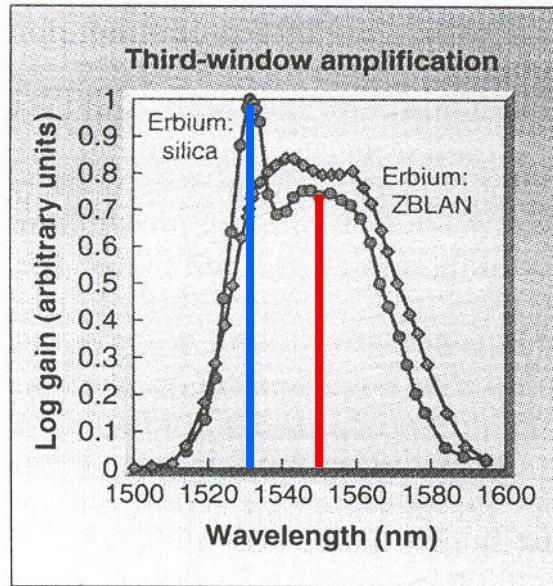
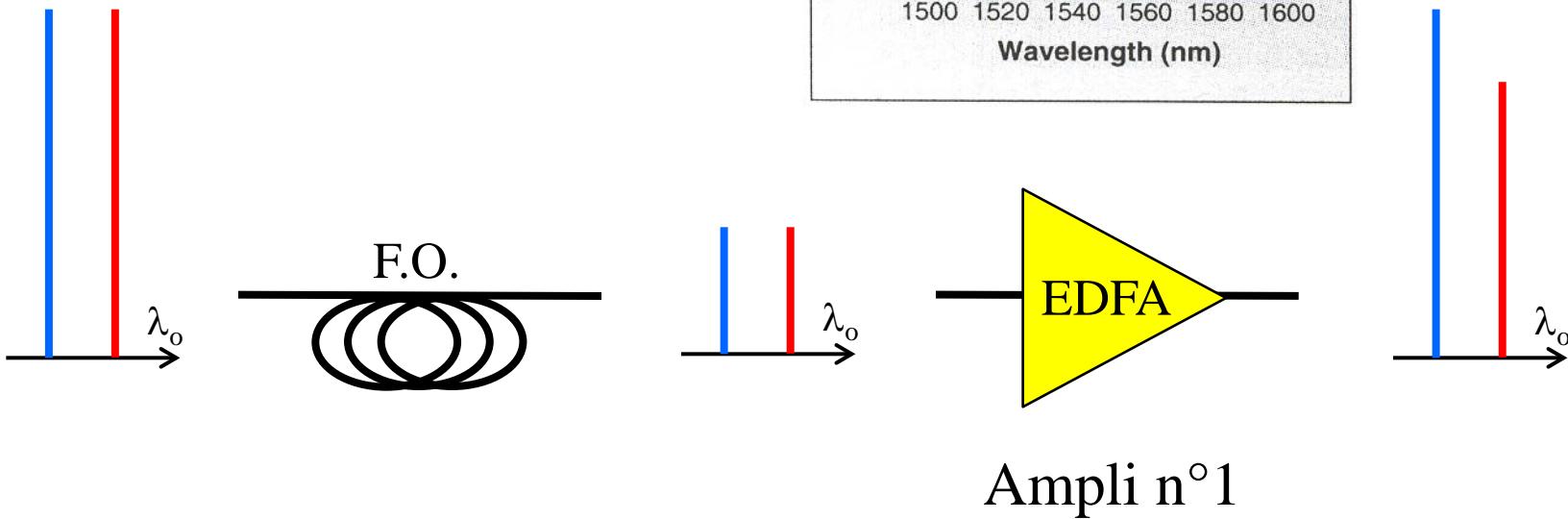


