

Master 2 - SME

# Systemes Optroniques

(Les systemes de telecommunications optiques)

Philippe ARGUEL  
arguel@laas.fr

## Systemes de Telecommunications Optiques

- ➡ \* Evolution des communications optiques
- ➡ \* Rappel de physique des semiconducteurs
- ➡ \* Récepteurs
- ➡ \* Emetteurs
- ➡ \* Modulation optique
- ➡ \* Fibres optiques
- ➡ \* Isolateur optique
- ➡ \* Coupleurs et commutateurs
- ➡ \* Multiplexeurs et demultiplexeurs
- ➡ \* Régénération de signaux optiques
- ➡ \* Amplificateurs à fibre optique dopée
- ➡ \* Bilan d'une liaison optique

## Télécommunications Optiques ?

*Rappel de quelques notions...*

Signalisation :



Communication :



Télécommunication :



## Télécommunications optiques ? (2)

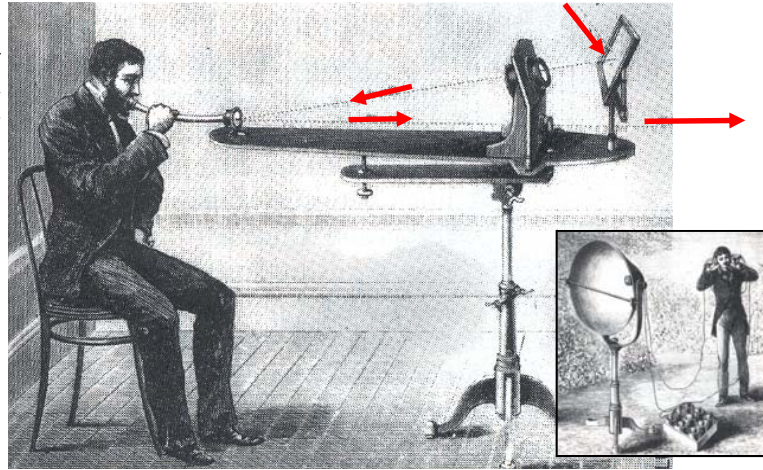
Télégraphe Chappe (1791)



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

## Approche des télécommunications optiques (1)

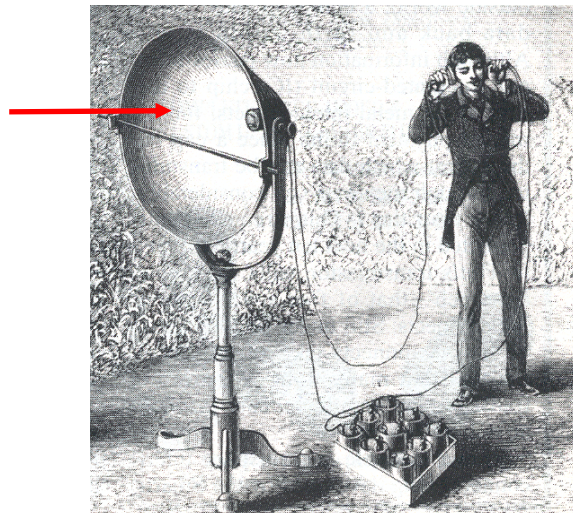
Alexander  
Graham  
BELL



1<sup>ère</sup> expérience : Photophone de BELL en 1880

## Approche des télécommunications optiques (2)

Charles  
Sumner  
TAINTER



1<sup>ère</sup> expérience : Photophone de BELL en 1880  
(portée > 200 m ; détection par Sélénium)

# Télécommunications

=> modulation d'une onde porteuse

Forme générale d'une onde :  $f(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ , avec  $\omega = 2\pi\nu$

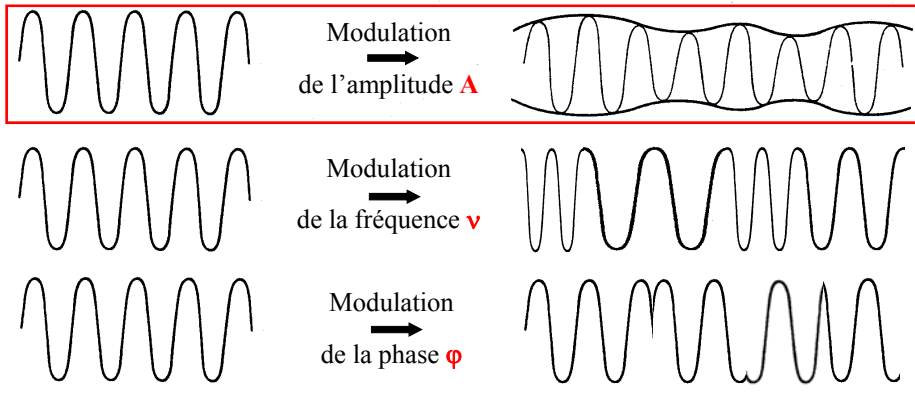
=> on peut moduler : l'amplitude (**A**), la fréquence (**ν**) ou la phase (**φ**)

Onde originale

dite «porteuse»

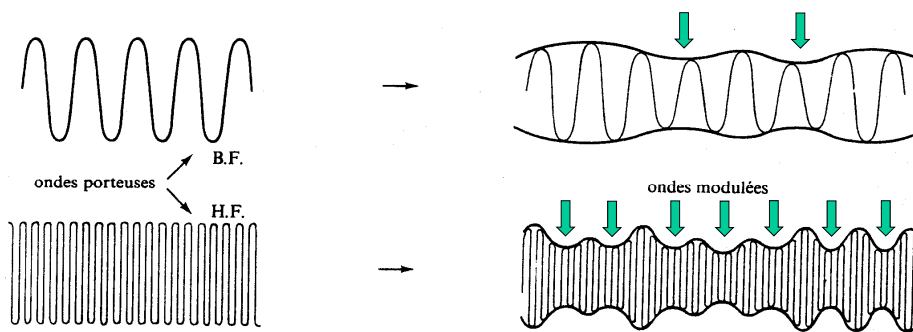
(**A**, **ν** et **φ** fixés)

Onde modulée



# Télécommunications optiques

➡ essentiellement modulation d'amplitude

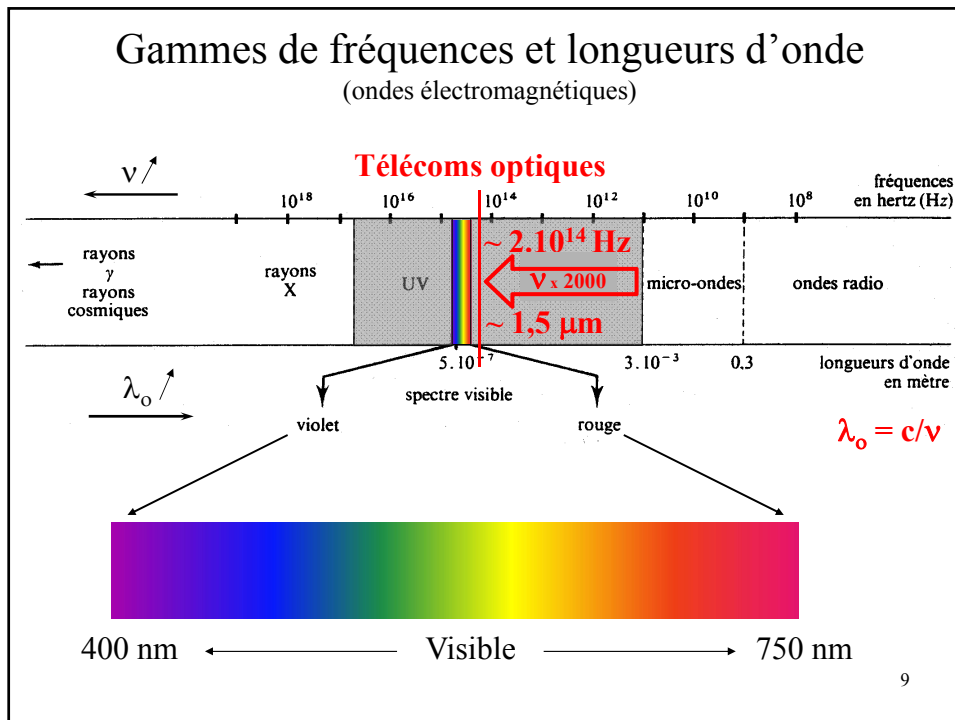


La fréquence de modulation peut ↑ si la fréquence de la porteuse ↑



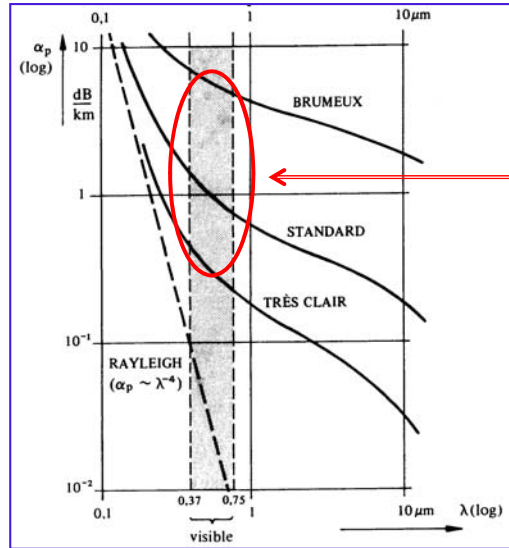
**Intérêt des fréquences optiques**

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



- ### 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
  - ➡ Elargissement 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. ~ 0,5 à 5 dB/km

