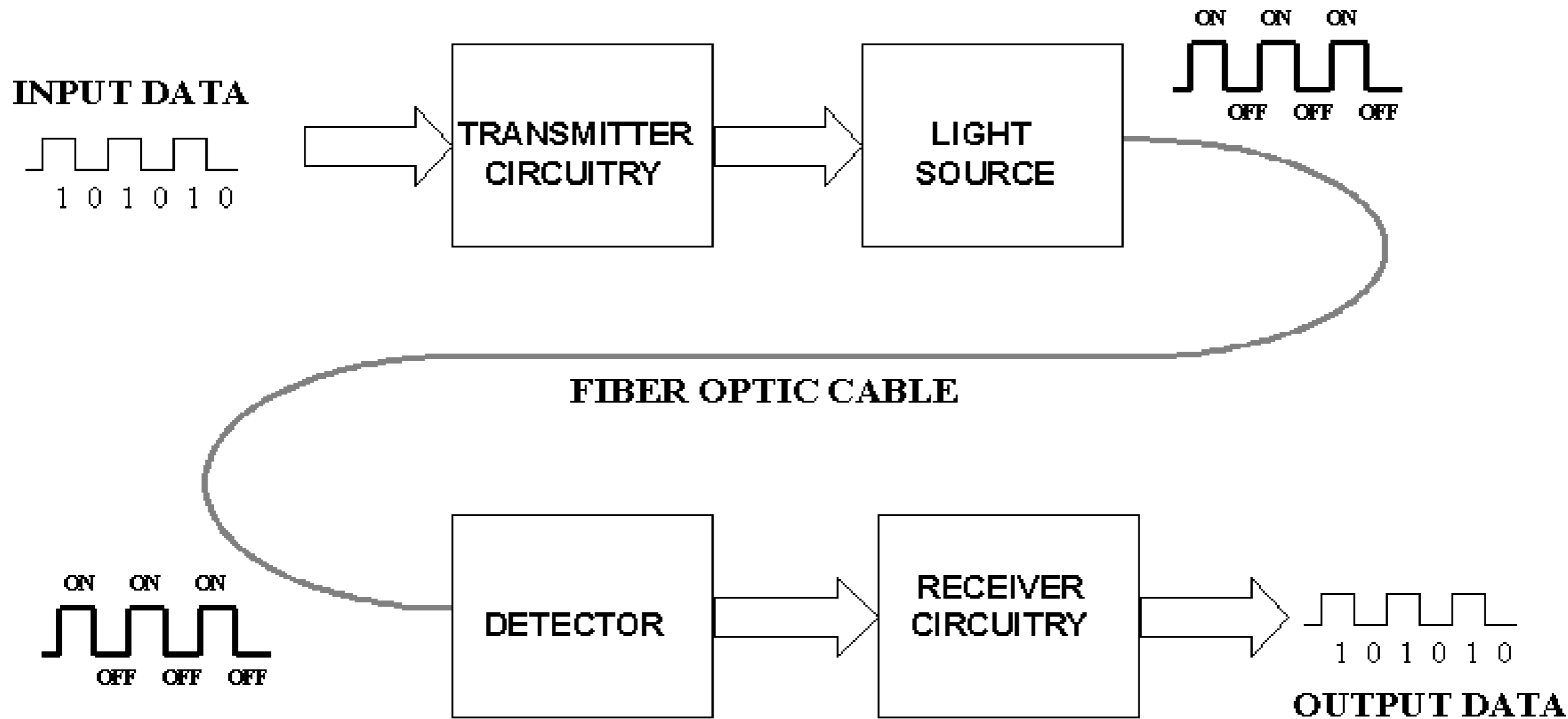
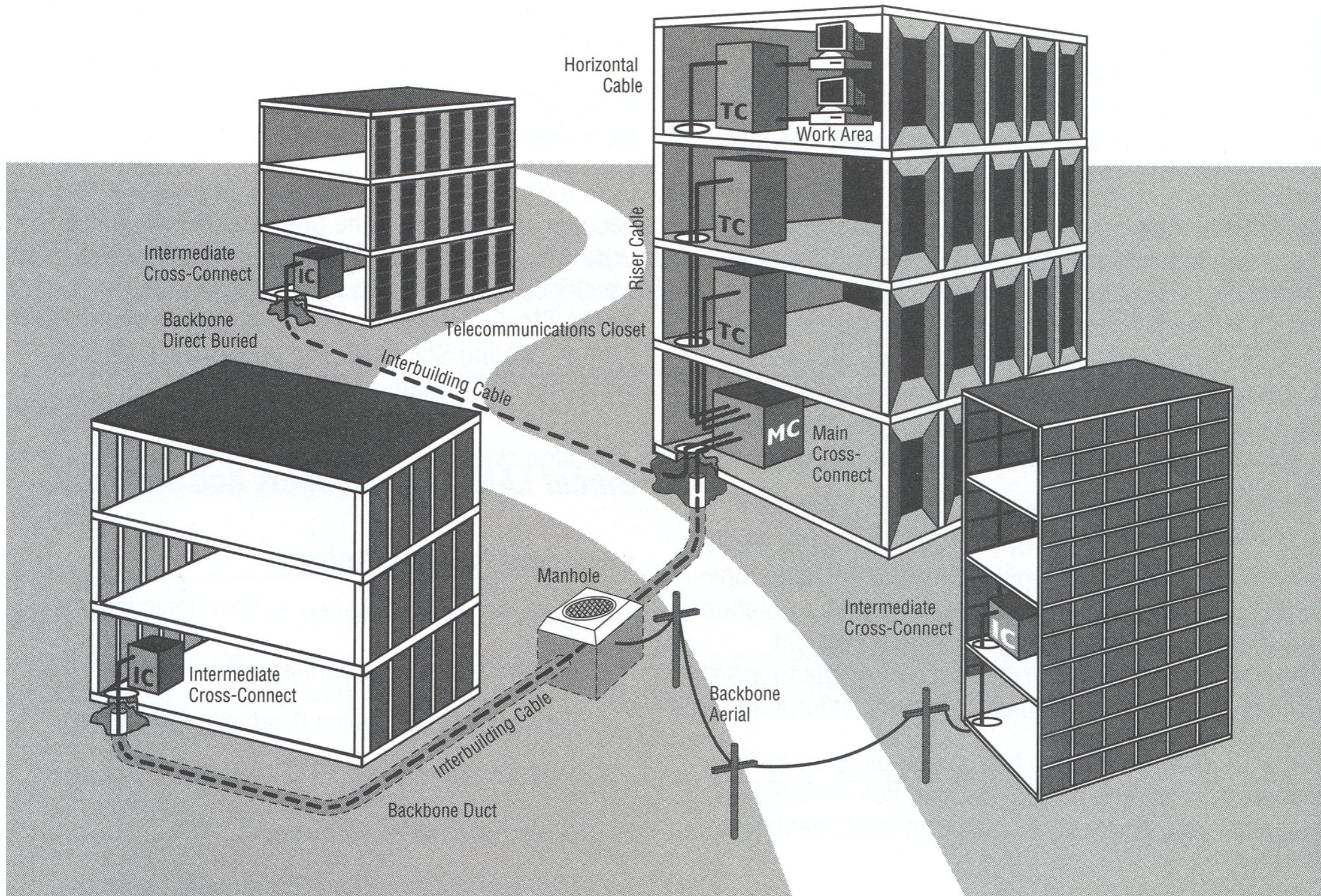


# La fibre optique

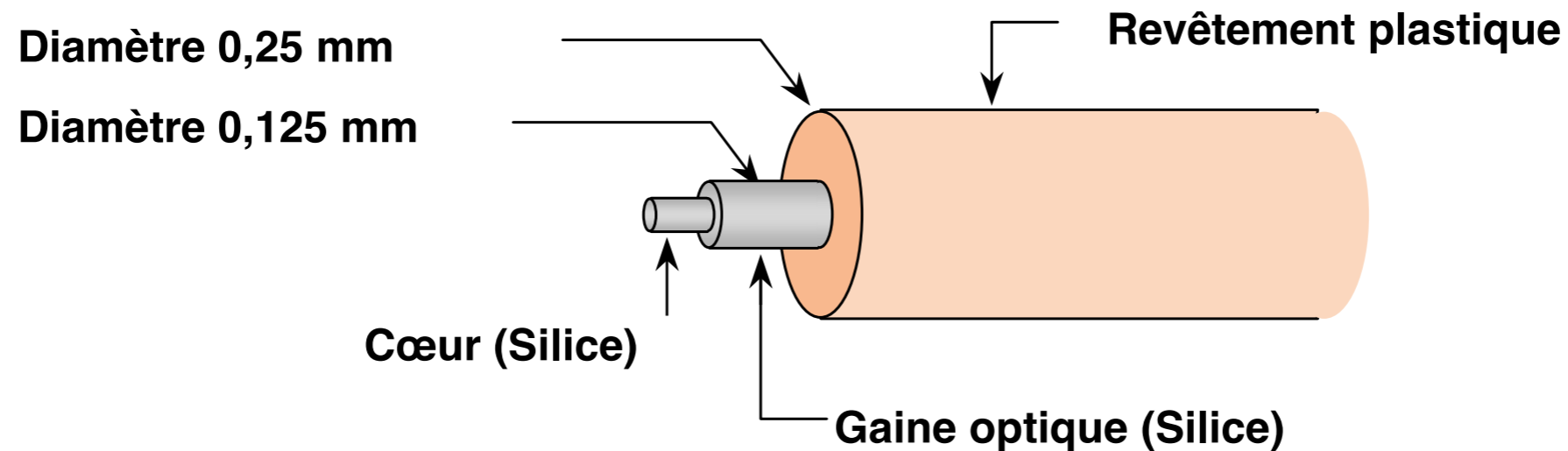
- **Qu'est-ce qu'une fibre optique ?**
- **Principes de base**
- **Monomode / Multimode**
- **Atténuation, fenêtres de propagation**
- **Principales caractéristiques**
- **Transmission sur fibre optique**
- **Boucle Locale Optique**



# Cabling Example



# La fibre optique



- Le signal lumineux est propagé dans et à proximité du cœur.
- La gaine optique sert essentiellement à amener le diamètre à  $125\mu\text{m}$ , pour des raisons mécaniques.
- Le revêtement sert à protéger la fibre optique.