Courbe de gain
d'un EDFA



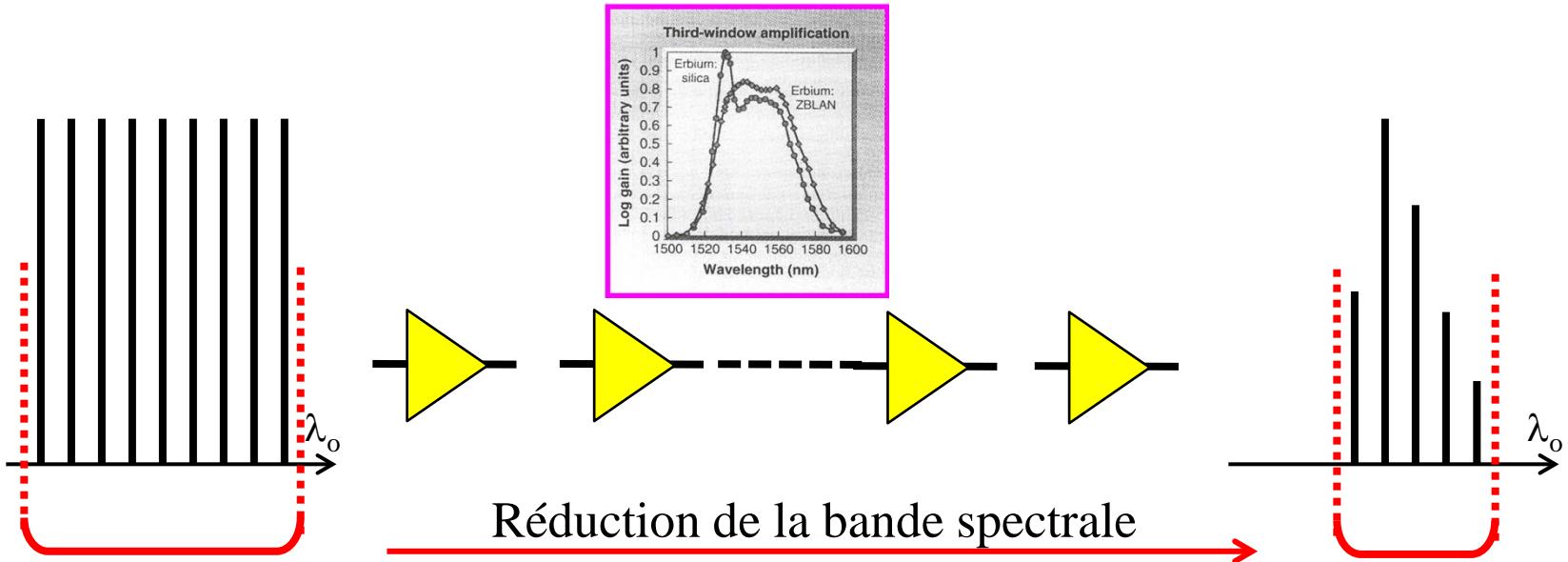
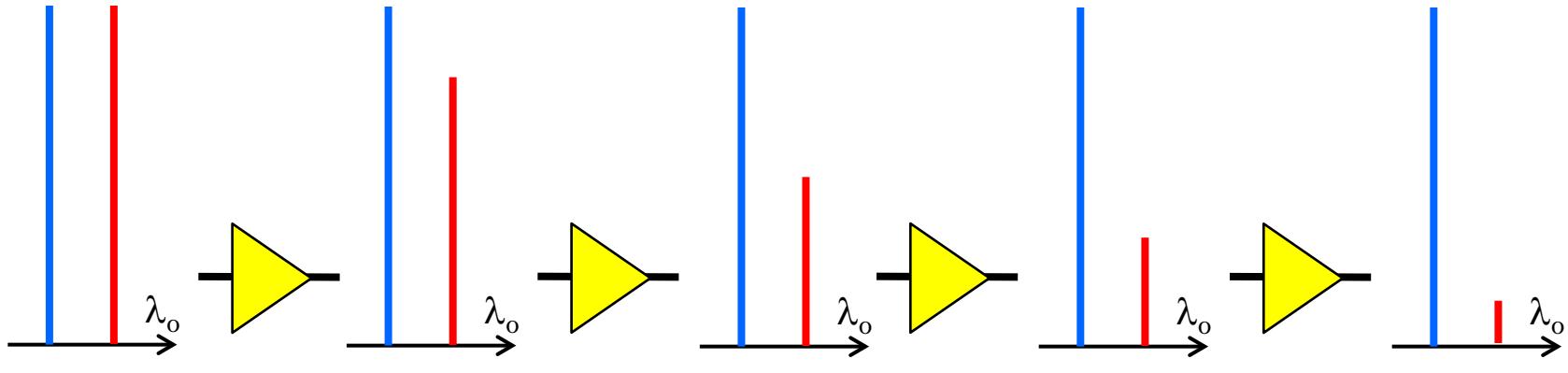
Les EDFA (2)

Réduction de la
bande spectrale



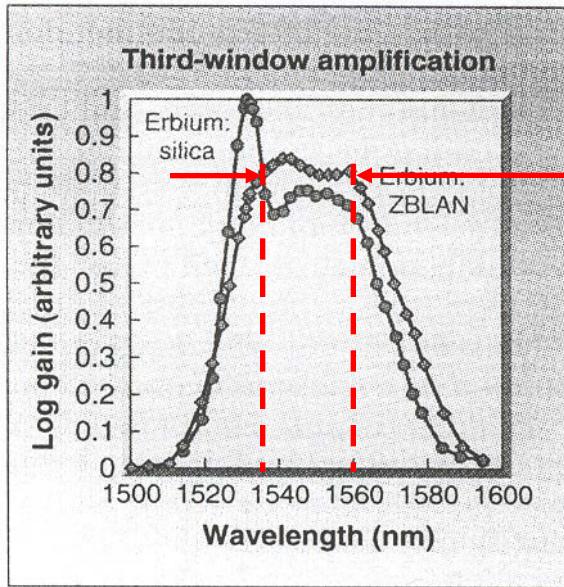
Les EDFA (2)

Réduction de la bande spectrale



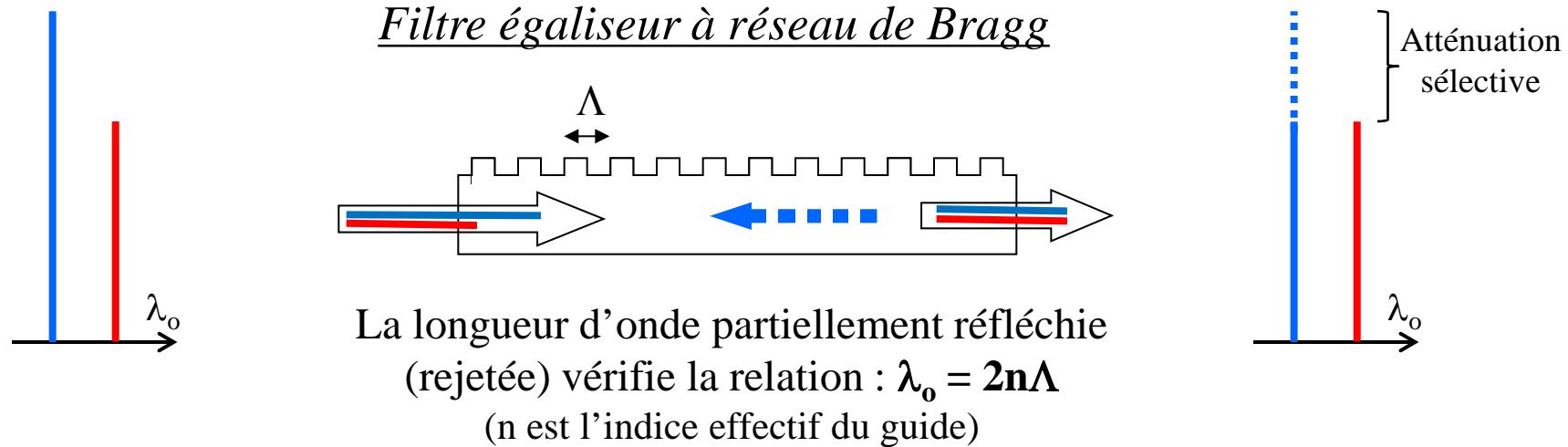
Les EDFA (2)