## Evolution des communications optiques (1)

- Laser (1960) et diode laser (1962) → essais de liaisons en espace libre

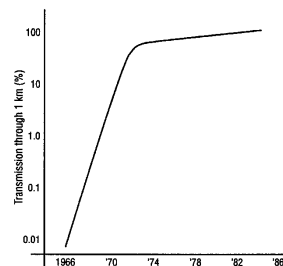
- Amélioration de la qualité des fibres optiques (atténuation ↘ et résistance mécanique ↗)

+

Fonctionnement continu des diodes laser à température ambiante



1<sup>ère</sup> application télécom dans les années 70



- Développements industriels (FO + DL + connecteurs + composants passifs)



Premières liaisons commerciales en 1980

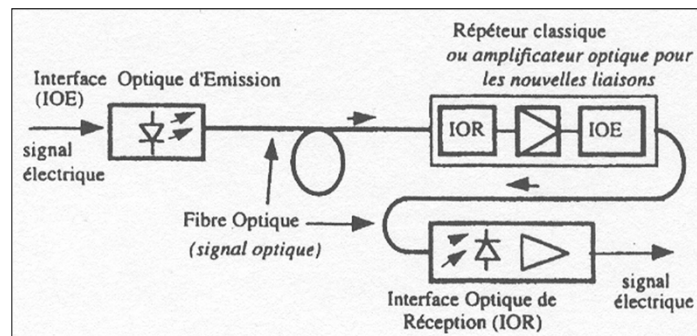
## Evolution des communications optiques (2)

A partir de 1990 : maîtrise et développement de l'amplification optique



En 1995 : mise en service de liaisons transocéaniques « tout optique »

### Système de transmission sur fibre optique



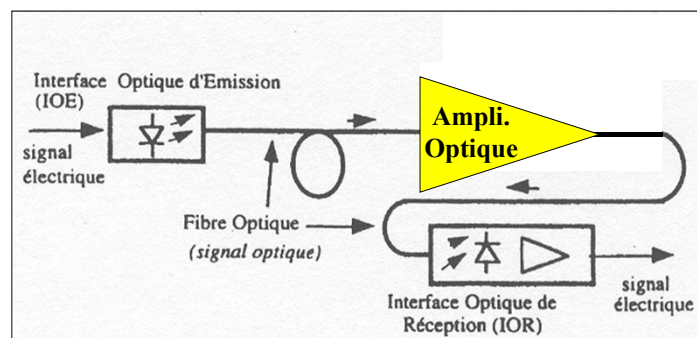
## Evolution des communications optiques (2)

A partir de 1990 : maîtrise et développement de l'amplification optique



En 1995 : mise en service de liaisons transocéaniques « tout optique »

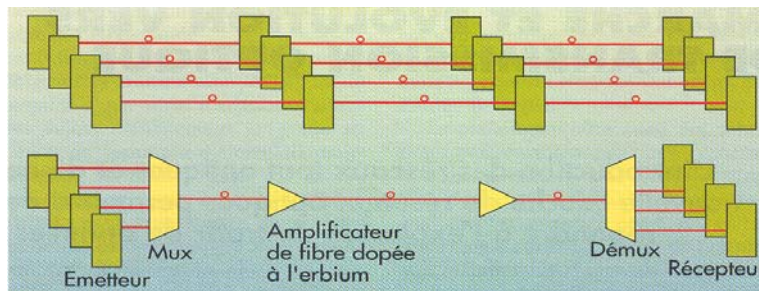
### Système de transmission sur fibre optique



## Evolution des communications optiques (3)

### Le multiplexage

- 1980/90 : multiplexage temporel (MRT ou TDM)  
→ la capacité est doublée tous les 3 à 5 ans
- Début des années 90 : prévision de forte croissance du trafic  
→ nécessité d'une nouvelle technologie  
→ multiplexage en longueur d'onde (WDM puis DWDM)  
(en 1996 : systèmes WDM à 16 canaux + ampli. optique)



## Intérêts des fibres optiques

- Affaiblissement minimum du signal optique  
*~ 0,2 dB/km @ 1,55  $\mu$ m, pour fibre optique en silice*
- Très grande bande passante  
*possibilité de multiplexage en  $\lambda$  => 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

	<b>Paire télépho- nique</b>	<b>Paire blindée</b>	<b>Câble coaxial</b>	<b>Fibre optique</b>	<b>Ligne à bandes</b>
Bande passante (MHz)	<i>2</i> <i>(100 ADSL)</i>	<i>100</i>	<i>300</i> <i>à plusieurs</i> <i>GHz</i>	<i>10 à</i> <i>60 GHz</i>	<i>10 à</i> <i>100 GHz</i>
Affaiblis- sment (10 GHz, dB/km)			<i>1000</i>	<i>&lt; 1</i>	<i>10000</i>
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</i> <i>à fort</i>	<i>modéré</i>	<i>faible</i>

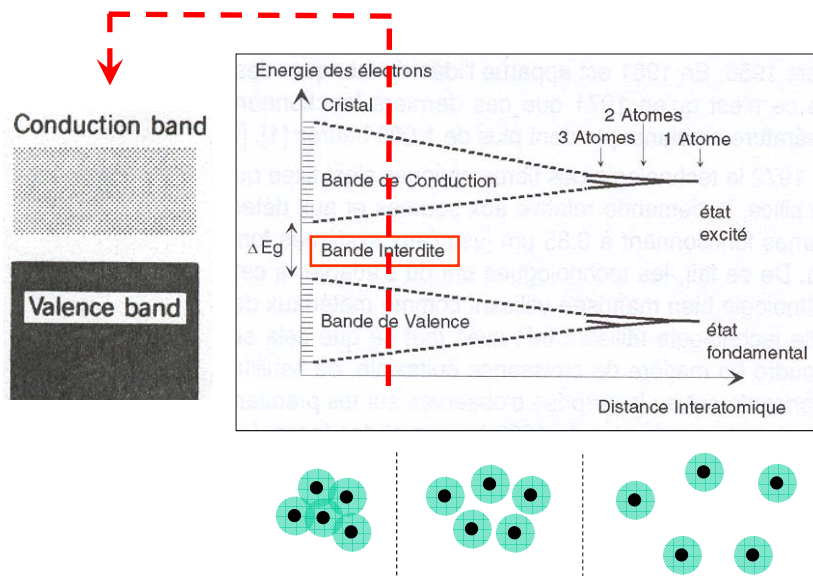
**150 millions de km de fibres installés dont quelques millions  
de km sous-marins ; 15000 km en plus par jour ...**



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

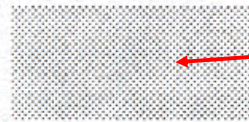
# Rappel de physique des semiconducteurs

## Niveaux d'énergie dans un semiconducteur (1)



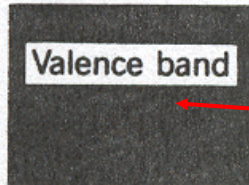
## Niveaux d'énergie dans un semiconducteur (2)

Conduction band



Les électrons de la BC sont quasi-libres et contribuent efficacement au transport électrique

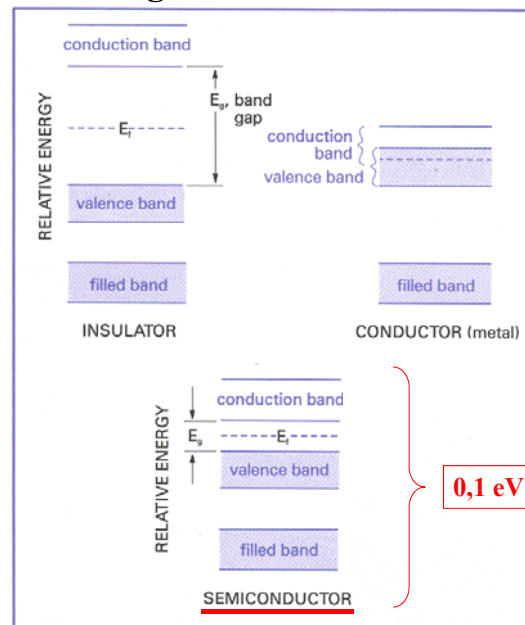
Bande (d'énergie) interdite



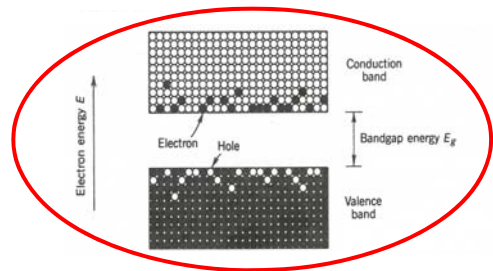
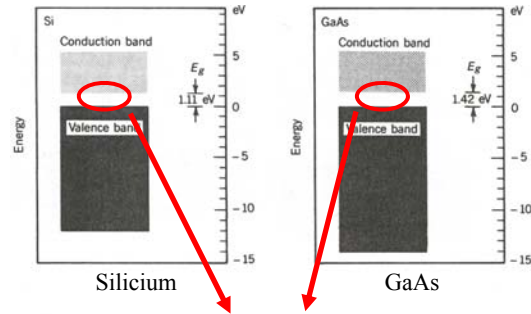
Valence band