# La fibre optique

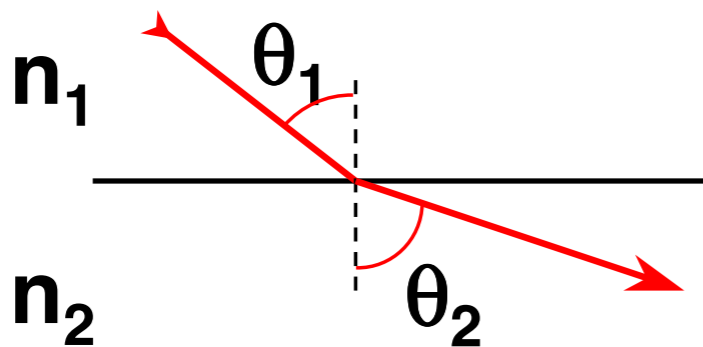
## - L'indice de réfraction $n$ :

Dans un matériau transparent, l'indice de réfraction mesure la vitesse de la lumière par rapport à sa vitesse dans le vide

$$v = c/n$$

## - Loi de Snell-Descartes :

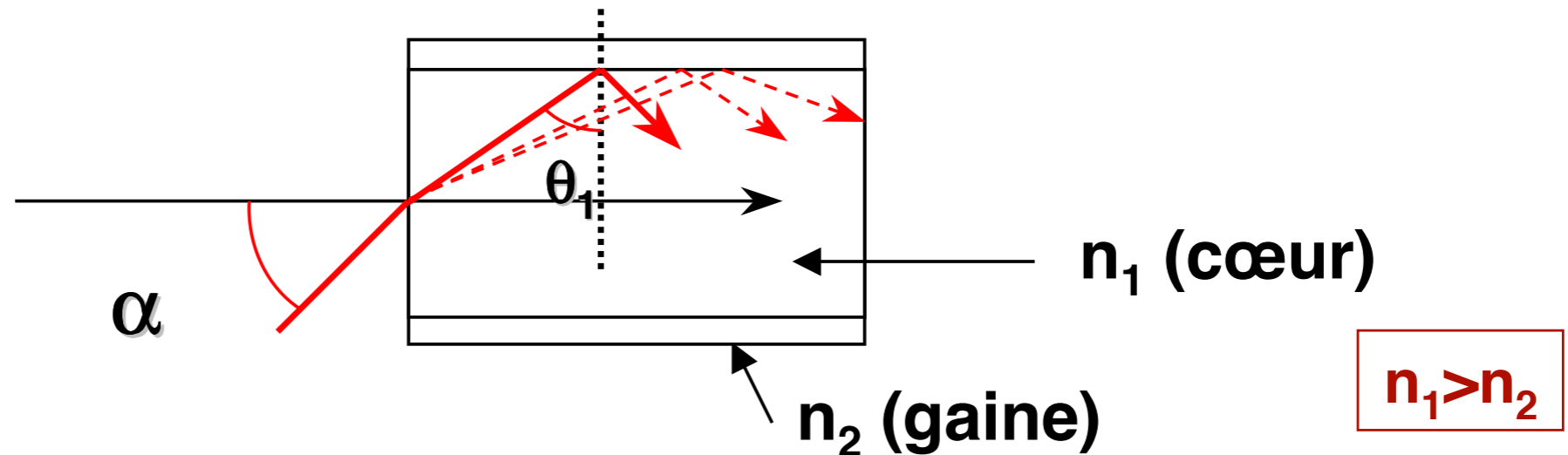
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



Si  $n_1 > n_2$  le rayon s'écarte de la normale.

Si  $\theta_1 > \arcsin(n_2/n_1)$ , il y a réflexion totale.

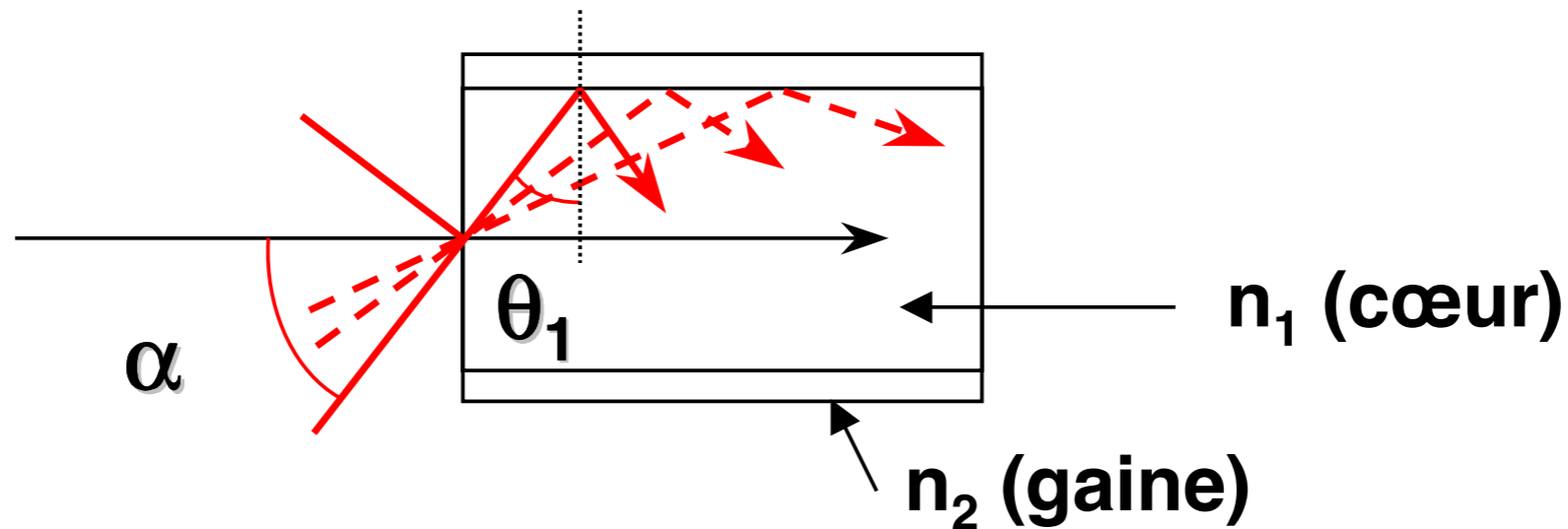
# Propagation dans la fibre optique



Condition de guidage dans le cœur :  $\theta_1 \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1}$

Sinon le rayon est réfracté dans la gaine de la fibre

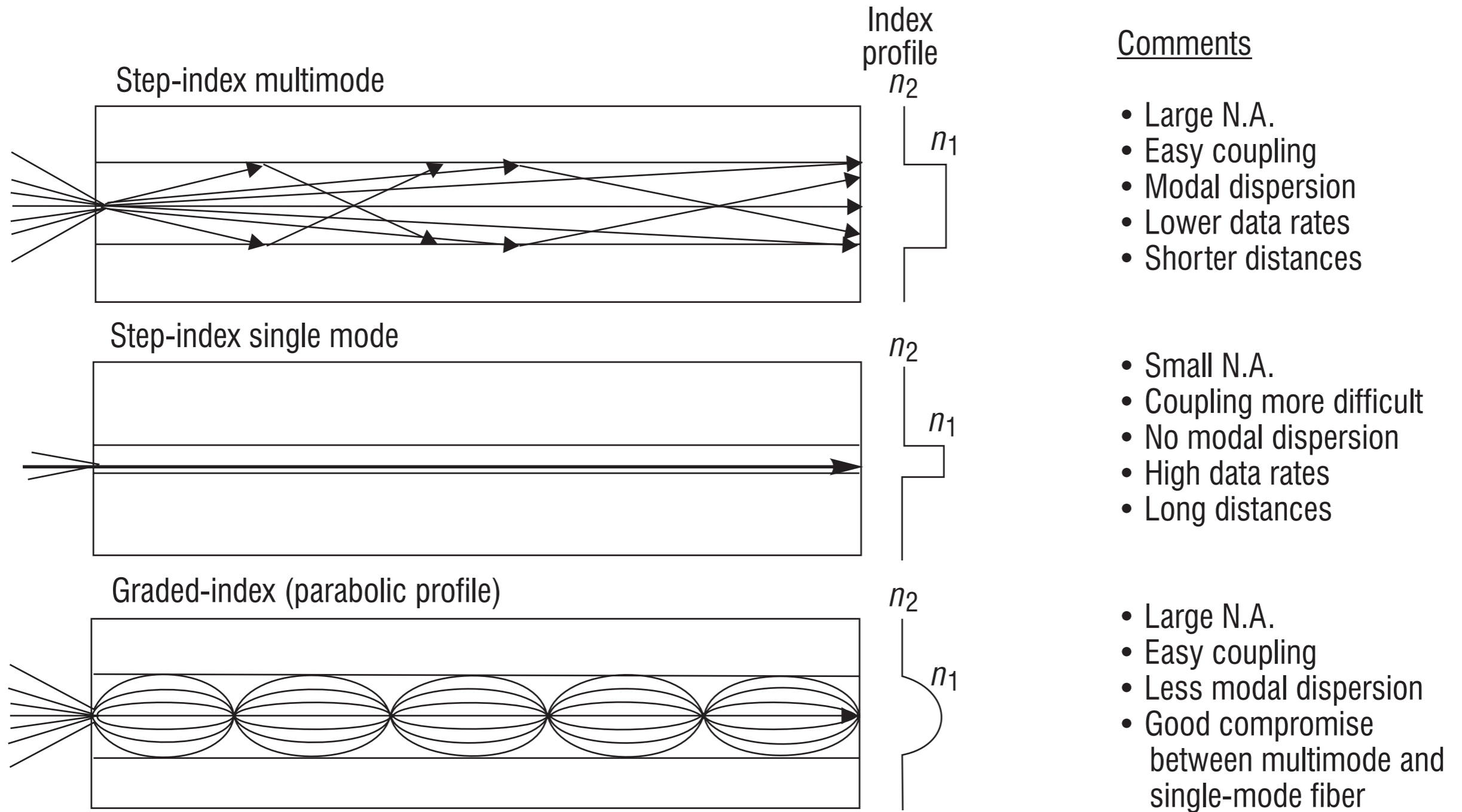
# Propagation dans la fibre optique



Angle d'incidence maximal à l'entrée de la fibre, soit l'ouverture du cône d'acceptance, appelée ouverture numérique ON :