Egalisation du gain d'un EDFA



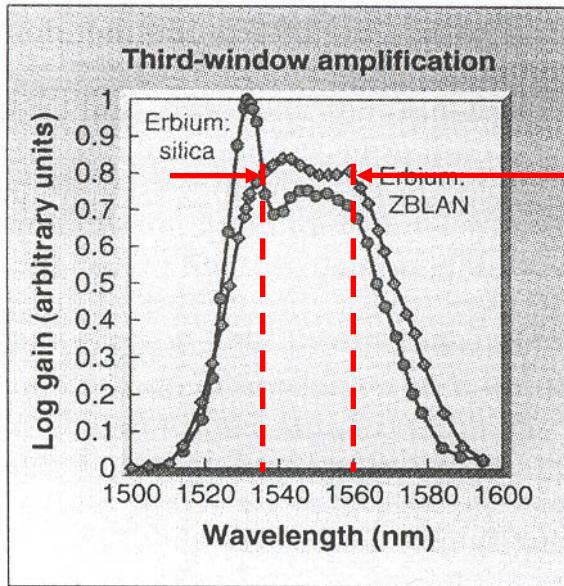
Plusieurs EDFA en cascade vont entraîner une réduction de la bande spectrale d'amplification


Utilisation de fibres à réseau de Bragg pour rejeter partiellement, en sortie de l'amplificateur, les longueurs d'onde les plus puissantes
(Filtre égaliseur de gain)



Les EDFA (2)

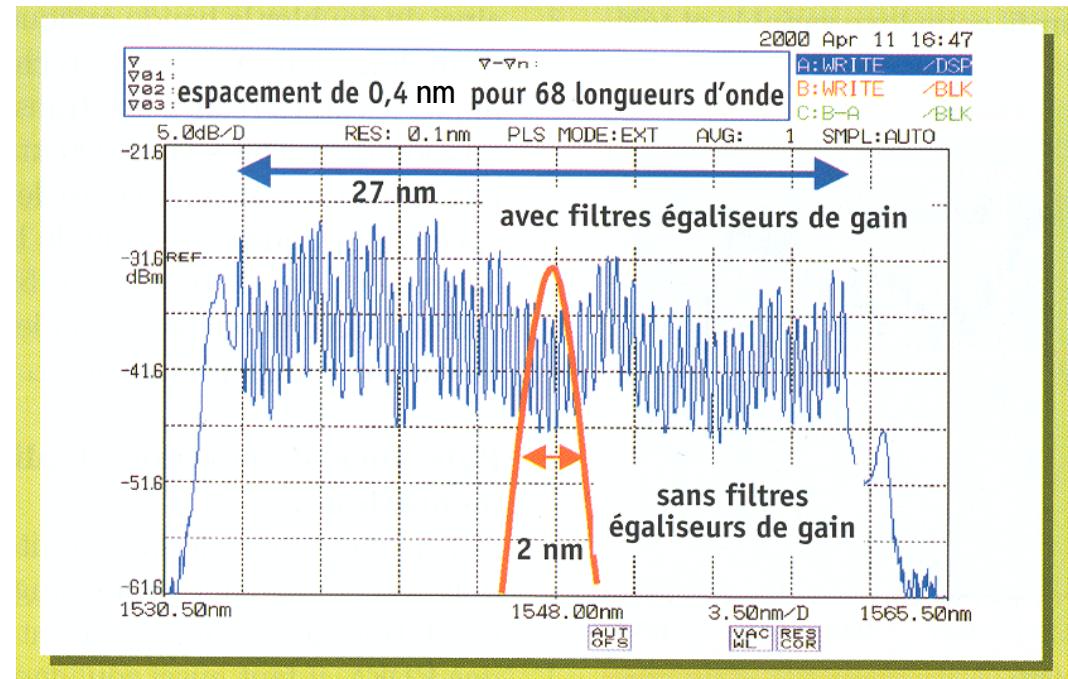
Egalisation du gain d'un EDFA



Plusieurs EDFA en cascade vont entraîner une réduction de la bande spectrale d'amplification