Les électrons de la BV contribuent à la cohésion du cristal

## Energie de bande interdite

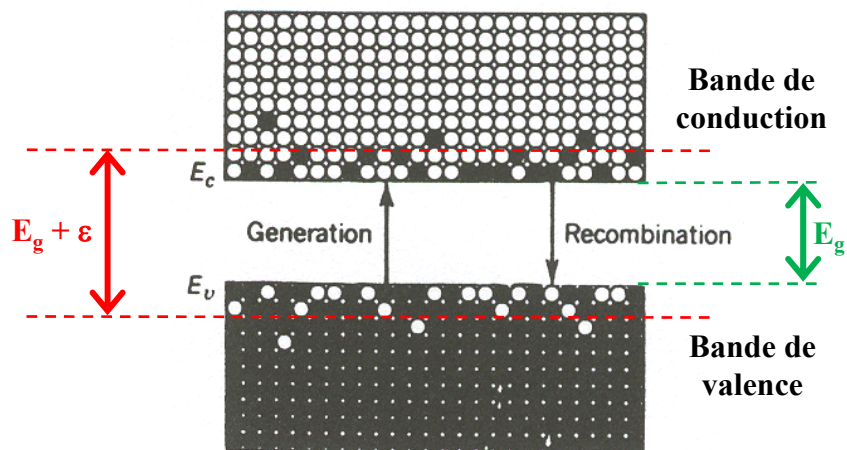


## Païres électron/trou

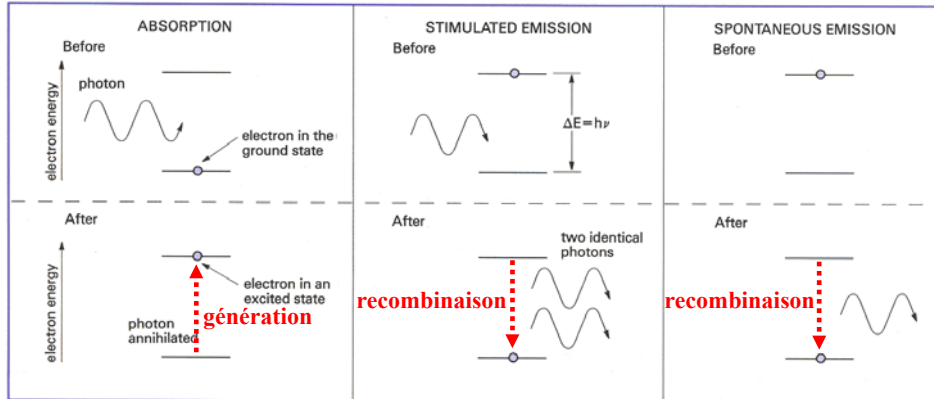


*Génération et Recombinaison de paires électron/trou*

## Génération et recombinaison de paires électron/trou



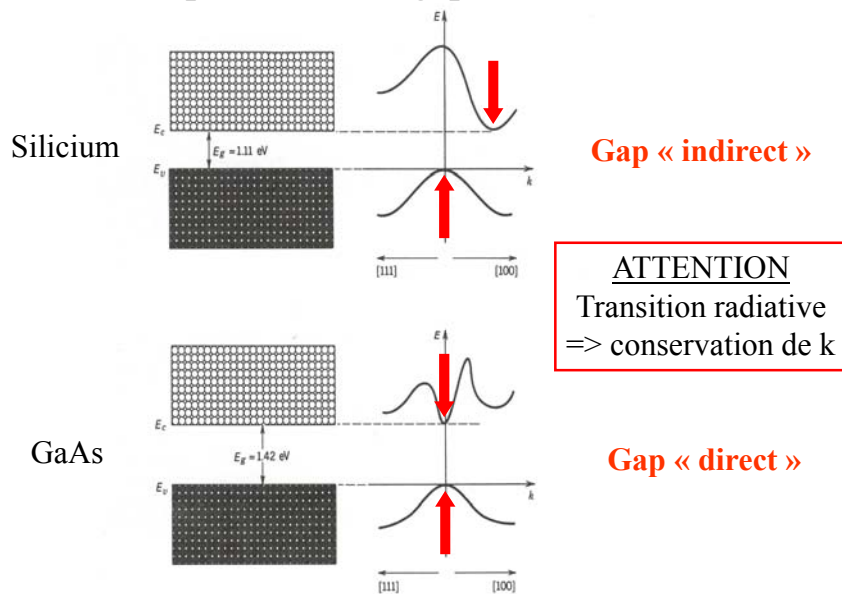
## Les trois types de transitions radiatives



THE THREE TYPES of optical transition. In all cases, the photon frequency is equal to  $\Delta E/h$ , where  $\Delta E$  is the energy difference between the two states involved, and  $h$  is Planck's constant. In the stimulated emission case, all other scalar and vector properties of the "new" photon are identical to those of the stimulating photo, i.e. exact amplification.

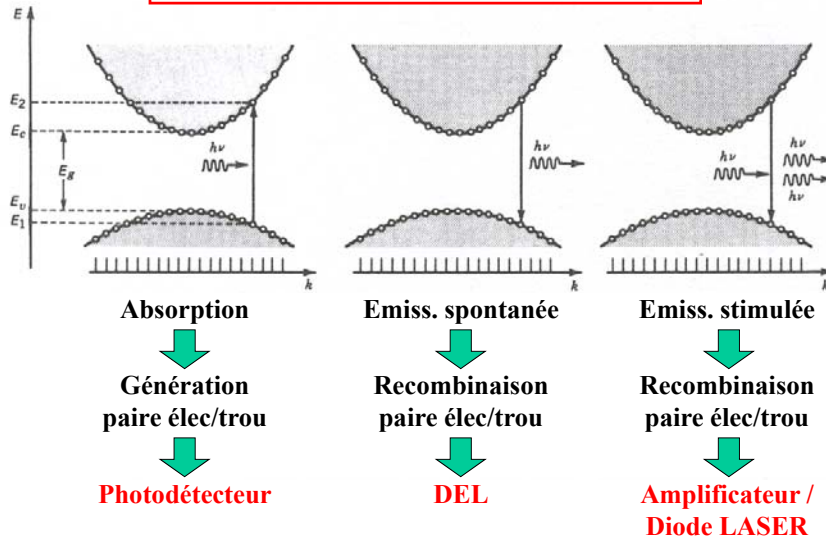
$$\nu = \Delta E/h \quad \Rightarrow \quad \Delta E = hc/\lambda_0 \quad \Rightarrow \quad \Delta E(eV) = 1,24/\lambda_0(\mu m)$$

## Gap « direct » et gap « indirect »



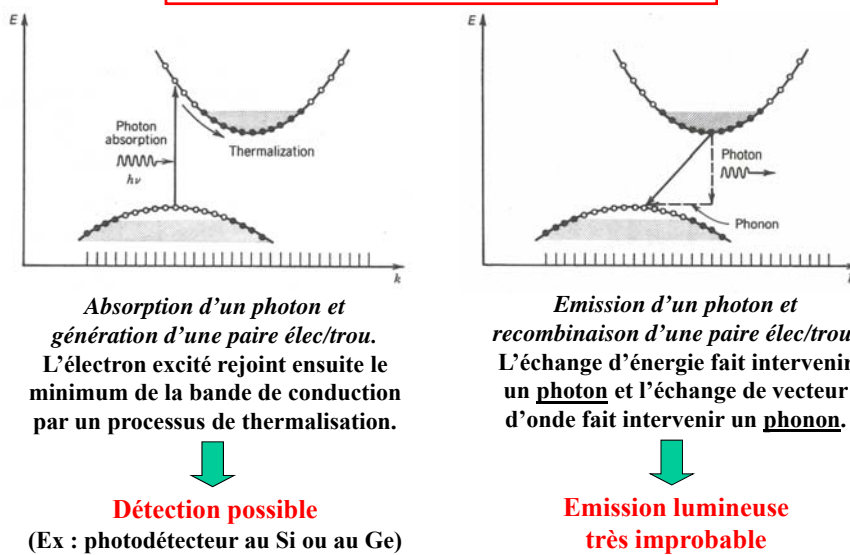
## Transitions radiatives dans un matériau à gap direct

Transition radiative => conservation de k



## Transitions radiatives dans un matériau à gap indirect

Transition radiative => conservation de k



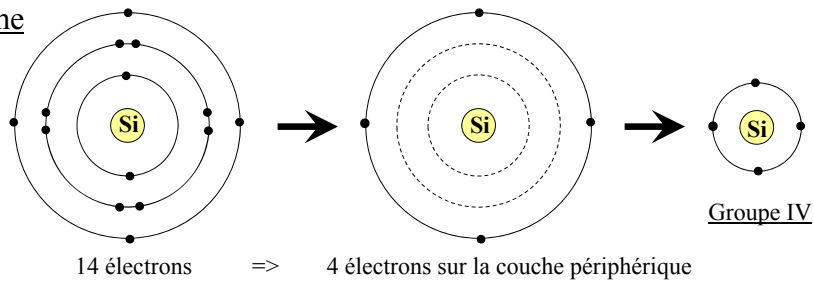
## Caractéristiques de quelques matériaux