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

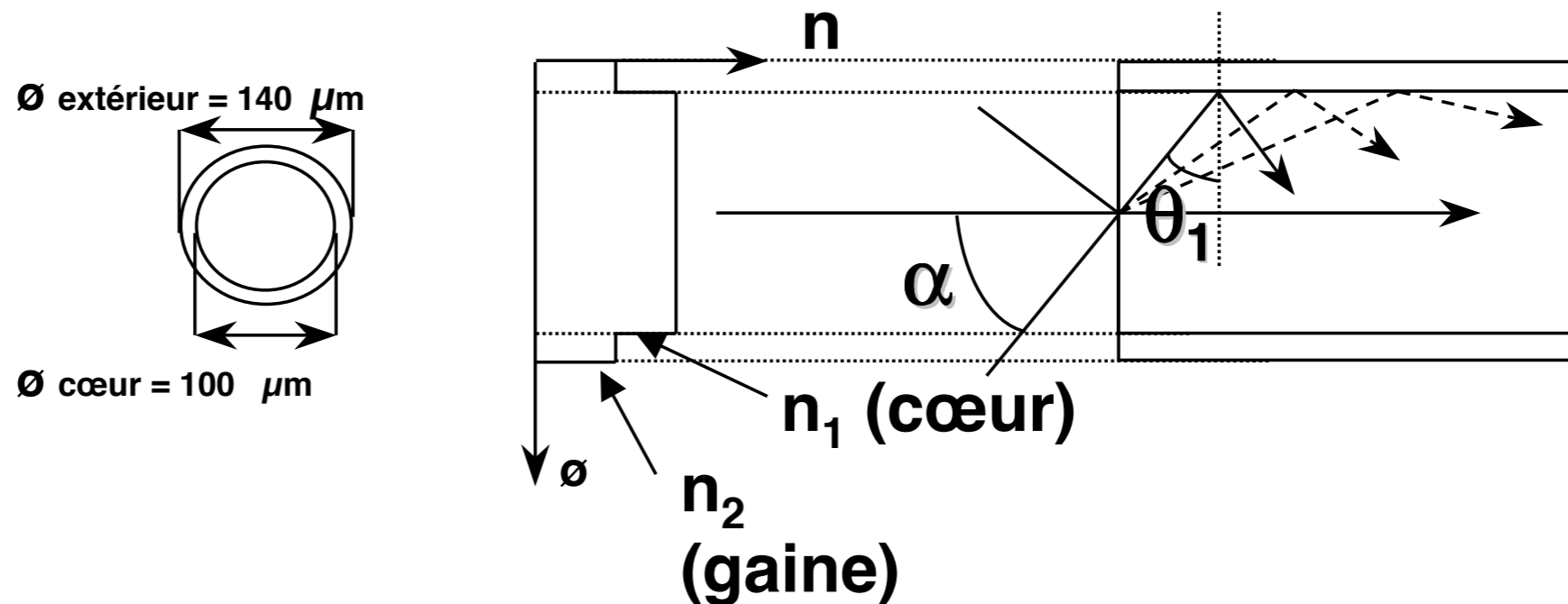
# Types de fibres





# La fibre optique multimode

## Fibre à saut d'indice multimode

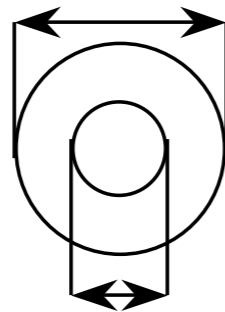


Indice de réfraction dans le cœur  $n_1$  constant

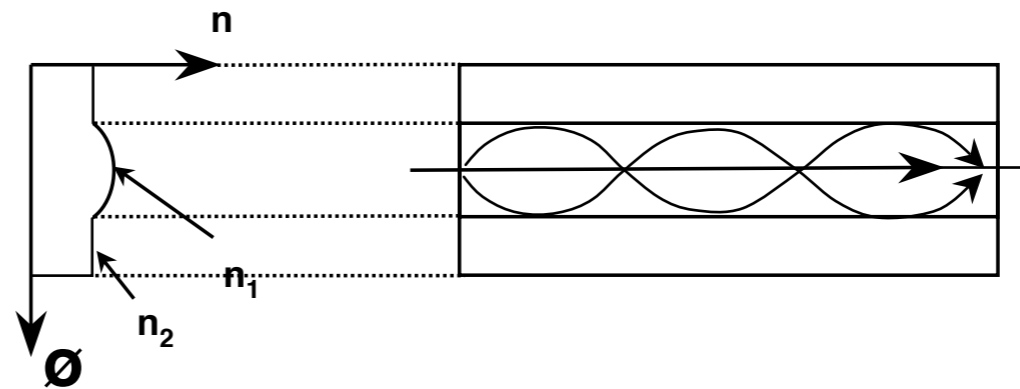
# La fibre optique multimode

## Fibre à gradient d'indice multimode

$\varnothing$  extérieur = 125  $\mu\text{m}$



$\varnothing$  cœur = 50, 62.5 ou 85  $\mu\text{m}$



L'indice du cœur diminue suivant une loi parabolique depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-gaine.

La diminution de l'indice fait que la lumière se propage plus vite, ce qui réduit la dispersion intermodale.

# La fibre optique multimode

## Propagation multimode

On définit le paramètre  $V$  (fréquence normalisée) avec  $a$  : rayon du cœur ( $V < 2.405$  si monomode)

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

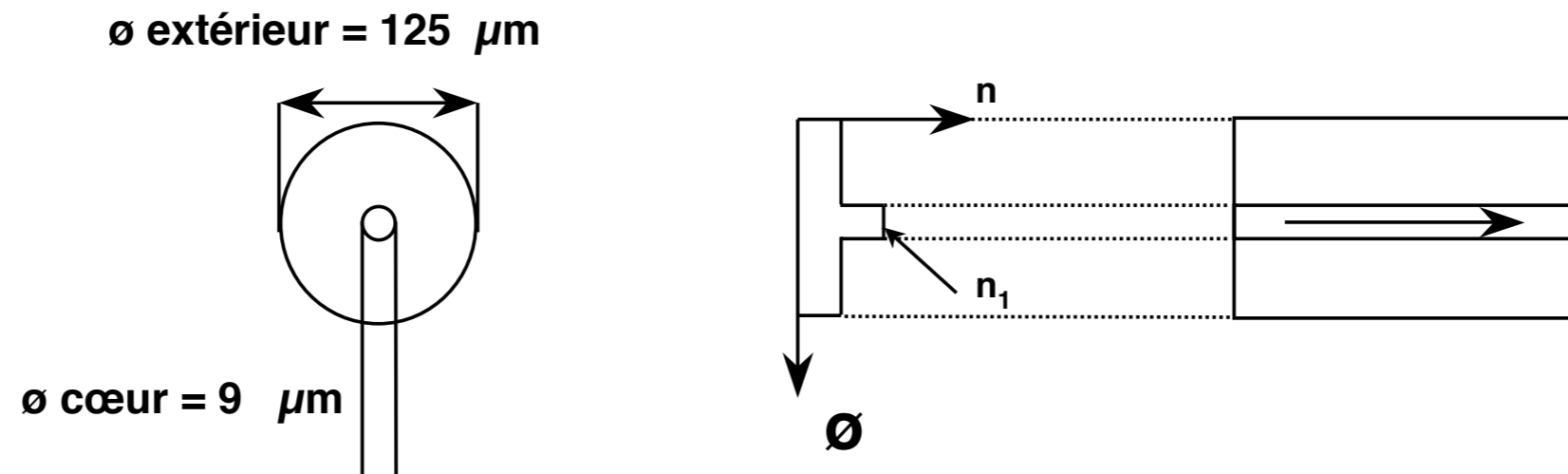
Le nombre de modes  $M$  est donné par :  $M = \frac{V^2}{2}$  (approximation vraie pour un grand nombre de modes)

dans une fibre à saut d'indice

⇒ Le rayon lumineux a plusieurs manières de se propager dans le cœur de la fibre, chaque mode ayant une vitesse de propagation propre (vitesse suivant l'axe de propagation)

# La fibre optique monomode

## Fibre à saut d'indice monomode



**Sélection d'un seul mode de propagation se propageant au voisinage de l'axe**

# **La fibre optique multi/monomode**

## **- La fibre multimode :**

**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.**

## **- La fibre monomode :**

**A une bande passante pratiquement infinie (en théorie) mais requiert des composants chers et des tolérances faibles.**

**⇒ Est devenue la solution universelle des systèmes de télécommunications.**

# Diamètre de mode

- **Diamètre de mode ( $2W_0$ ) :**
  - La lumière est guidée par le cœur. Mais, en monomode, une partie importante de la puissance est transmise dans la gaine.
  - Le profil de puissance lumineuse est à peu près "gaussien", il est en forme de cloche  $I=I_0\exp(-2r^2/w_0^2)$ .
  - Le diamètre de mode est le diamètre de la courbe à  $1/e^2$ , soit environ mi-hauteur.
- C'est pourquoi l'épaisseur de la gaine est importante dans les fibres monomodes.
- Le diamètre de mode varie avec la longueur d'onde.

# Longueur d'onde de coupure

Le guidage du mode varie avec la longueur d'onde :

- Aux grandes longueurs d'onde le mode est guidé.
- Aux courtes longueurs d'onde, le mode est guidé **mais** des modes d'ordre supérieur sont guidés aussi.

La longueur d'onde de coupure est celle au-dessus de laquelle la fibre devient monomode.

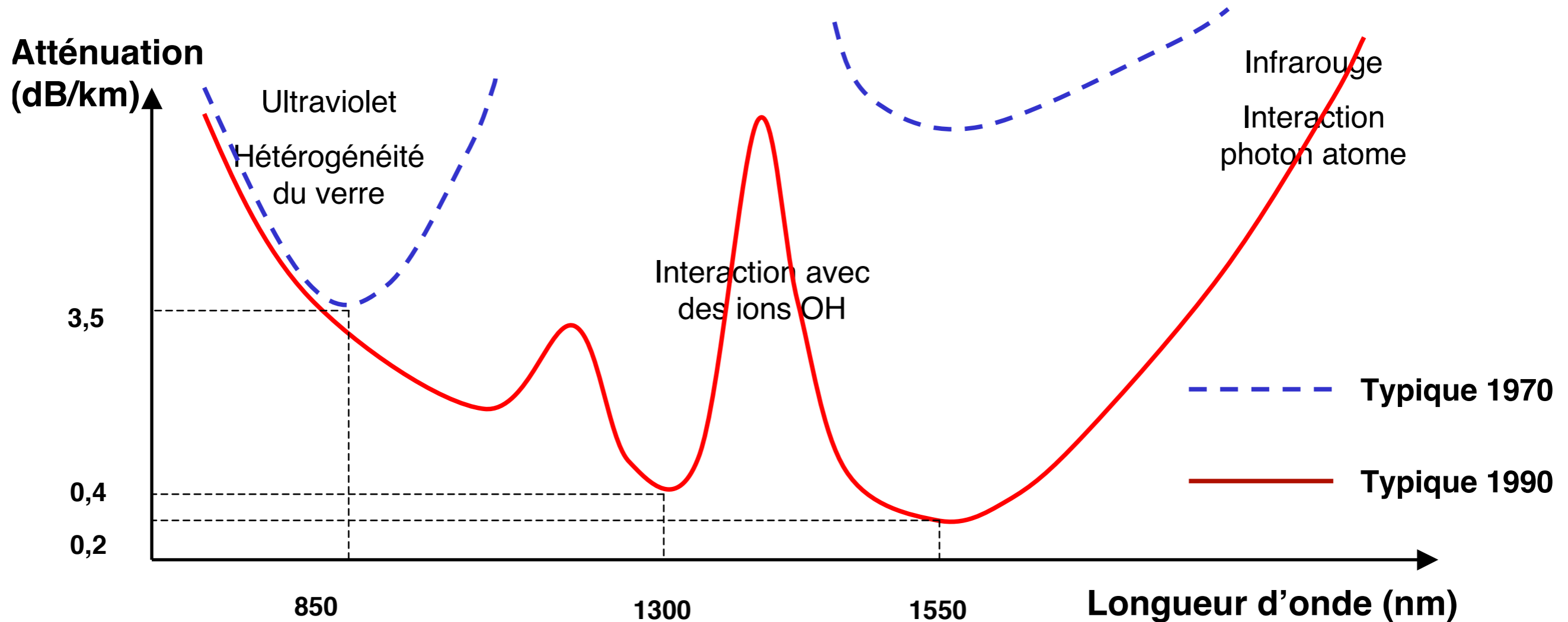
$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2,404} a \cdot \text{ON}$$

a = rayon du cœur

- En dessous de  $\lambda_c$  le mode fondamental perd de l'énergie au profit de modes d'ordre supérieur.