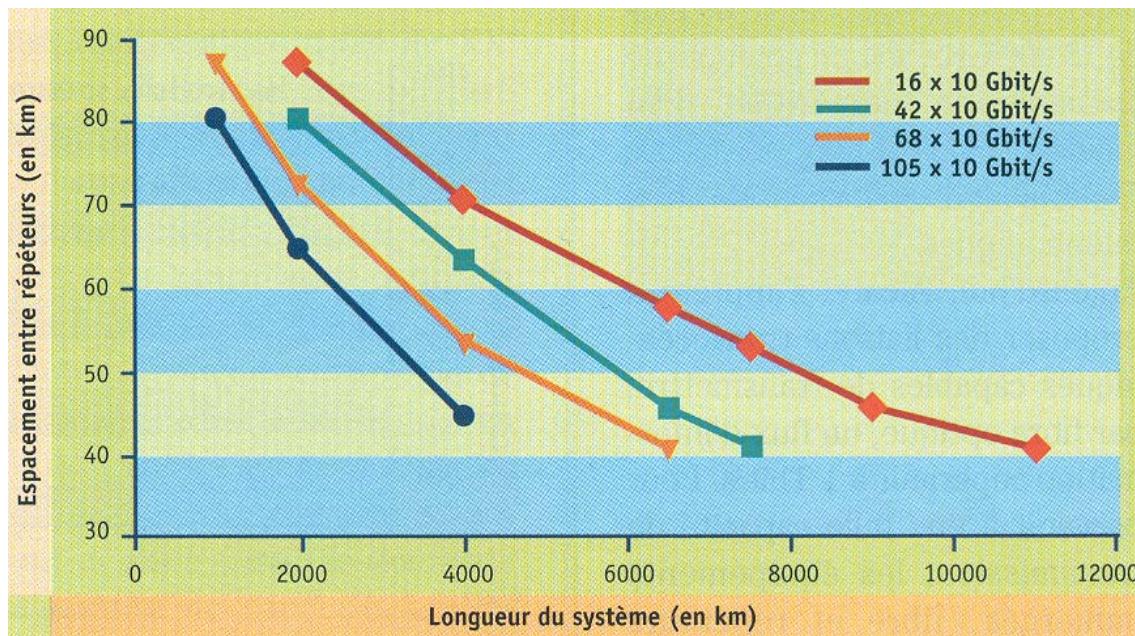
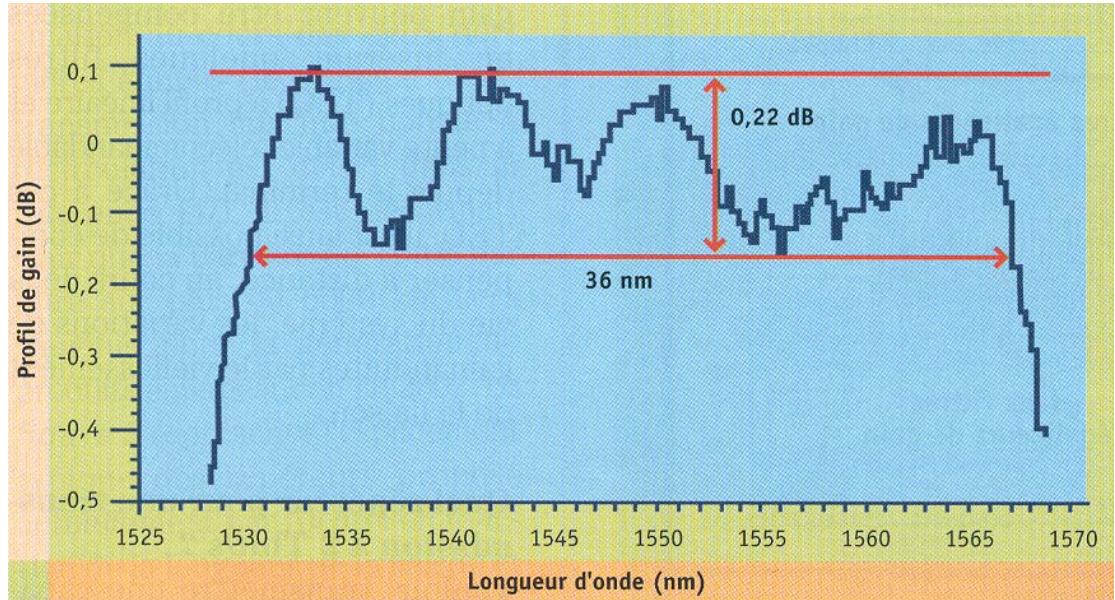
Utilisation de fibres à réseau de Bragg pour rejeter partiellement, en sortie de l'amplificateur, les longueurs d'onde les plus puissantes
(Filtre égaliseur de gain)



Spectre d'amplification en sortie d'une liaison de 68 x 10 Gb/s sur 6600 km

Les EDFA (3)

Spectre d'amplification
d'un EDFA large bande
avec filtre égaliseur



Espacement des EDFA
en fonction de la longueur
de la liaison et de la capacité
transmise par chaque fibre

ErFA Series

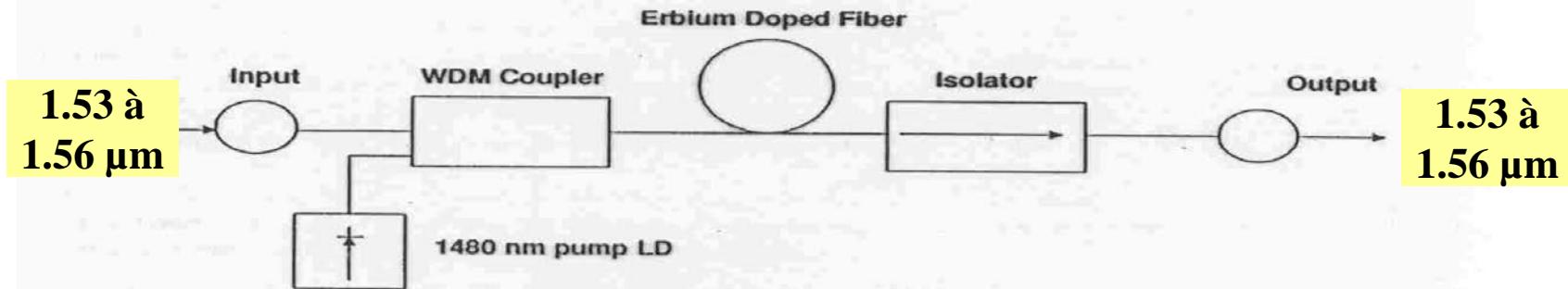
Erbium Doped Fiber Amplifiers

Features

- Direct amplification in optical domain
- 20-30 dB optical gain
- 1530-1560 nm operation
- Variable gain
- Polarization insensitive

Applications

- Long-haul telecommunication networks
- Cable TV
- Distribution feeder/systems
- OTDR/Instrumentation
- Sensors