II	III	IV	V	VI
Zinc (Zn)	Aluminum (Al) Gallium (Ga)	Silicon (Si) Germanium (Ge)	Phosphorus (P) Arsenic (As)	Sulfur (S) Selenium (Se)
Cadmium (Cd)	Indium (In)		Antimony (Sb)	Tellurium (Te)
Mercury (Hg)				

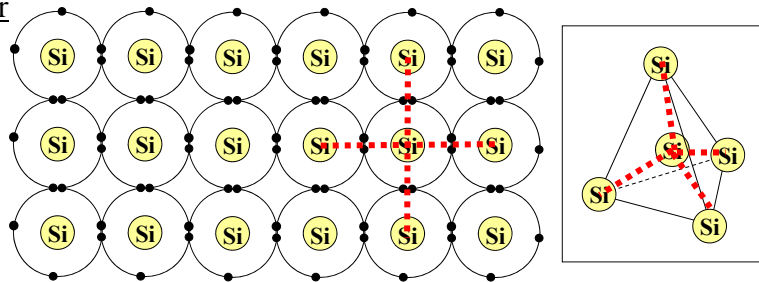
Matériau	Type	Gap	Eg à 300K
Si	IV	Indirect	1,14 eV
Ge	IV	Indirect	0,67 eV
InP	III-V	Direct	1,35 eV
InAs	III-V	Direct	0,35 eV
GaAs	III-V	Direct	1,43 eV
CdTe	II-VI	Direct	1,45 eV

### Ex : Silicium intrinsèque

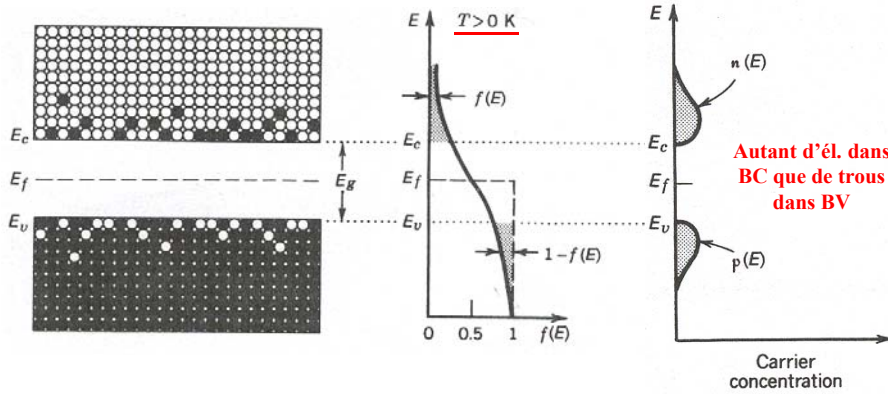
Atome



Cristal pur  
(T = 0 K)



## Semiconducteur intrinsèque

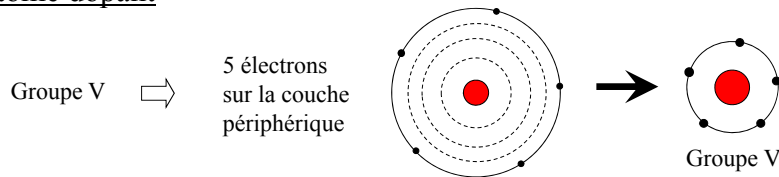


$f(E)$  = probabilité pour que le niveau d'énergie  $E$  soit occupé par 1 électron  
 $f(E)$  = fonction de FERMI

$E_f$  = niveau d'énergie dont la probabilité d'occupation est égale à 1/2  
 $E_f$  = niveau de FERMI

### Ex : Silicium dopé N

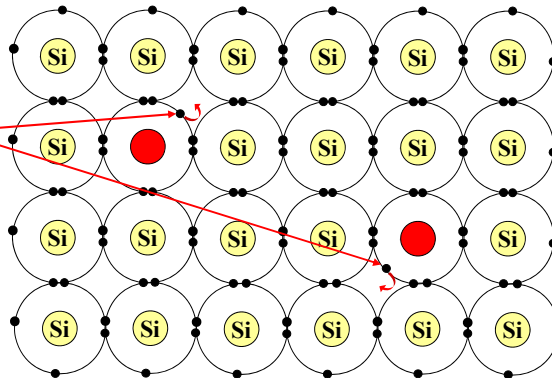
Des atomes de silicium sont remplacés par des atomes du groupe V  
Atome dopant



### Cristal dopé N

Electrons quasi-libres

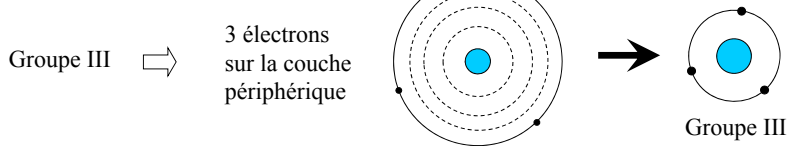
$\Downarrow$   
 électrons dans la bande de conduction à 300 K





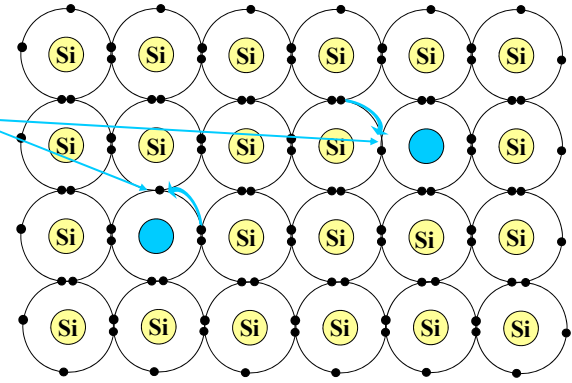
### Ex : Silicium dopé P

Des atomes de silicium sont remplacés par des atomes du groupe III  
Atome dopant



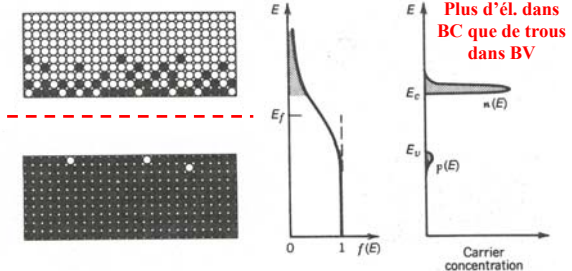
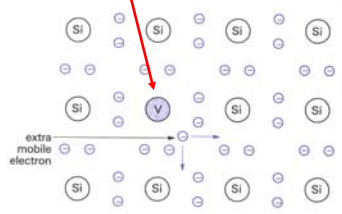
### Cristal dopé P

Liaisons de valence incomplètes  
 $\Downarrow$   
 trous dans la bande de valence  
 $\Downarrow$   
 déplacement de charges dans la bande de valence

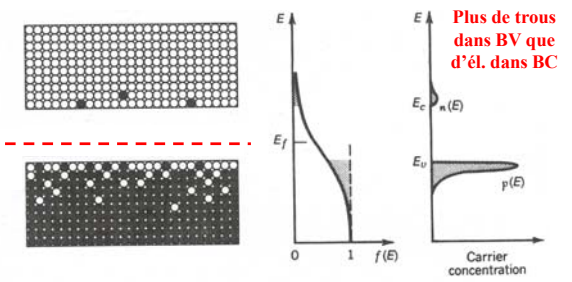
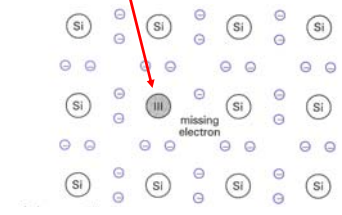