# Atténuation / Longueur d'onde

La mesure d'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'onde.





# Fenêtre de transmission

- **La première fenêtre (0.8-0.9  $\mu\text{m}$ ) :**
  - **Atténuation élevée (  $\sim 3$  dB/km)**
  - **Composants très bon marché (Diodes LED)**

**$\Rightarrow$  n'est utilisée qu'en multimode.**
- **La deuxième fenêtre (1.28-1.33  $\mu\text{m}$ ) :**
  - **Lasers disponibles depuis longtemps et peu chers**
  - **Atténuation raisonnable (0,33 dB/km)**
  - **Dispersion chromatique nulle**

**$\Rightarrow$  est encore largement utilisée.**

# Fenêtre de transmission

**La troisième fenêtre (1.525-1.625  $\mu\text{m}$ ) :**

- **Atténuation minimale (0,2 dB/km)**
- **Lasers et amplificateurs performants (mais assez chers)**
- **Existence de systèmes très performants (DWDM)**
- **Deux sous-bandes : C 1525-1565 nm, L 1565-1625 nm**

**$\Rightarrow$  C'est la fenêtre de choix pour quasiment toutes les applications modernes.**

**On sait faire des fibres à "dispersion décalée" et même des fibres à "dispersion plate" entre 1,3 et 1,55  $\mu\text{m}$**

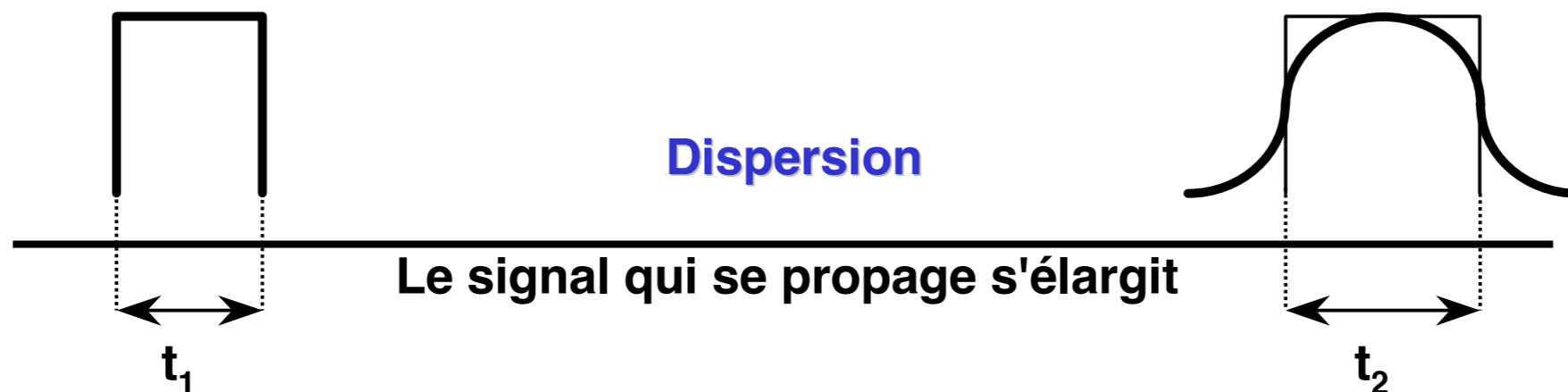
# La fibre optique

Deux effets limitent la capacité de transmission :

-Atténuation : une partie du signal, sous forme de lumière, est perdue



- Dispersion chromatique: le signal reçu est déformé par rapport au signal émis (dégradation)



# Atténuation

Au cours de la propagation dans la fibre, la puissance décroît selon la loi :

$$P(z) = P_{in} e^{-\alpha z}$$

$\alpha$  est le coefficient d'atténuation en Neper/m.

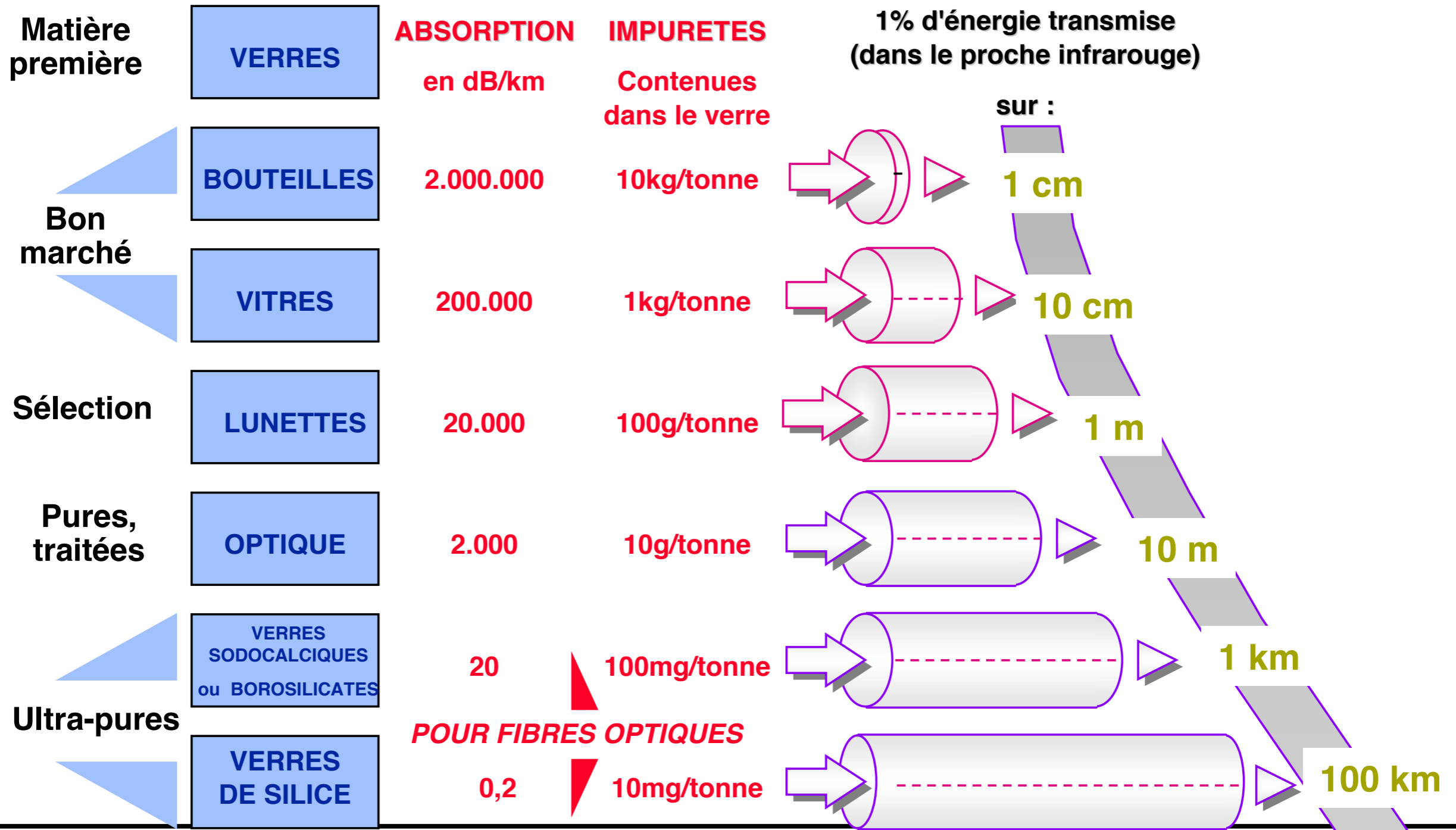
On définit plutôt l'atténuation en dB/km :

$$A = \frac{1}{L} 10 \log \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

La relation entre  $A$  et  $\alpha$  est :

$$A_{\text{dB/km}} = 4,34 \cdot 10^3 \alpha_{\text{m}^{-1}}$$

# Atténuation



## Example 1

A fiber of 100-m length has  $P_{\text{in}} = 10 \mu\text{W}$  and  $P_{\text{out}} = 9 \mu\text{W}$ . Find the loss in dB/km.

From Equation 8-2

$$\text{Loss}_{\text{dB}} = 10 \log \left( \frac{9 \mu\text{W}}{10 \mu\text{W}} \right) = -0.458 \text{ dB}$$

and since

$$100 \text{ m} = 0.1 \text{ km}$$

the loss is

$$\text{Loss}(\text{dB}/\text{km}) = \frac{-0.458 \text{ dB}}{0.1 \text{ km}} = -4.58 \text{ dB}/\text{km}$$

$\therefore$  The negative sign implies loss.

## Example 2

A communication system uses 10 km of fiber that has a 2.5-dB/km loss characteristic. Find the output power if the input power is 400 mW.

### Solution:

From Equation 8-2, and making use of the relationship that  $y = 10^x$  if  $x = \log y$ ,

$$\text{Loss}_{\text{dB}} = 10 \log \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$$

$$\frac{\text{Loss}_{\text{dB}}}{10} = \log \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$$

which becomes, then,

$$10^{\frac{\text{Loss}_{\text{dB}}}{10}} = \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right).$$

So, finally, we have

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \times 10^{\frac{\text{Loss}_{\text{dB}}}{10}}$$

For 10 km of fiber with 2.5-dB/km loss characteristic, the  $\text{loss}_{\text{dB}}$  becomes

$$\text{Loss}_{\text{dB}} = 10 \text{ km} \times (-2.5 \text{ dB/km}) = -25 \text{ dB}$$

Plugging this back into Equation 8-2b,

$$P_{\text{out}} = (400 \text{ mW}) \times 10^{\frac{-25}{10}} = 1.265 \text{ mW}$$

### Example 3

A 3-km fiber optic system has an input power of 2 mW and a loss characteristic of 2 dB/km. Determine the output power of the fiber optic system.