Description

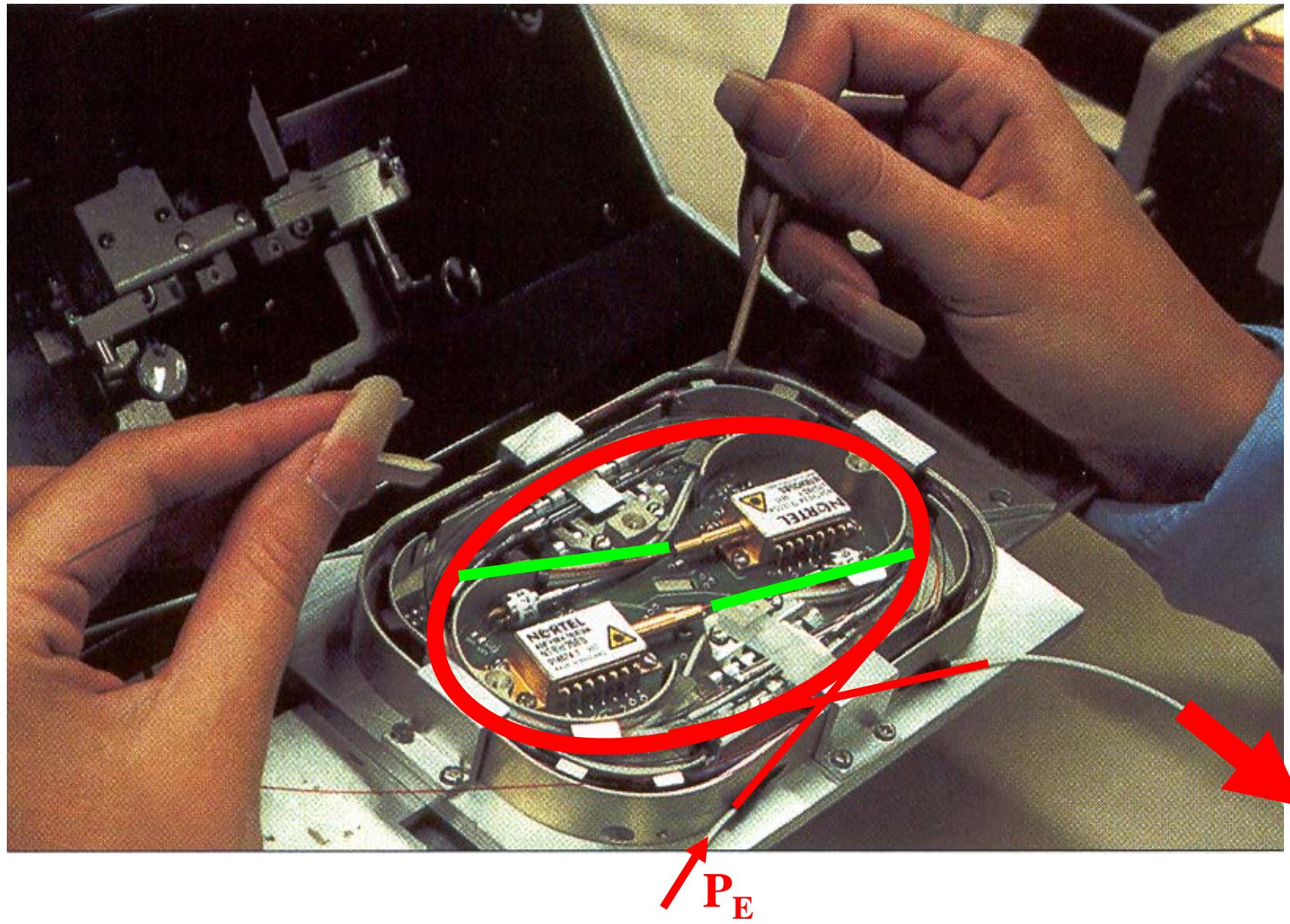
The ErFA Series Erbium Doped Fiber Amplifier is a stand-alone, high gain, direct, fiber-to-fiber optical amplifier designed for singlemode fiber applications in the 1550 nm wavelength range. Signal amplification is achieved by combining the input signal with the light from the semi-conductor pump laser emitting at 1480 nm through a wavelength division multiplexing coupler into the amplifier fiber with subsequent amplification of the signal and corresponding input/output fiber-to-fiber gain.

The ErFA Series amplifier is designed with a low noise figure and high saturation output power over the entire optical bandwidth of the instrument. In-line optical isolators installed at critical junctions will suppress optical feedback, reduce system noise and assure optimum performance.

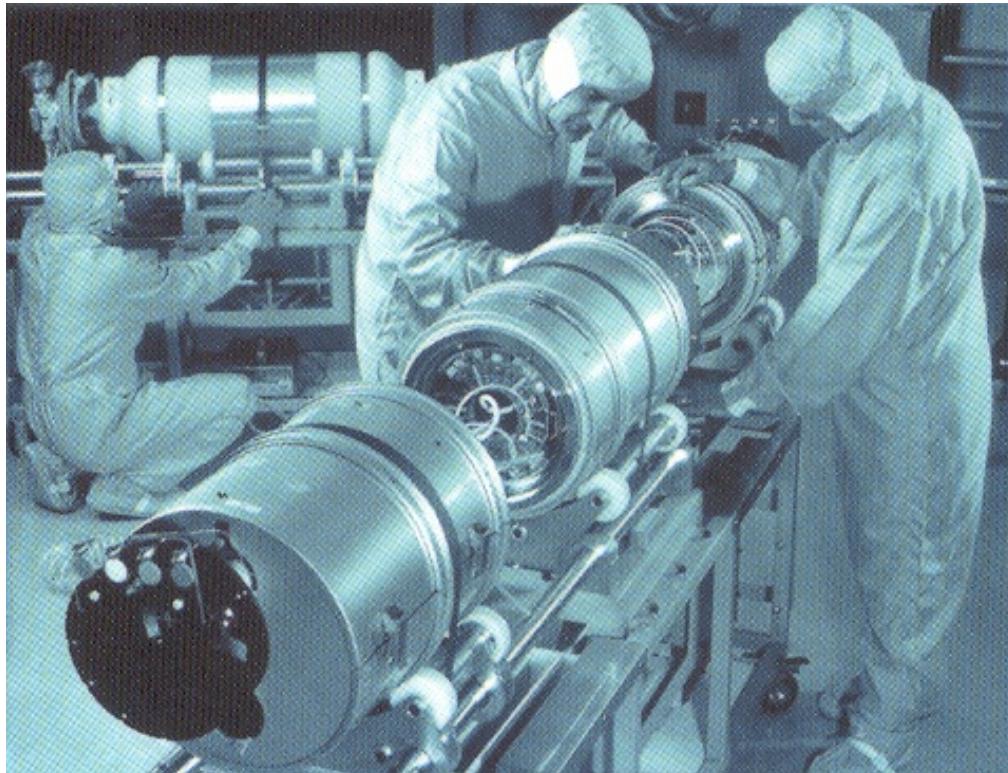
The gain of the amplifier can be controlled by a variable gain control knob on the instrument. For ease of application, the pump laser bias is also displayed.