### Semiconducteur dopé

#### Dopage N



#### Dopage P



### Ex : Concentrations d'atomes et de porteurs dans le silicium

#### Silicium pur

Nombre d'atomes de silicium par  $\text{cm}^3$  :  $5 \cdot 10^{22}$

Nombre d'électrons libres par  $\text{cm}^3$  à 300K :  $1,5 \cdot 10^{10}$

Nombre de trous par  $\text{cm}^3$  à 300K :  $1,5 \cdot 10^{10}$



~ 3 paires « électron/trou » pour 1000 milliards d'atomes de Si à 300K

#### Silicium dopé

Dopage faible :  $10^{15}$  atomes dopants par  $\text{cm}^3$

Dopage fort :  $10^{18}$  atomes dopants par  $\text{cm}^3$



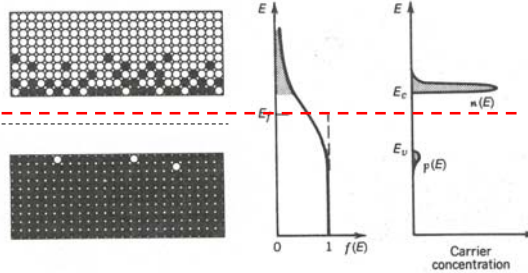
Propriétés électroniques bouleversées

### Vers la jonction PN (rappel)

Semiconducteur  
dopé N



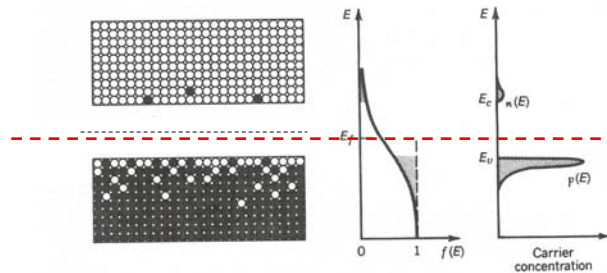
$E_f$  est décalé  
vers la BC



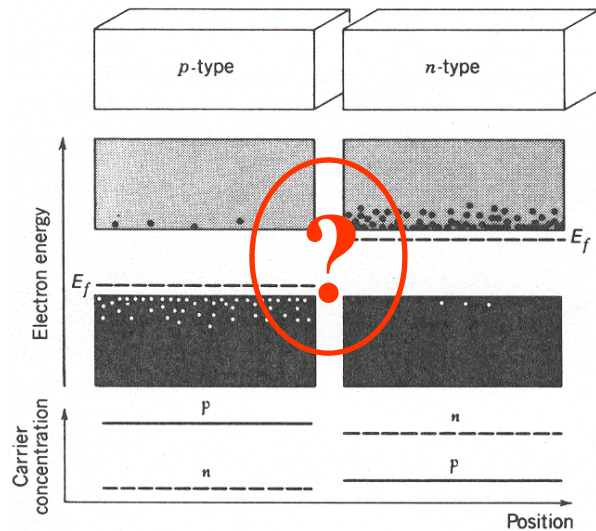
Semiconducteur  
dopé P



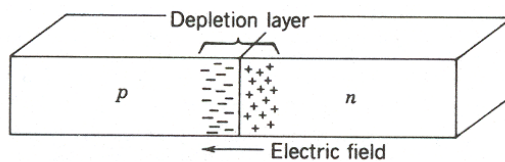
$E_f$  est décalé  
vers la BV



## Vers la jonction PN



## Jonction PN (processus d'équilibre)



Les électrons, majoritaires du côté N, diffusent en direction du côté P  
et les trous, majoritaires du côté P, diffusent en direction du côté N



**Création d'ions positifs, fixes, du côté N  
et création d'ions négatifs, fixes, du côté P**

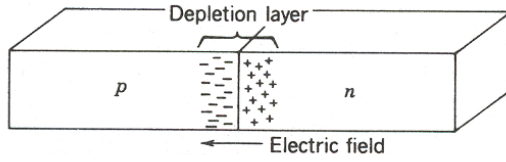


Etablissement d'un **champ électrique interne**  $\vec{E}_{int}$ , dirigé de N vers P,  
qui s'oppose à la poursuite de la diffusion ( $\vec{E}_{int} = -dV/dx$ )

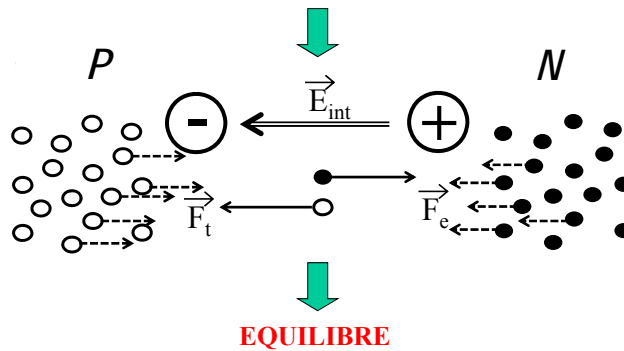


**EQUILIBRE**

## Jonction PN (processus d'équilibre)

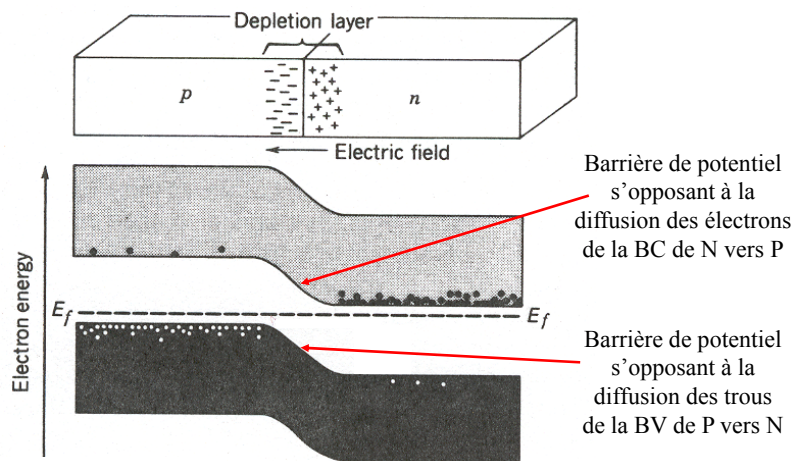


Les électrons, majoritaires du côté N, diffusent en direction du côté P et les trous, majoritaires du côté P, diffusent en direction du côté N

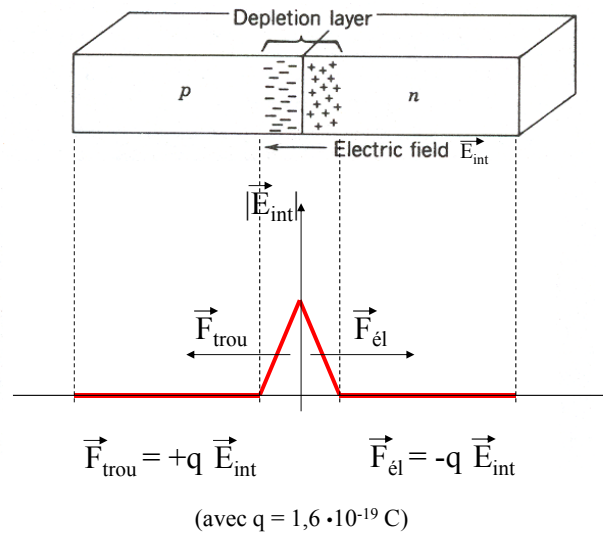


## Jonction PN (à l'équilibre)

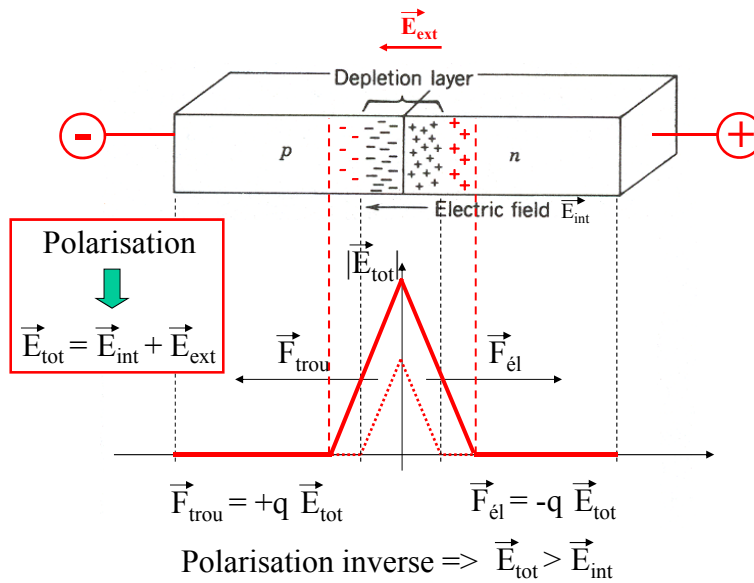
Continuité du réseau cristallin => continuité des bandes d'énergie