#### Solution:

Using Equation 8-3, we convert the source power of 2 mW to its equivalent in dBm:

$$\text{Input power}_{\text{dBm}} = 10 \log \left( \frac{2 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) = +3 \text{ dBm}$$

The loss<sub>dB</sub> for the 3-km cable is,

$$\text{Loss}_{\text{dB}} = 3 \text{ km} \times 2 \text{ dB/km} = 6 \text{ dB}$$

Thus, power in dB is  $(\text{Output power})_{\text{dB}} = +3 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = -3 \text{ dBm}$

Using Equation 8-3 to convert the output power of -3 dBm back to milliwatts, we have

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P(\text{mW})}{1 \text{ mW}}$$

so that

$$P(\text{mW}) = 1 \text{ mW} \times 10^{\frac{P(\text{dBm})}{10}}$$

Plugging in for  $P(\text{dBm}) = -3 \text{ dBm}$ , we get for the output power in milliwatts

$$P(\text{mW}) = 1 \text{ mW} \times 10^{\frac{-3}{10}} = 0.5 \text{ mW}$$

Note that one can also use Equation 8-2a to get the same result, where now  $P_{\text{in}} = 2 \text{ mW}$  and  $\text{Loss}_{\text{dB}} = -6 \text{ dB}$ :

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \times 10^{\frac{\text{Loss}_{\text{dB}}}{10}}$$

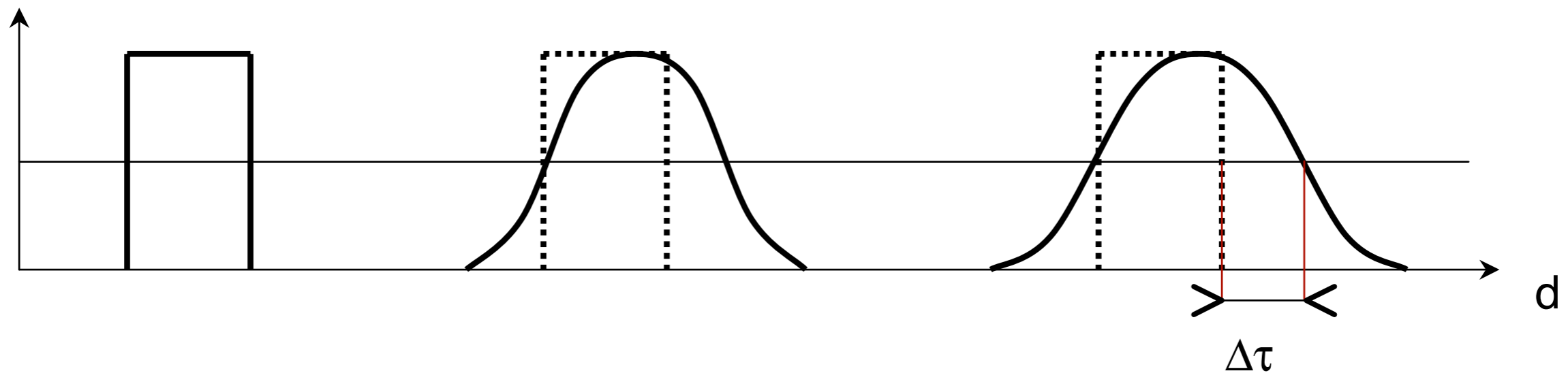
or

$$P_{\text{out}} = 2 \text{ mW} \times 10^{\frac{-6}{10}} = 0.5 \text{ mW}, \text{ the same as above.}$$



# La dispersion chromatique

La dispersion se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation.



La fibre se comporte comme un filtre passe-bas.

# Dispersion chromatique

**La vitesse de propagation moyenne d'une impulsion est égale à la vitesse de groupe du mode fondamental. Le problème vient de ce que le temps de propagation de groupe varie avec la longueur d'onde. Or les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques.**

**Il y a deux causes à prendre en compte :**

- l'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (dispersion matériau)**
- la vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde (dispersion guide d'onde)**

# Dispersion chromatique

Pour une largeur spectrale  $\Delta\lambda$  et un coefficient de dispersion chromatique  $M(\lambda)$  donnés, la valeur maximale du produit

(débit binaire x longueur de fibre)

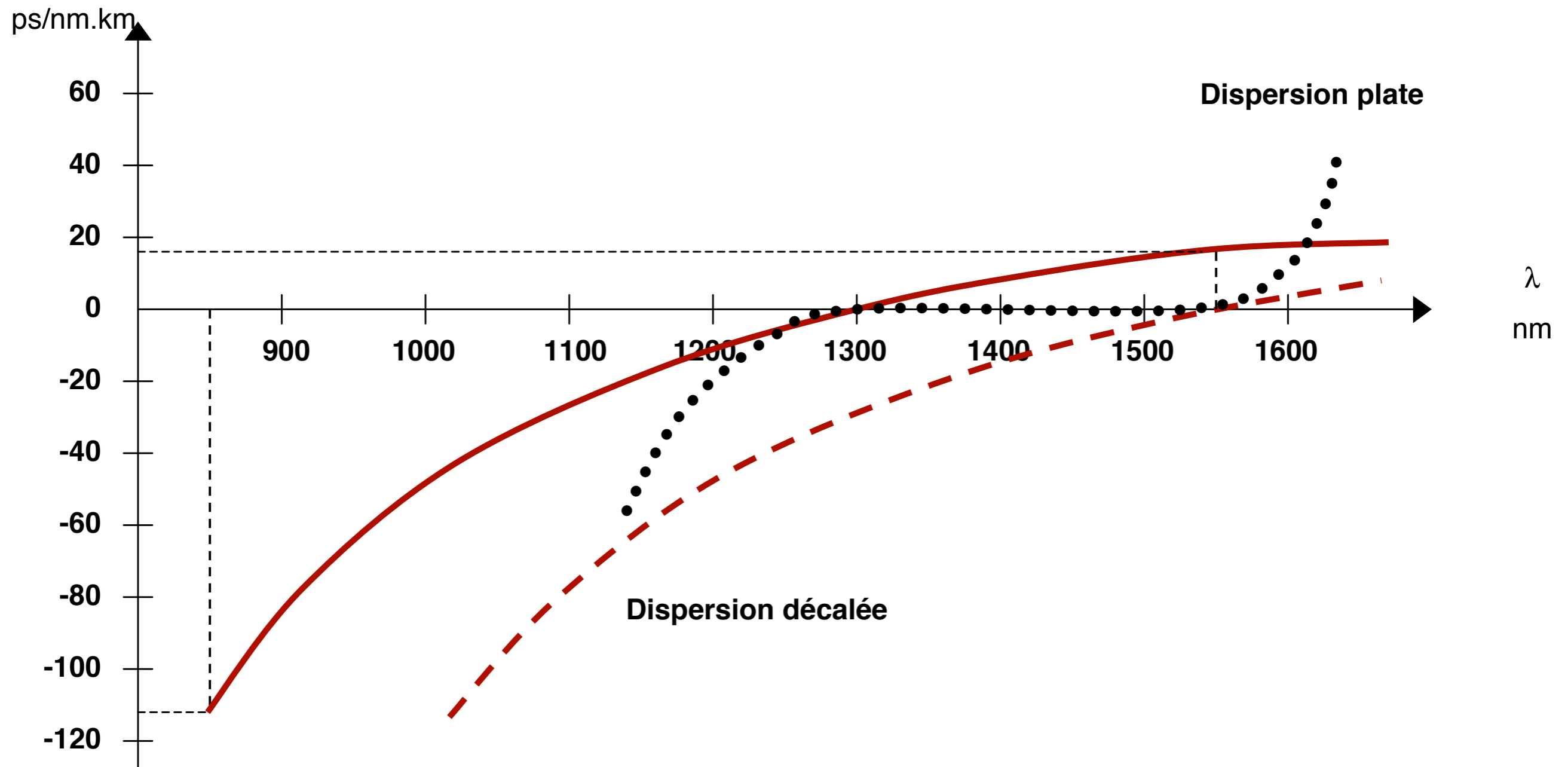
est :

$$(B.L)_{\max} = \frac{1}{2M(\lambda).\Delta\lambda}$$

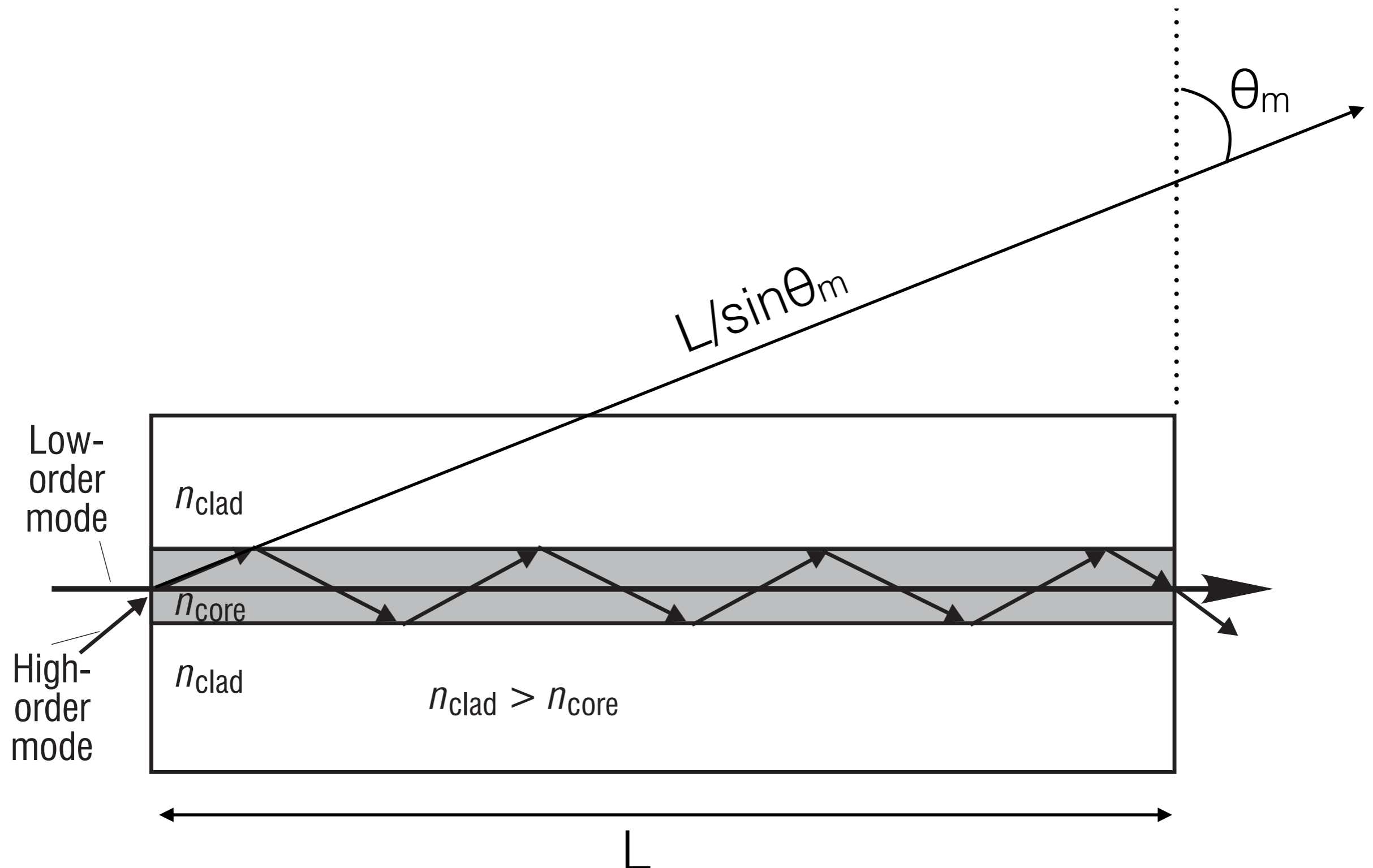
Ordre de grandeur :

La fibre monomode normalisée G652, qui équipe 85% du réseau, a un coefficient de dispersion chromatique  $M(\lambda) = 3,5 \text{ ps}/(\text{km.nm})$  dans le domaine spectral  $[1,288-1,359] \mu\text{m}$ . Pour cette même fibre, à  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $M(\lambda)$  passe à  $17 \text{ ps}/(\text{km.nm})$

# Dispersion chromatique



# Dispersion intermodale



# Dispersion intermodale

Une des causes de l'élargissement d'une impulsion est la dispersion intermodale. L'énergie lumineuse injectée à l'entrée de la fibre est répartie entre différents modes.