The amplifier is assembled in a stand-alone assembly and is terminated with super-low backreflection optical FC/PC connectors for input and output terminals allowing rapid and easy connection to any fiber system.

Les EDFA (4)



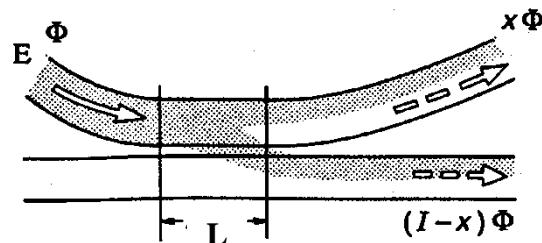
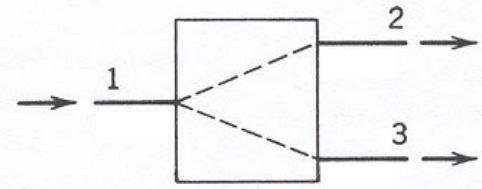
Les liaisons sous-marines (1)



Environ 130 EDFA pour une liaison entre l'Europe et les Etats-Unis



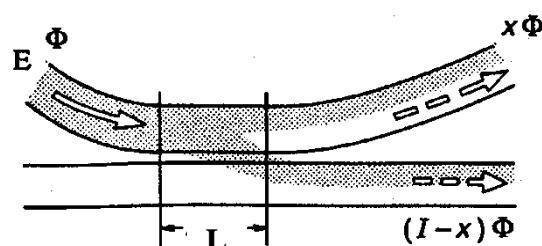
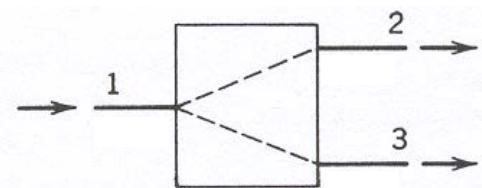
Coupleur « 1 vers 2 »



Si $x = 0,5$



coupleur « 50/50 »

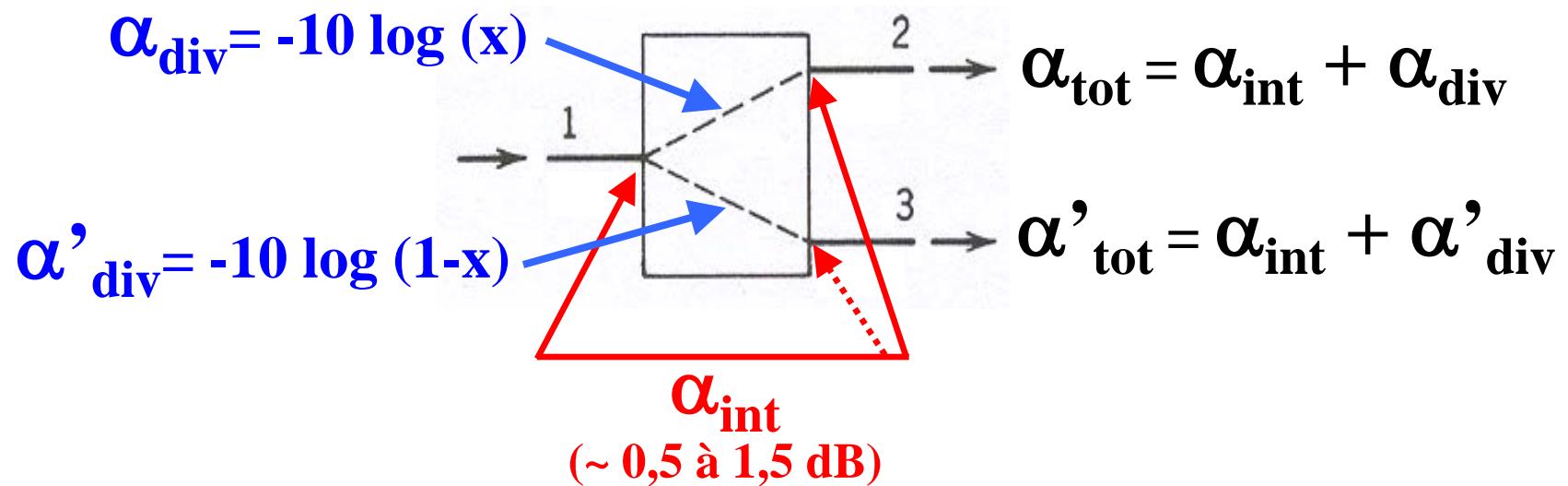


Si $x = 0,8$



coupleur « 80/20 »

$$\alpha_{\text{div}} = -10 \log (x)$$



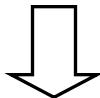
$$\alpha_{\text{tot}} = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{div}}$$