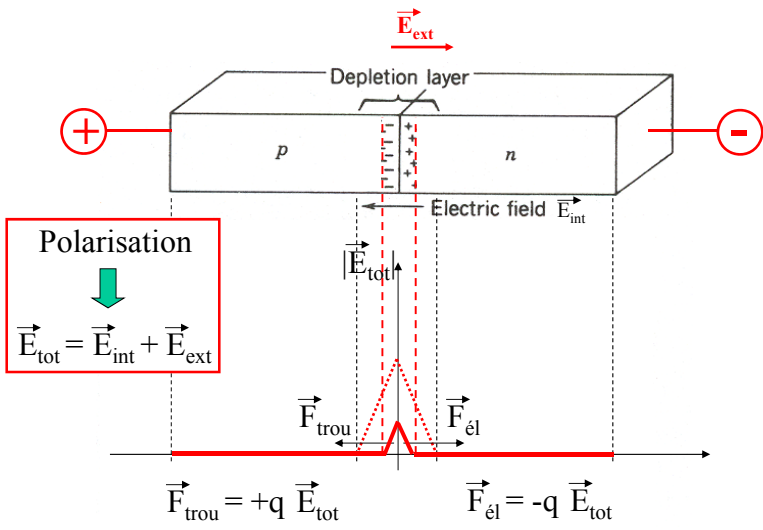
### Jonction PN à l'équilibre



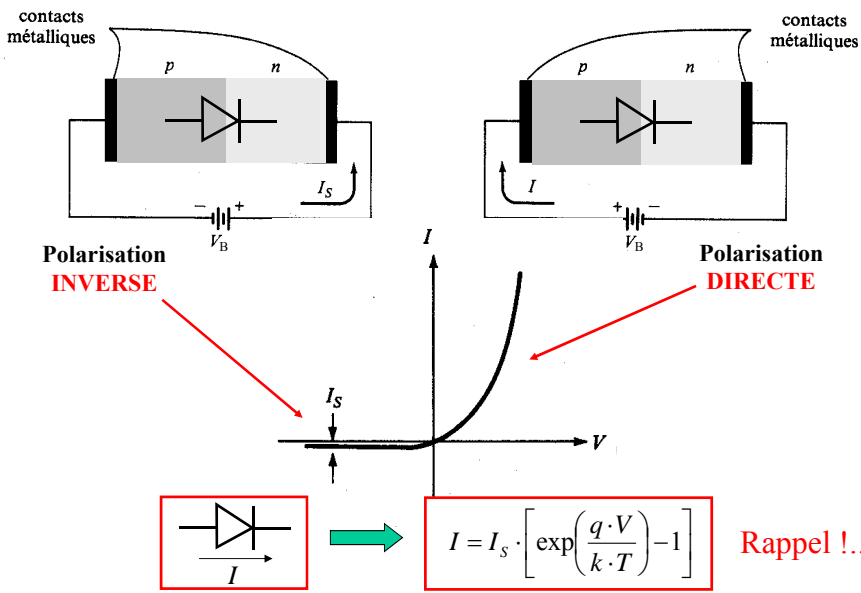
### Jonction PN polarisée en inverse



### Jonction PN polarisée en direct



### De la jonction PN à la diode

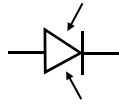


## Les diodes en optoélectronique

Les diodes permettent d'exploiter les différents types de transitions radiatives

Absorption

↓  
Photodiode

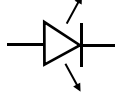


**Introduction**

*Voir développements dans le cours de Mr Cazarré*

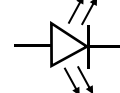
Emission spontanée

↓  
Diode électroluminescente



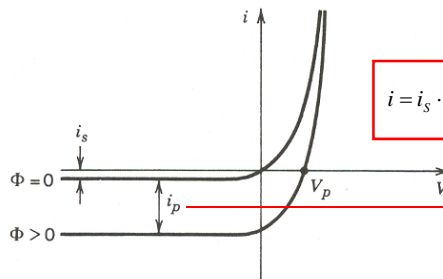
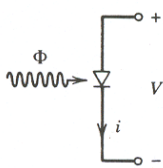
Emission stimulée

↓  
Amplificateur et Diode laser



## Photodiode (1)

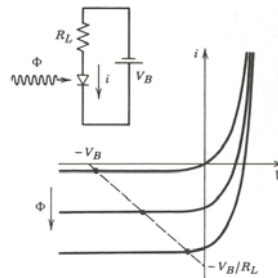
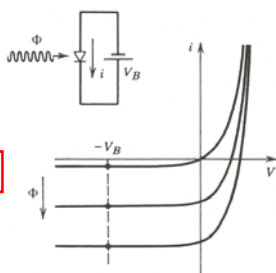
Caractéristique I(V)



$$i = i_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] - i_p$$

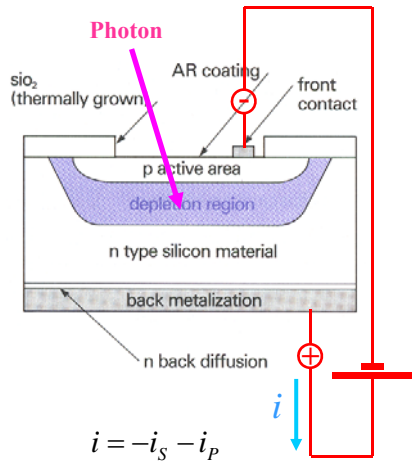
$V = -V_B$

$$i = -i_s - i_p$$



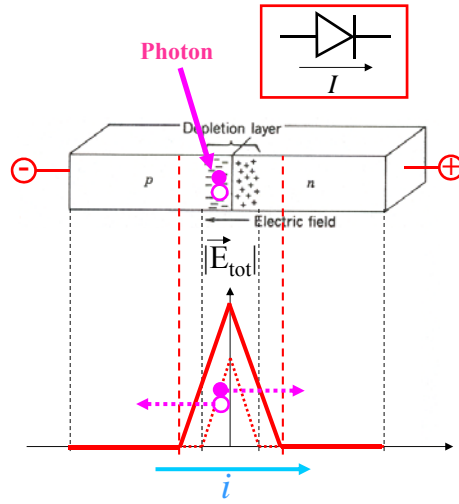
## Photodiode (2)

### Structure PN



$$i = -i_S - i_P$$

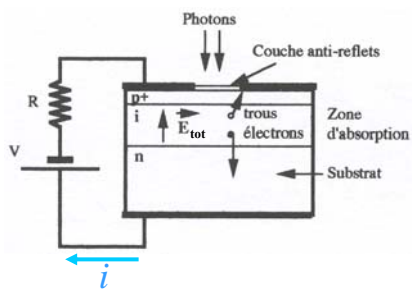
$i_P$  est proportionnel au flux de photons



Polarisation inverse => Capacité  $\searrow$

## Photodiode (3)

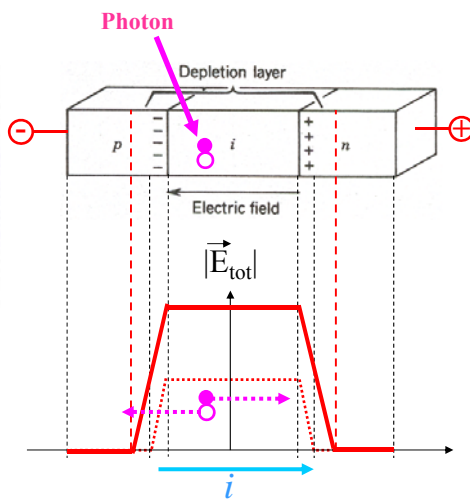
### Structure PIN



$$i = -i_S - i_P$$

$i_P$  est proportionnel au flux de photons

PIN => champ él. sur zone étendue

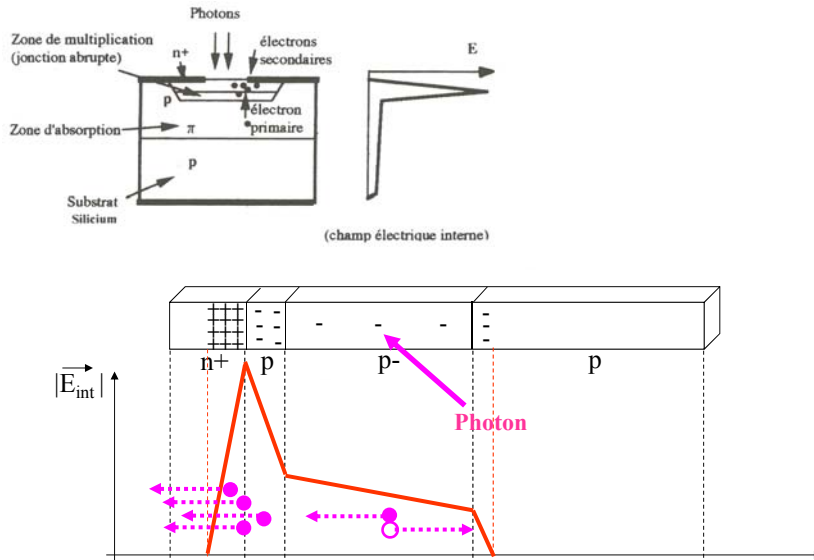


PIN => Capacité  $\searrow$



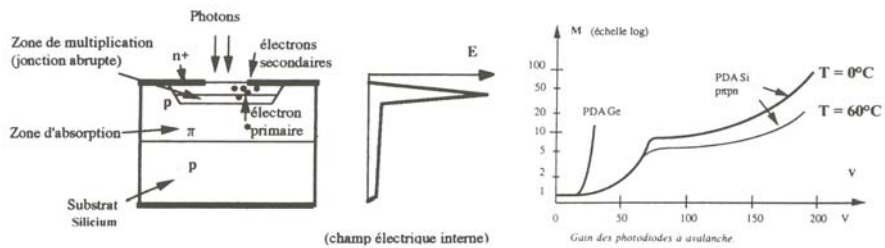
## Photodiode (4a)

### Photodiode à avalanche (APD)



## Photodiode (4b)

### Photodiode à avalanche (APD)



⇒ photocourant :  $i_p' = M \cdot S \cdot P$  avec  $M = \text{coeff. d'amplification (gain)}$

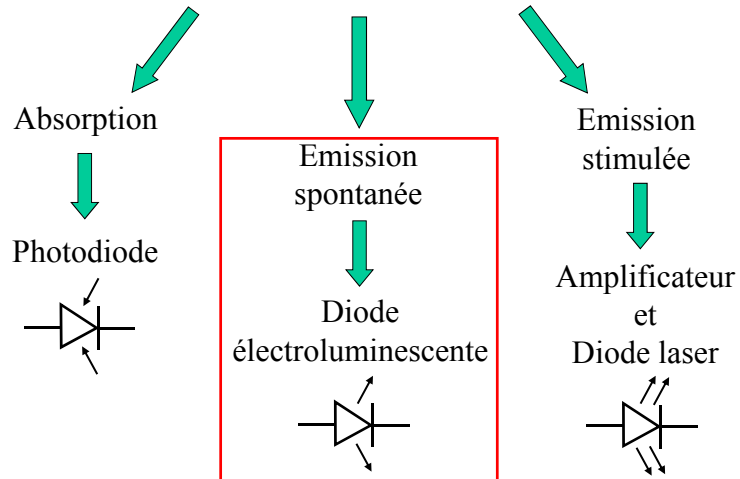
⇒ courant d'obscurité :  $i_s' = m \cdot i_s$  avec  $m < M$