Les différents modes se propagent dans le cœur avec la vitesse :

$$v_m = \frac{c}{n_1} \sin \theta_m$$

$v_m$  : composante suivant l'axe  
de propagation de la vitesse

mode le plus lent :  $\theta = \theta_{\text{lim}}$ , alors  $v_{\text{min}} = c/n_1 \cdot \sin \theta_{\text{lim}}$

mode le plus rapide :  $\theta = \pi/2$  alors  $v_{\text{max}} = c/n_1$

après un trajet d'une distance  $L$ , le décalage est :  
pour une fibre à saut d'indice.

$$\Delta\tau = \frac{L}{c} \frac{n_1(n_1 - n_2)}{n_2}$$

# Bande passante des fibres

**Fibres monomodes**

$$B = \frac{0,35}{M(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L}$$

**Fibres multimodes à saut d'indice**

$$B = \frac{B_0}{L^\gamma}$$

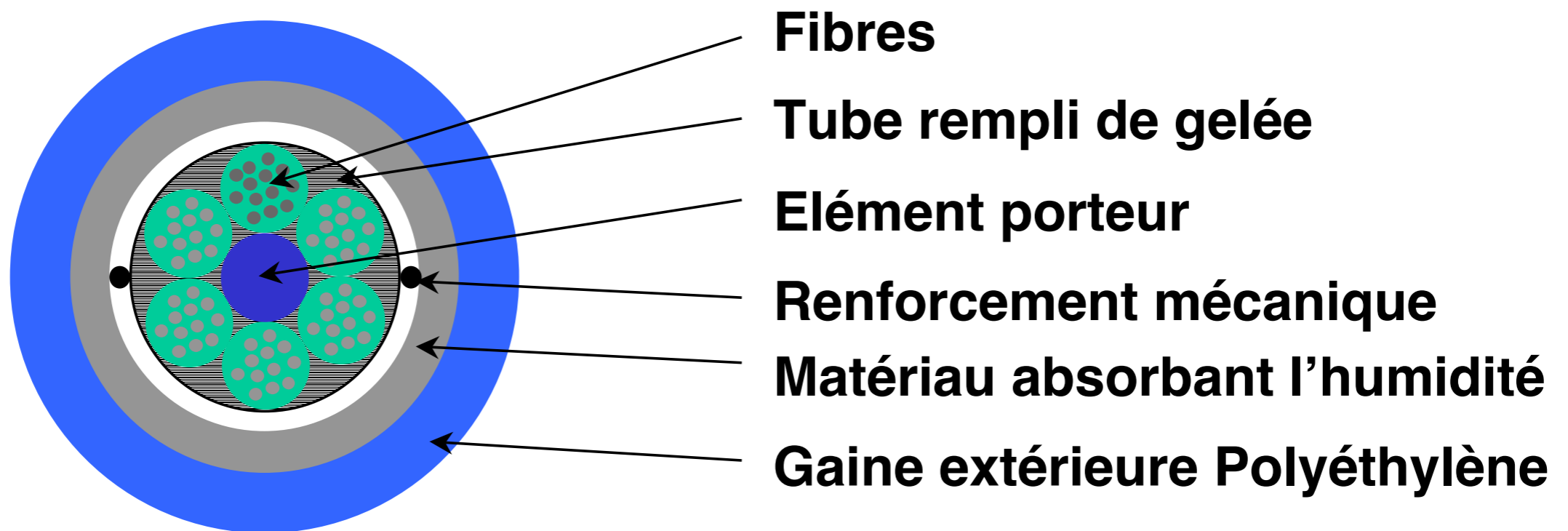
**Fibres multimodes à gradient d'indice**

$$B = \frac{1}{\sqrt{\frac{L^{2\gamma}}{B_0^2} + \frac{M^2(\lambda) \cdot \Delta\lambda^2 \cdot L^2}{0,35^2}}}$$

$\Delta\lambda$ ,  $B_0$  et  $\gamma$  sont fournis par le constructeur

# Câblage

- La technique de câblage la plus utilisée aujourd'hui est le tube. Un câble typique est représenté :



- La fibre est posée en long dans des tubes remplis d'une gelée de pétrole, qui la protège de l'humidité. De nombreux types de câbles peuvent être réalisés par assemblage de ces tubes.



# Raccordement

- **La technique de base utilisée pour l'épissurage est la soudure par arc électrique. Des connecteurs sont utilisés seulement dans les terminaux.**
- **De nombreux modèles commerciaux de soudeuses existent sur le marché, elles se groupent en deux types principaux :**
  - **Les soudeuses passives : les fibres dénudées sont placées dans des «V» de positionnement fixes. La qualité dépend alors beaucoup :**
    - **De la précision du diamètre extérieur**
    - **De la concentricité cœur/fibre**
  - **Les soudeuses actives, où les «V» de positionnement sont mobiles et leur position ajustée pour optimiser le positionnement du cœur (en général par injection/détection)**
- **Dans les deux cas, la qualité de la soudure dépend beaucoup de la coupe, de la propreté de la fibre et de l'état de la soudeuse.**

# Transmission sur fibre optique

**Performances actuelles :**

**Les fibres monomodes qui satisfont aux spécifications de l'UIT ont un coefficient de dispersion maximum  $D$  de 3,5 ps/(km.nm), à  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$  pour la fibre G652 ou à  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  pour la G653 (fibre à dispersion décalée).**

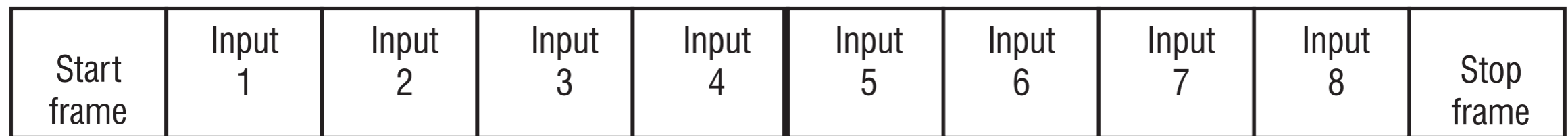
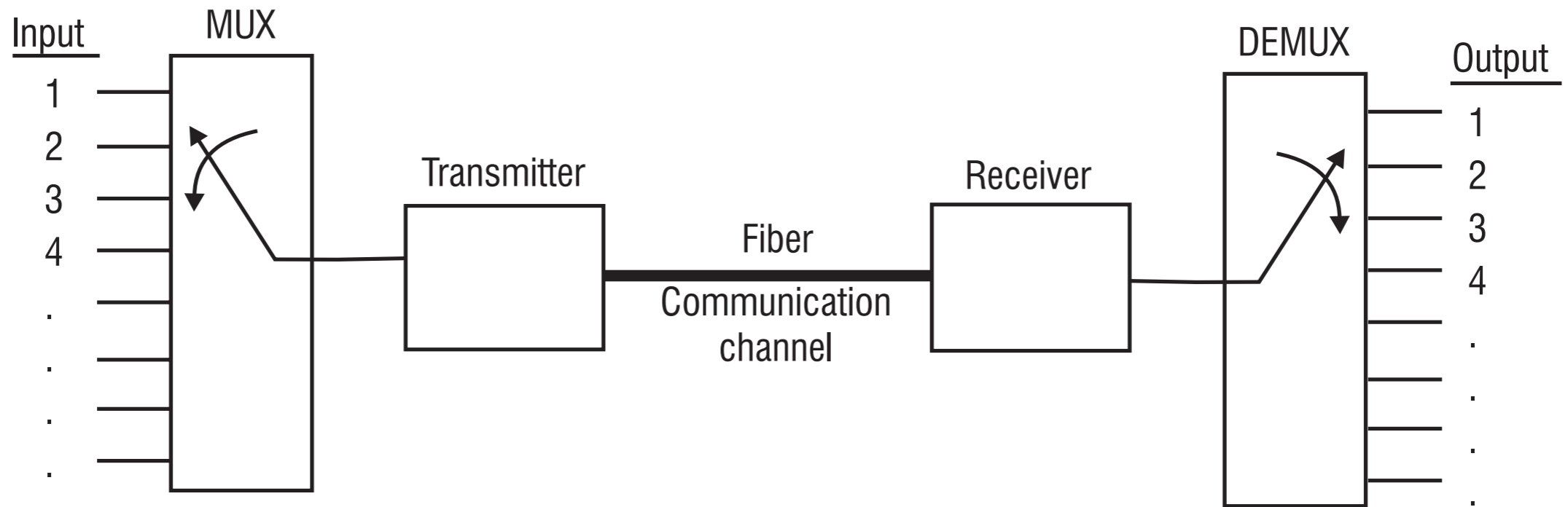
**Si la source a une largeur spectrale  $\Delta\lambda$  de l'ordre de 0,5 nm, on obtient le produit (débit binaire)x(longueur de fibre) :**