$$\alpha'_{\text{div}} = -10 \log (1-x)$$

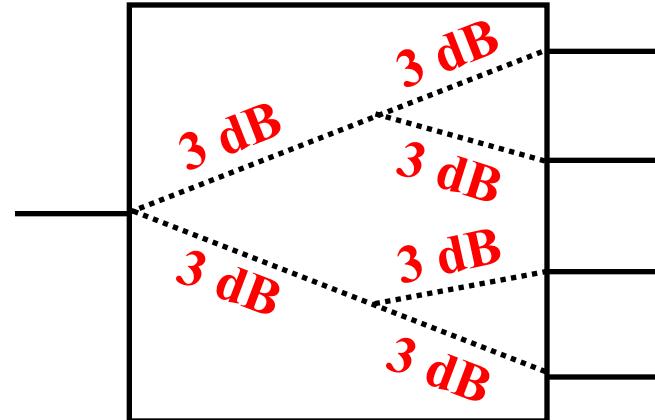
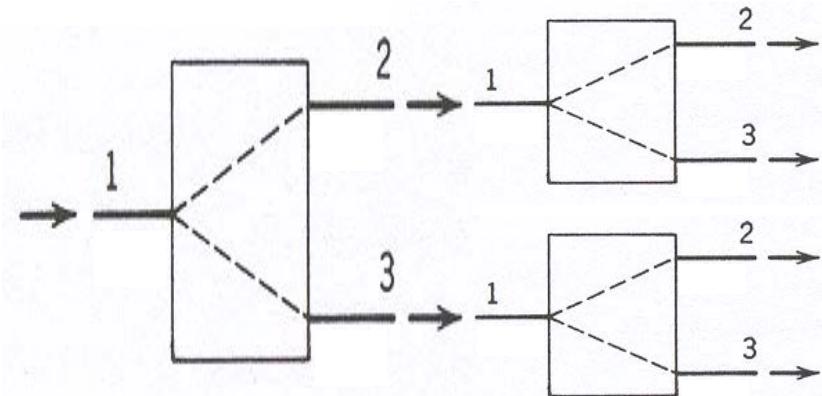
α_{int}
(~ 0,5 à 1,5 dB)

Coupleur « 1 vers N »

Un coupleur « 1 vers N », avec $N = 2^n$, est équivalent à plusieurs coupleurs « 50/50 » mis en série



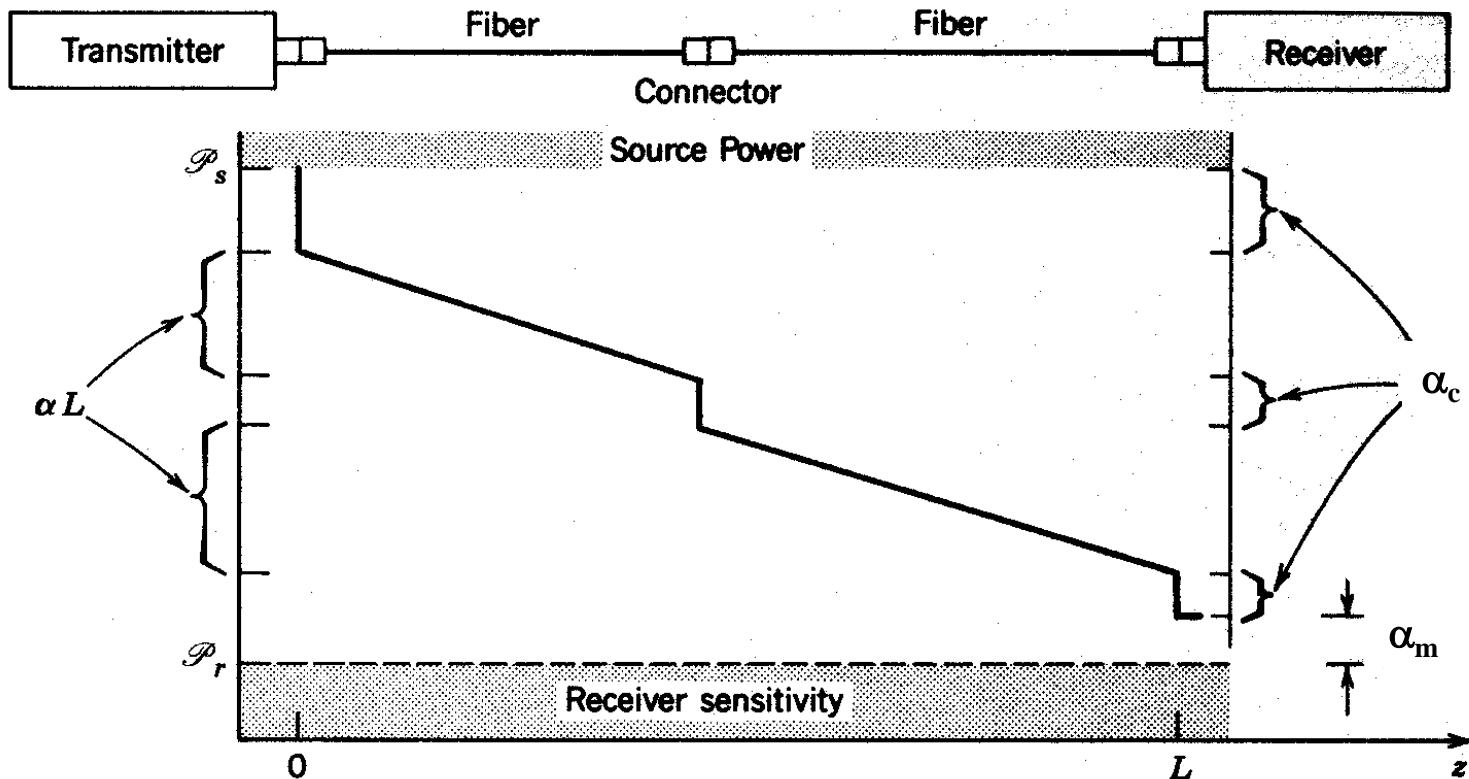
Chaque ramifications présente des pertes de division $\alpha_{\text{div}} = 3 \text{ dB}$



Pour chacune des 2^n sorties : $\alpha_{\text{tot}} = \alpha_{\text{int}} + n \text{ } 3\text{dB}$

Bilan de liaison (1)