⇒ Pb : sensibilité de la tension et du gain à la température

Matériau	Si	Ge	GaInAs
$\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )	1,0	1,6	1,4 à 1,7
$S_{max}$ (A/W)	0,6	0,7	0,8
$I_S$ (nA)	1 à 5	500	1 à 5
$M_{max}$	100	10	20

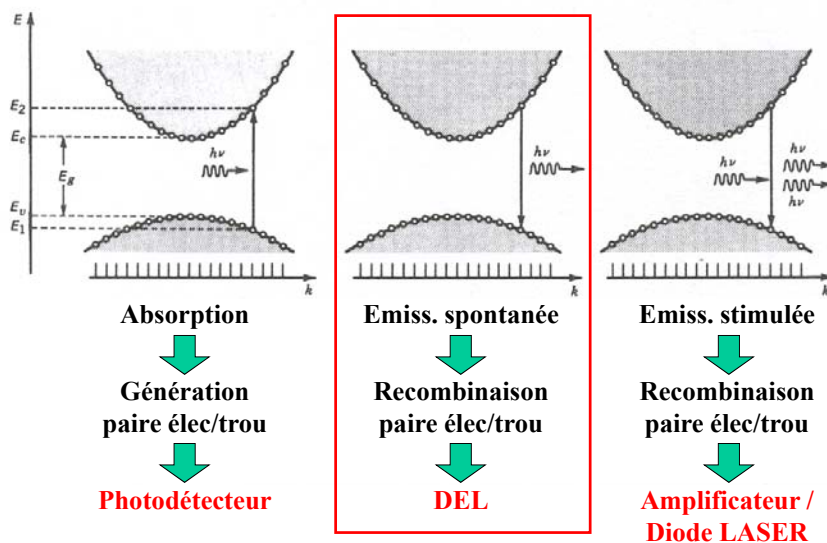
## Les diodes en optoélectronique

Les diodes permettent d'exploiter les différents types de transitions radiatives



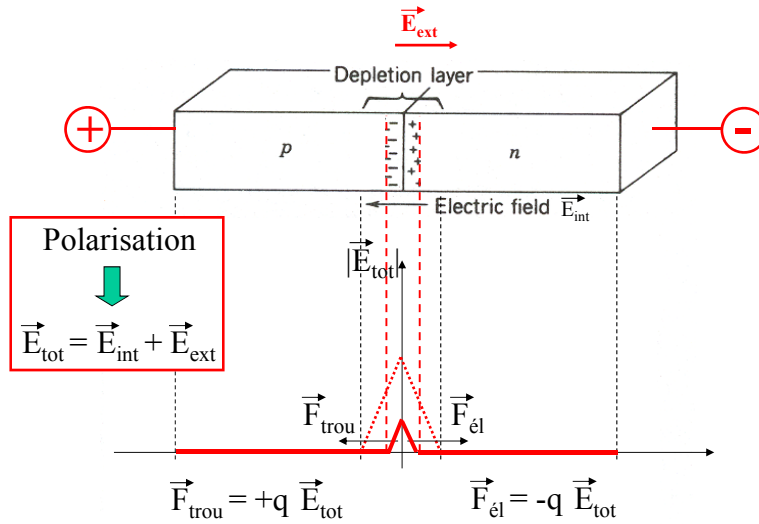
### RAPPEL

#### Transitions radiatives dans un matériau à gap direct

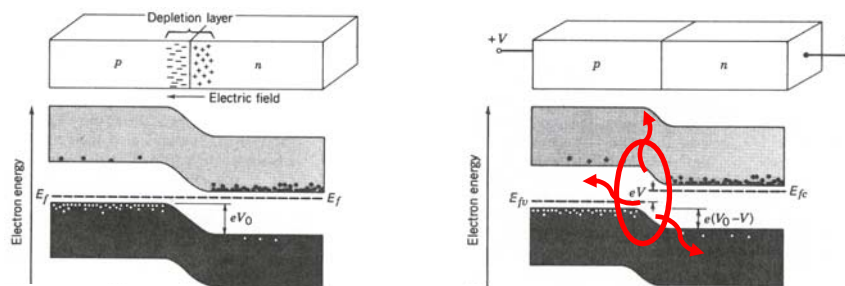


## RAPPEL

### Junction PN polarisée en direct



### Junction PN dans un matériau à gap direct



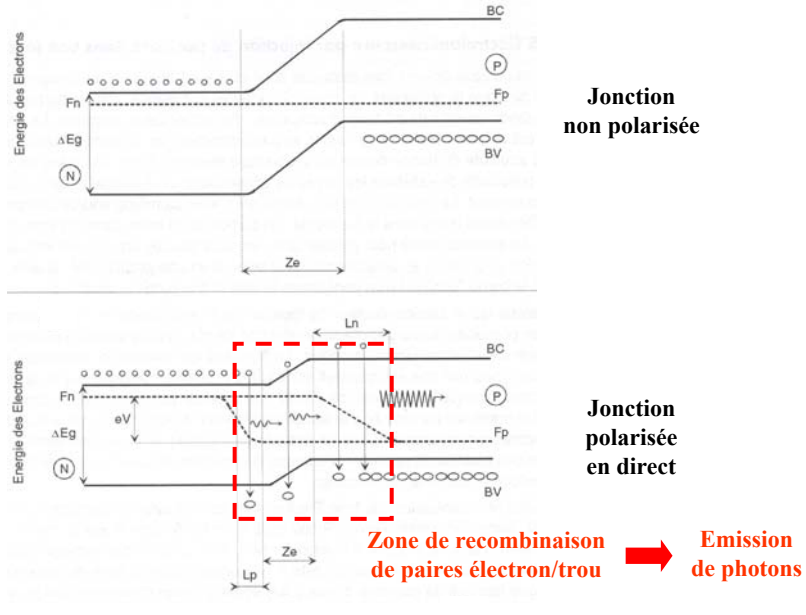
Junction non polarisée

↓  
Equilibre

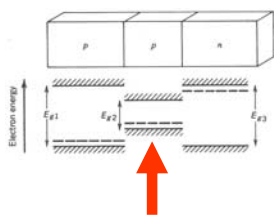
Junction polarisée en direct

↓  
Emission de photons  
(émission spontanée)

## Longueur de diffusion des porteurs (homojonction)



## Structure à double hétérojonction (DH)



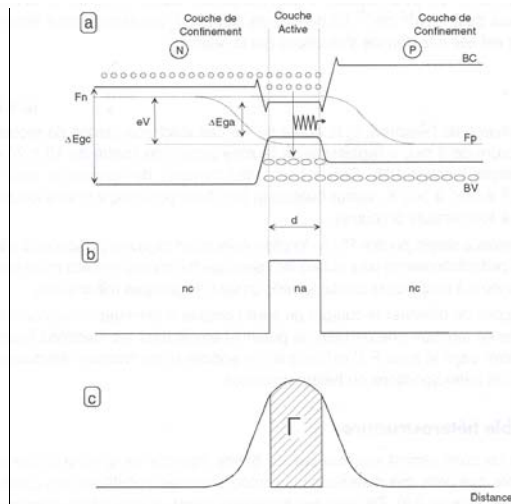
Matériau actif dont l'énergie de gap est inférieure à celle des matériaux adjacents

Limitation des longueurs de diffusion des porteurs

**Confinement de la zone de recombinaison**

**Abaissement du courant de polarisation**

(à brillance équivalente)

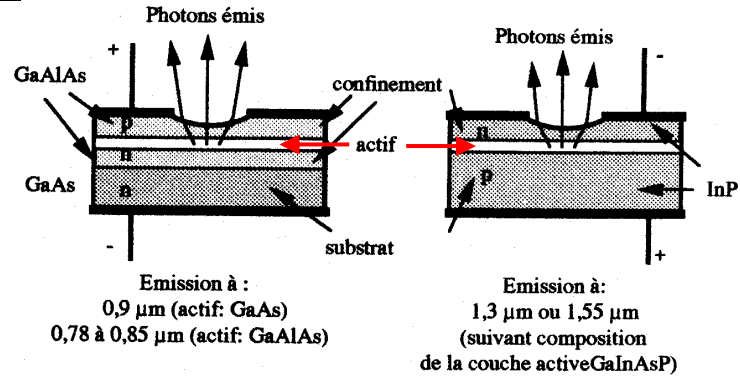


(a) Diagramme des bandes d'énergie, (b) Indice de réfraction.

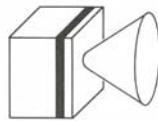
(c) Carré de l'amplitude du champ optique.  $\Gamma$  est la fraction de la puissance guidée dans la couche active.