$$(BL)_{\max} = \frac{1}{2D\Delta\lambda} \approx 570 \text{ Gbit / s}$$

**Transmission à environ 10 Gbit/s pour des distances de 50 à 100 km entre régénérateurs**

# Multiplexage temporel

## Time-Division Multiplexing (TDM)



Transmitted frame

# Multiplexage en longueur d'onde Wavelength-Division Multiplexing (WDM)

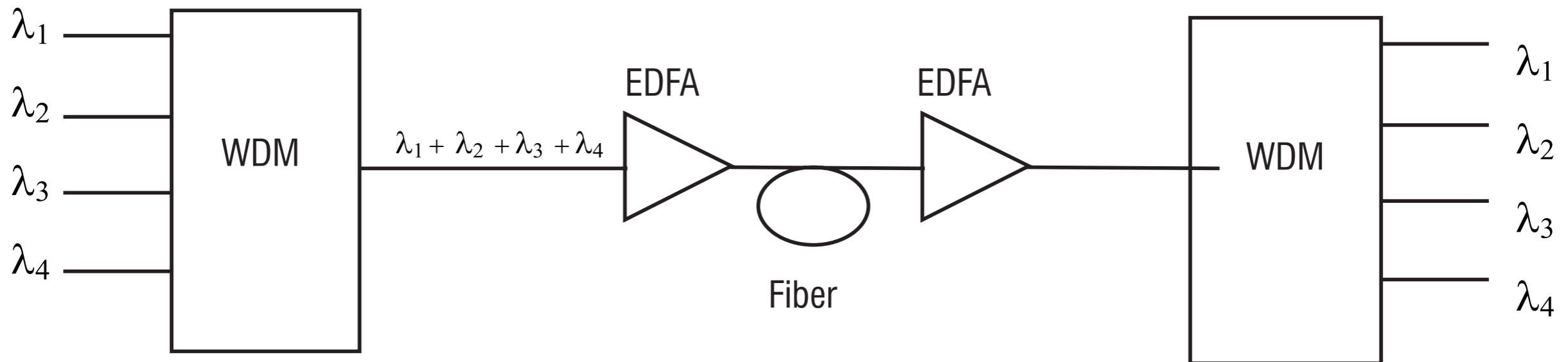
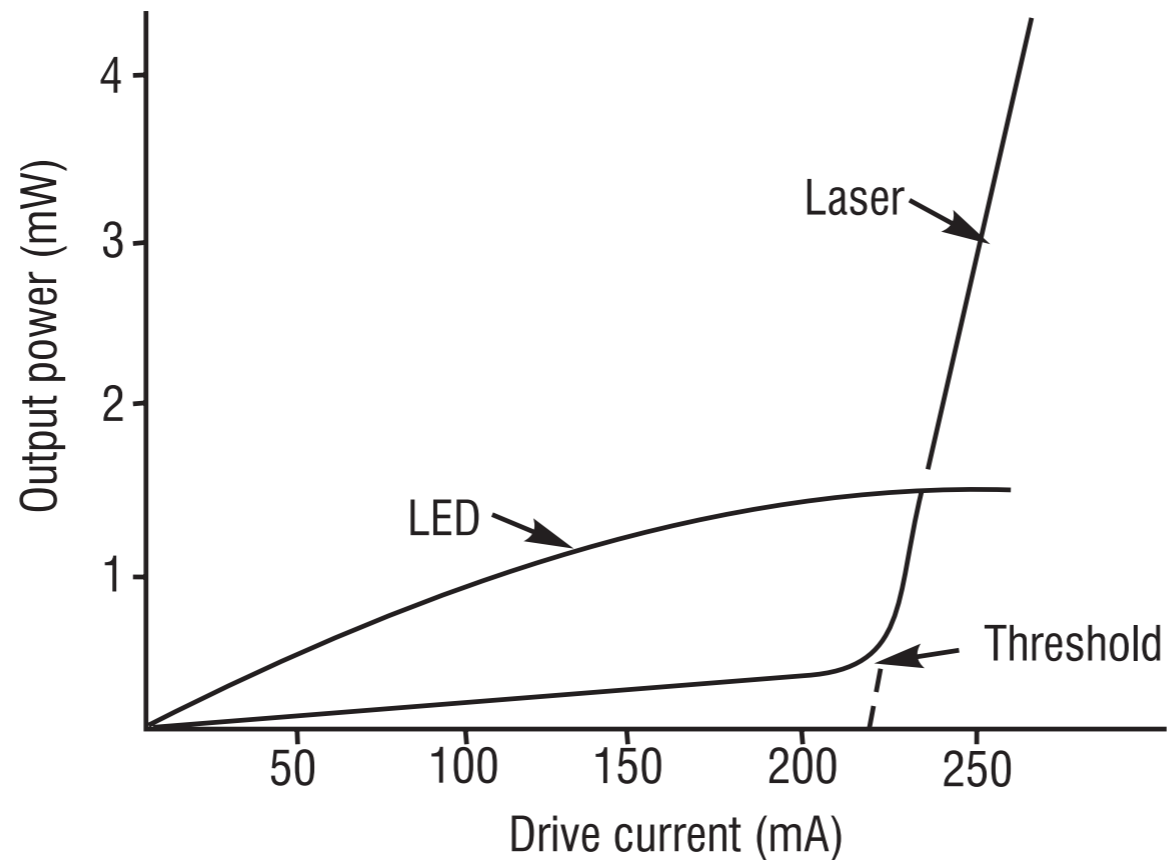


Table 8-3 ITU GRID

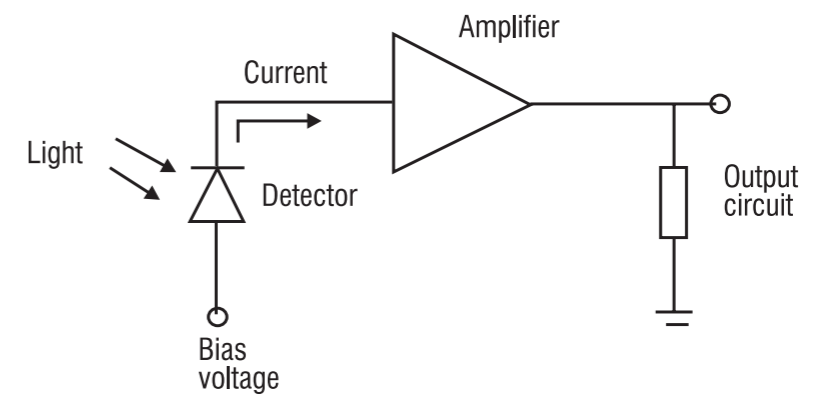
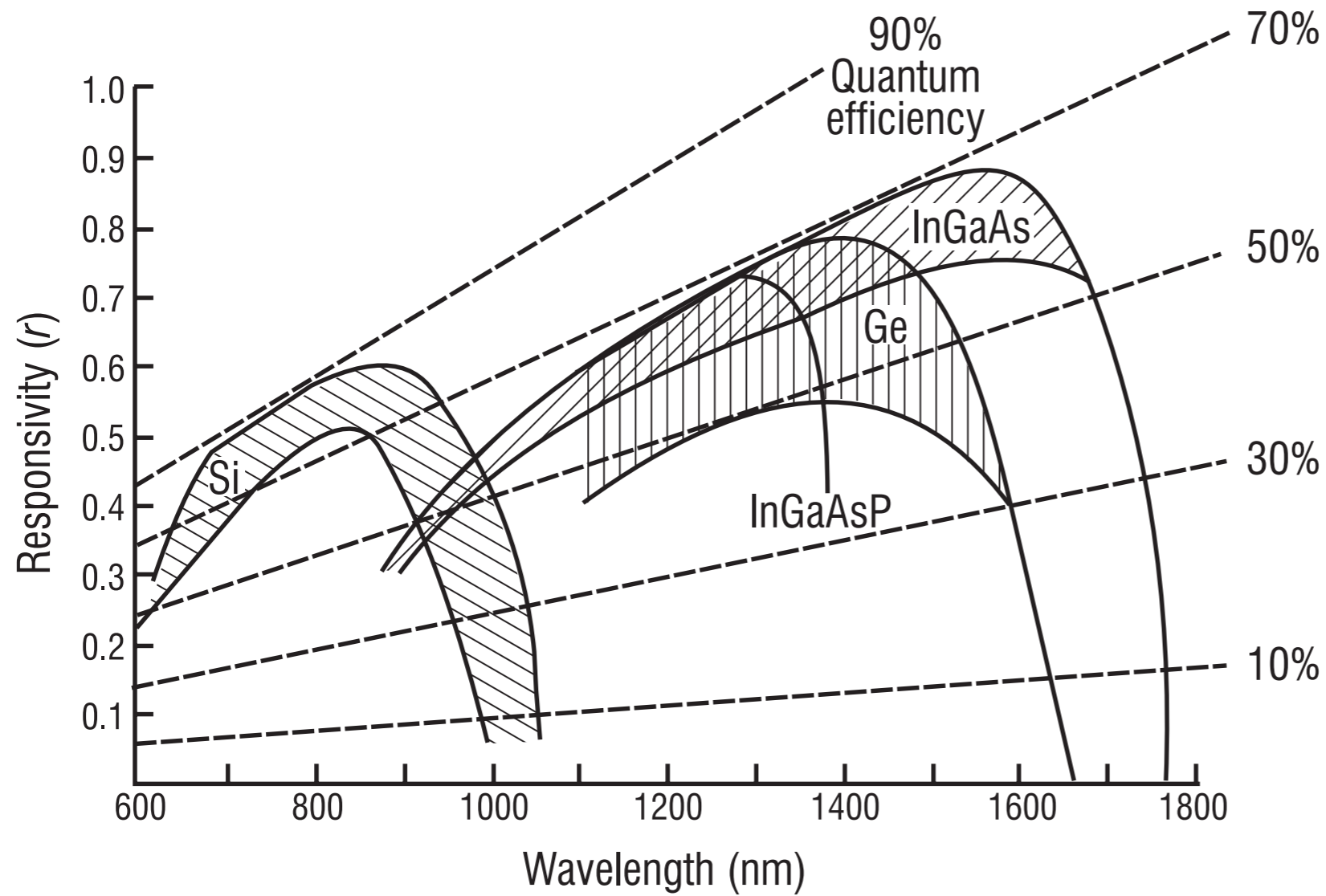
Center Wavelength – nm (vacuum)	Optical Frequency (THz)		
1530.33	195.9	1546.92	193.8
1531.12	195.8	1547.72	193.7
1531.90	195.7	1548.51	193.6
1532.68	195.6	1549.32	193.5
1533.47	195.5	1550.12	193.4
1534.25	195.4	1550.92	193.3
1535.04	195.3	1551.72	193.2
1535.82	195.2	1552.52	193.1
1536.61	195.1	1553.33	193.0
1537.40	195.0	1554.13	192.9
1538.19	194.9	1554.93	192.8
1538.98	194.8	1555.75	192.7
1539.77	194.7	1556.55	192.6
1540.56	194.6	1557.36	192.5
1541.35	194.5	1588.17	192.4
1542.14	194.4	1558.98	192.3
1542.94	194.3	1559.79	192.2
1543.73	194.2	1560.61	192.1
1544.53	194.1	1561.42	192.0
1545.32	194.0	1562.23	191.9
1546.12	193.9	1563.05	191.8
		1563.86	191.7

# Sources de lumière

Characteristic	LED	Laser
Output power	Lower	Higher
Spectral width	Wider	Narrower
Numerical aperture	Larger	Smaller
Speed	Slower	Faster
Cost	Less	More
Ease of operation	Easier	More difficult



# DETECTEURS



## Example 8

A system has the following characteristics:

LED power ( $P_L$ ) = 2 mW (3 dBm)

LED to fiber loss ( $L_{sf}$ ) = 3 dB

Fiber loss per km ( $F_L$ ) = 0.5 dB/km

Fiber length ( $L$ ) = 40 km

Connector loss ( $L_{conn}$ ) = 1 dB (one connector between two 20-m fiber lengths)

Fiber to detector loss ( $L_{fd}$ ) = 3 dB

Receiver sensitivity ( $P_s$ ) = -36 dBm

Find the loss margin.