Bilan de puissance à débit fixe



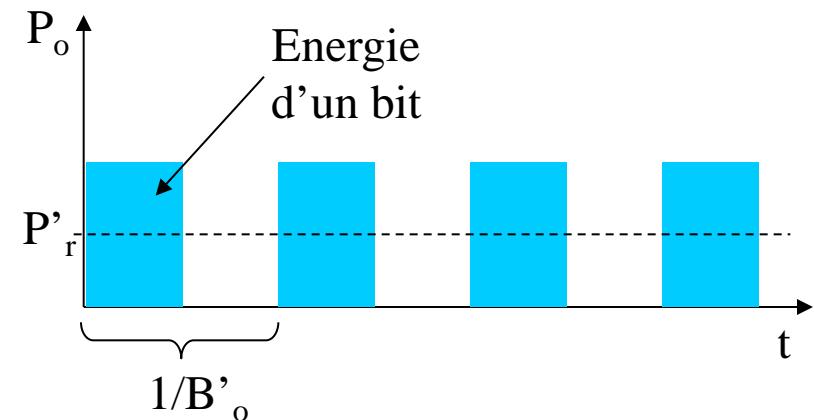
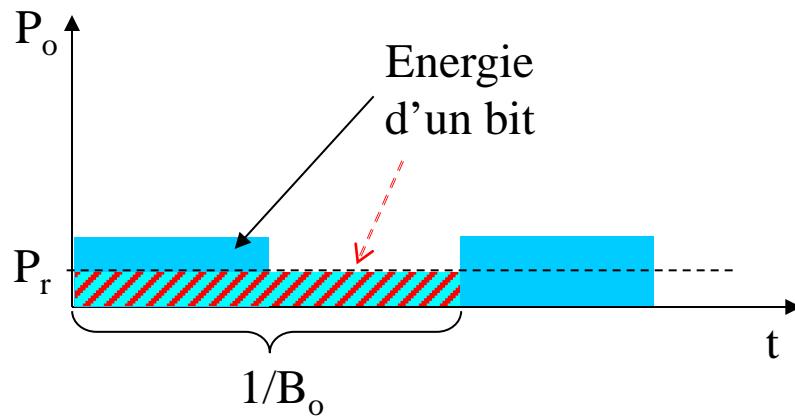
$$\rightarrow P_r (\text{dBm}) = P_s (\text{dBm}) - \sum \alpha (\text{dB}) + \sum G (\text{dB})$$

Pour fonctionner, le récepteur doit recevoir au moins une puissance : $P_{r-min} = N_{min} \cdot h\nu \cdot B_o$ (B_o étant fixé, N_{min} représente le nombre minimum de photons devant être reçus par bit)

Bilan de liaison (2)

Bilan de puissance en fonction du débit

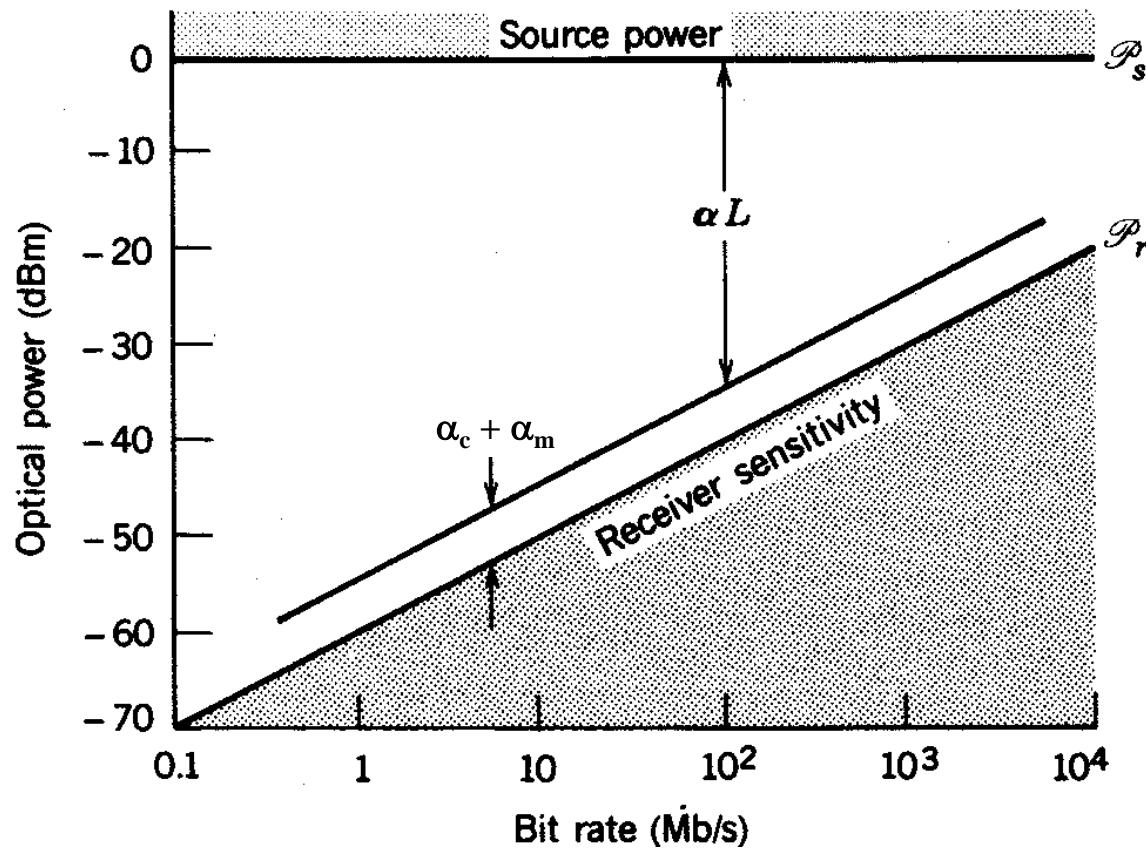
Le **paramètre fondamental** à prendre en compte est
l'énergie minimum reçue par bit : $N_{\min} \cdot h\nu$; soit donc : $P_{r-\min} / B_o$



L'énergie minimum reçue par bit doit être maintenue **constante** quand le débit B_o augmente (donc quand $1/B_o$ diminue)

La puissance reçue (P_r) doit augmenter quand le débit (B_o) augmente

Bilan de liaison (3)



$$L_{MAX} = L_o - (10/\alpha) \log B_o$$

FIN