### Solution:

$$L_m = 3 \text{ dBm} - 3 \text{ dB} - (40 \text{ km} \times 0.5 \text{ dB/km}) - 1 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - (-36 \text{ dBm}) = 12 \text{ dB}$$

This particular fiber optic loss budget is illustrated in Figure 8-32, with each loss graphically depicted.

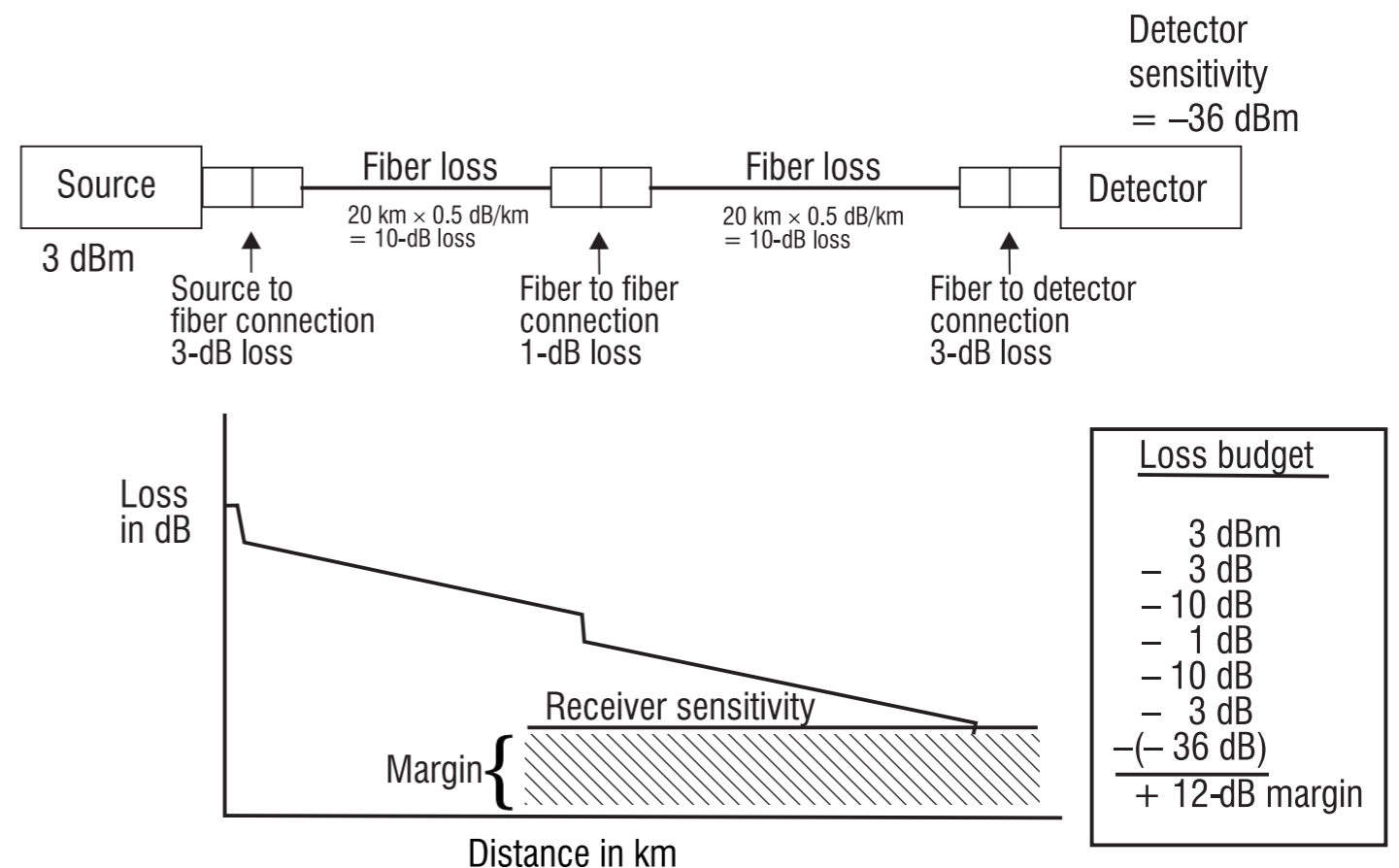
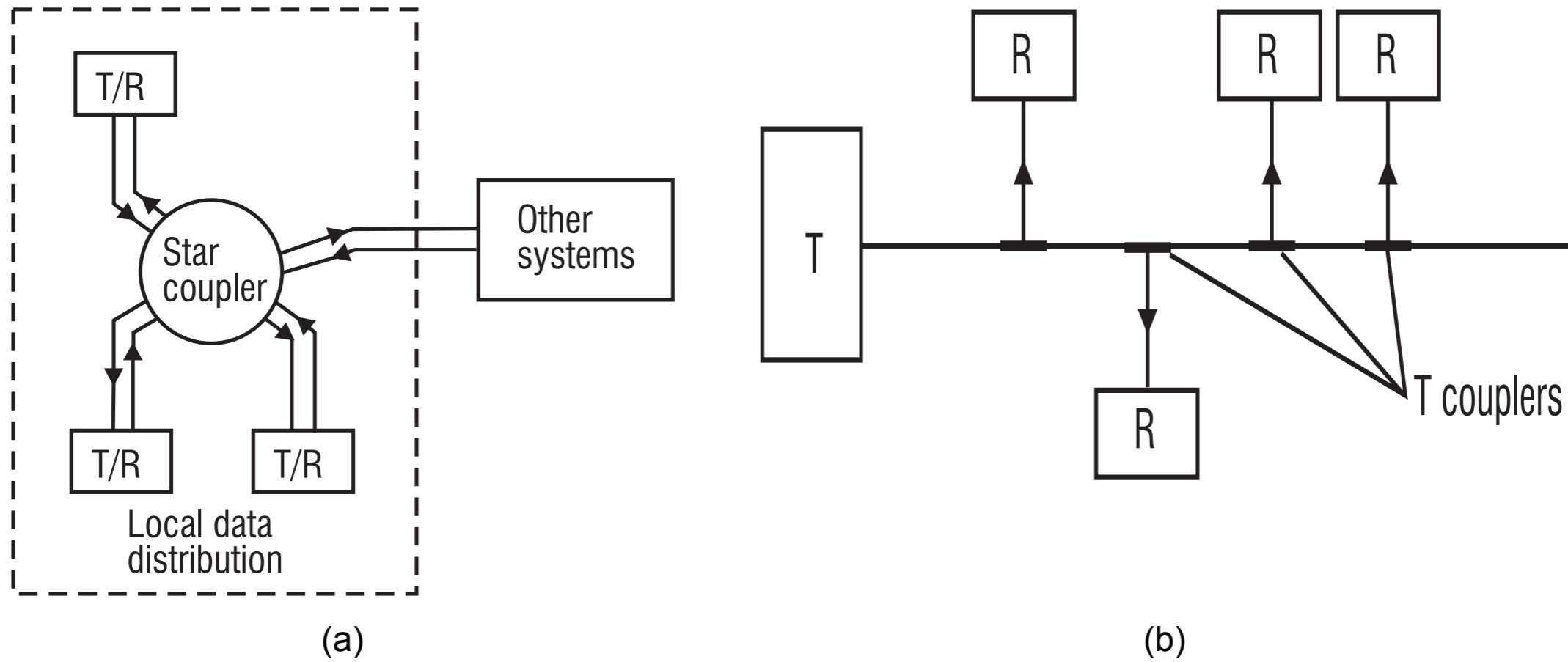


Figure 8-32 Fiber optic loss budget

# Coupleurs

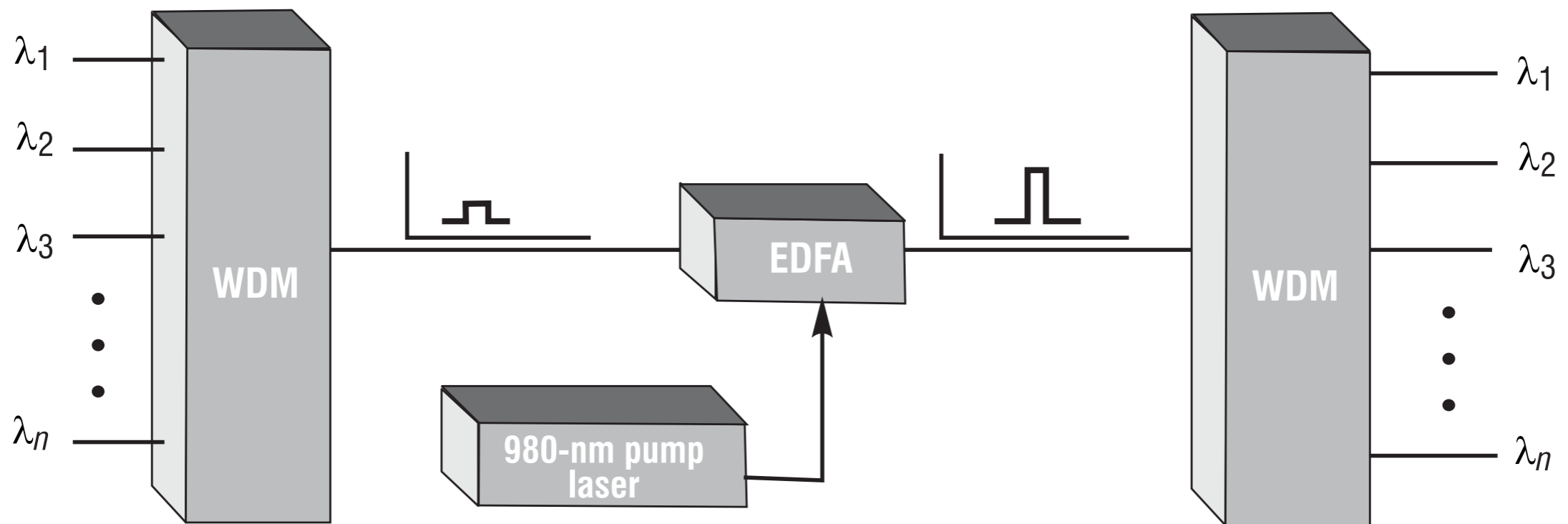


**Figure 8-35** (a) *Star coupler* (b) *T-coupler*



# Multiplexeurs de longueur d'onde

## Wavelength-Division Multiplexers



**Figure 8-39** *Wavelength-division multiplexing system using EDFAs*