## Diode électroluminescente (1)

### Structures



DEL à émission  
par la surface

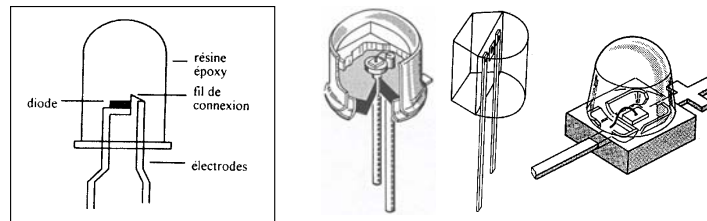


DEL à émission  
par la tranche



## Diode électroluminescente (2)

### Composant



### Diagramme de rayonnement



Loi de Lambert :  $P(\theta) = P(0) \cos \theta$

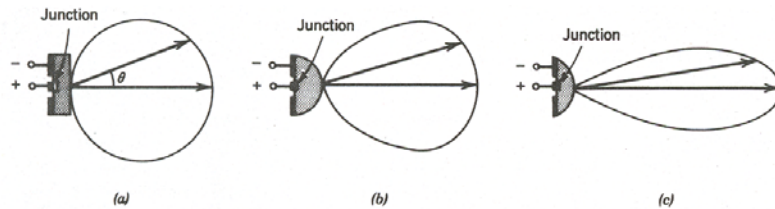


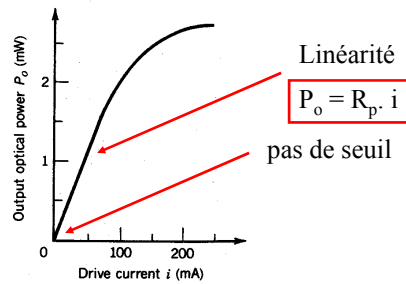
Figure 16.1-12 Radiation patterns of surface-emitting LEDs: (a) Lambertian pattern of a surface-emitting LED in the absence of a lens; (b) pattern of an LED with a hemispherical lens; (c) pattern of an LED with a parabolic lens.

## Diode électroluminescente (3)

### Caractéristiques I(V) et P(I)

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{n'kT}\right) - 1 \right]$$

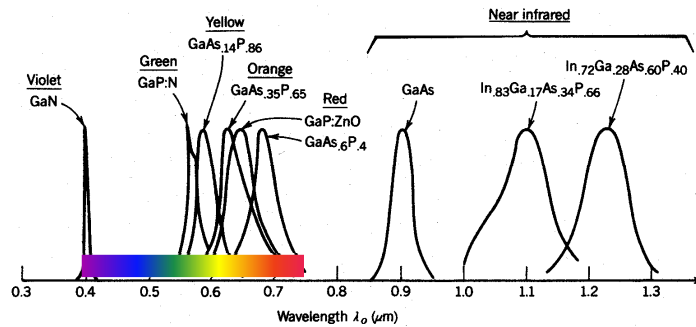
$n'$  : facteur d'idéalité ( $1 < n' < 2$ )



### Spectre d'émission

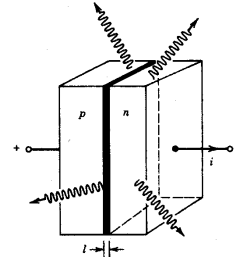
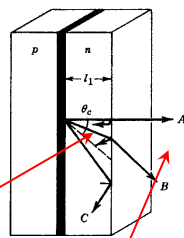
$$\Delta\lambda_0 \approx 1,45 \cdot \lambda_0^2 \cdot kT$$

$$\left[ \begin{array}{l} \Delta\lambda_0 \text{ et } \lambda_0 \text{ en } \mu\text{m} \\ kT \text{ en eV} \end{array} \right]$$



## Diode électroluminescente (4)

### Rendements quantiques



$$\Phi = \eta_i \cdot \Phi_c = \eta_i \cdot \frac{i}{q} \quad \text{et} \quad \Phi_0 = \eta_i \cdot \Phi = \eta_{ex} \cdot \frac{i}{q} \quad \Rightarrow \quad P_0 = \Phi_0 \cdot h\nu = \eta_{ex} \cdot h\nu \cdot \frac{i}{q}$$

### Réponse

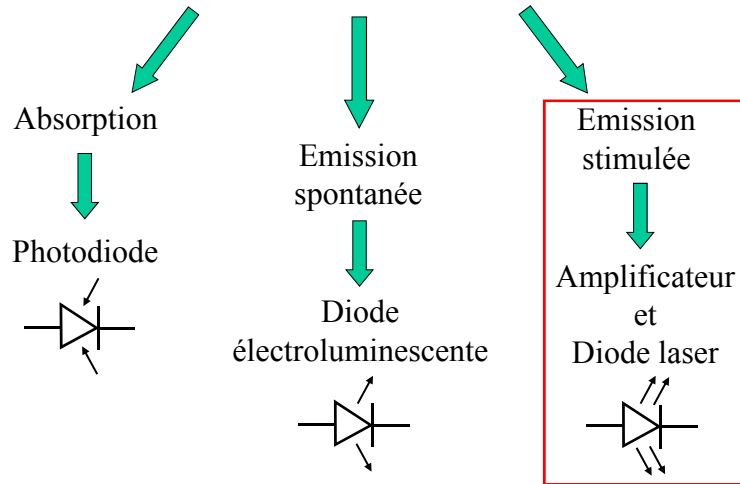
$$P_0 = R_p \cdot i \quad \Rightarrow \quad R_p = \eta_{ex} \cdot \frac{h \cdot c}{q \cdot \lambda_0} = \eta_{ex} \cdot \frac{1,24}{\lambda_0} \quad (\lambda_0 \text{ en } \mu\text{m} \text{ et } R_p \text{ en W/A})$$

### Bande passante

BP < qqes 100 MHz  $\Rightarrow$  Handicap pour les télécommunications

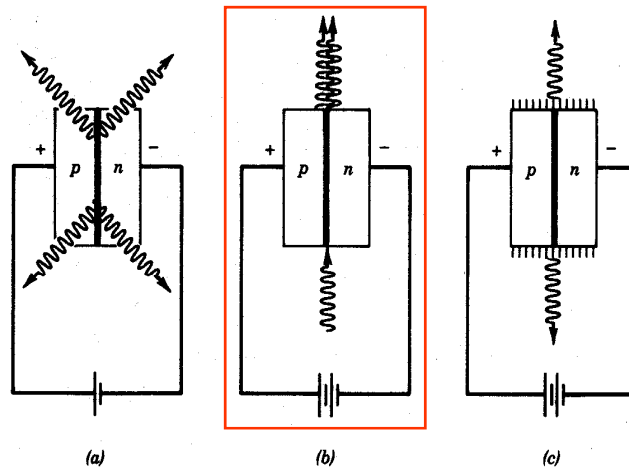
## Les diodes en optoélectronique

Les diodes permettent d'exploiter les différents types de transitions radiatives



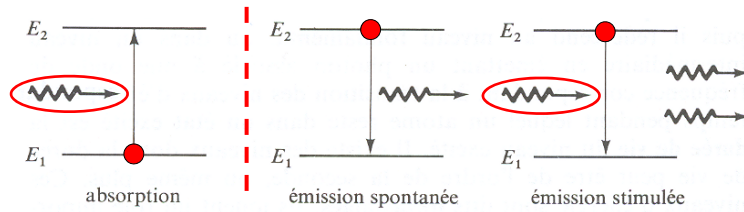
## De la diode électroluminescente à la diode laser

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



**Figure 16.0-1** A forward-biased semiconductor  $p-n$  junction diode operated as (a) an LED, (b) a semiconductor optical amplifier, and (c) a semiconductor injection laser.

## Amplification optique (1)



A l'équilibre thermod., pour un photon INCIDENT, on a : Proba (Abs) > Proba (E.Sti)

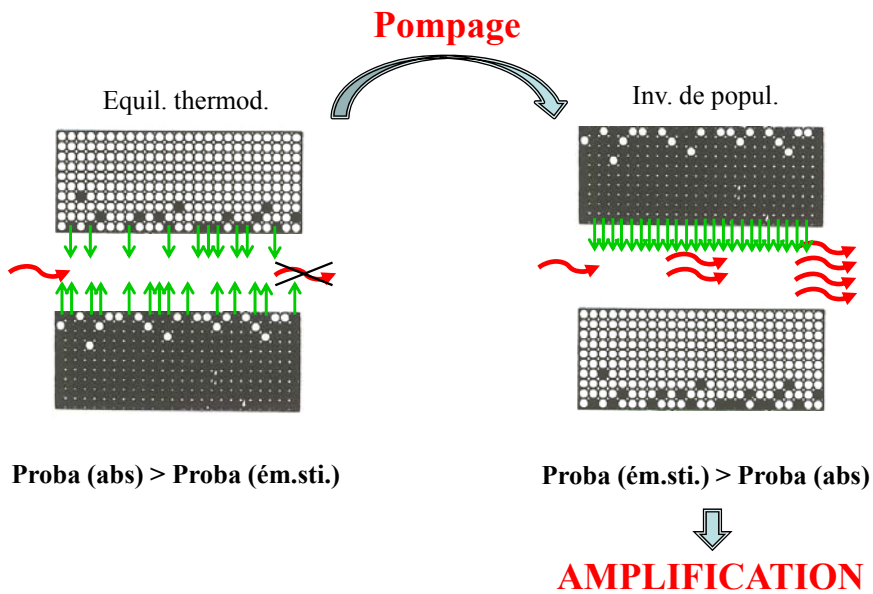
Pour AMPLIFICATION optique, il faut : Proba (E.Sti) > Proba (Abs)

**INVERSION de POPULATION**

**POMPAGE**

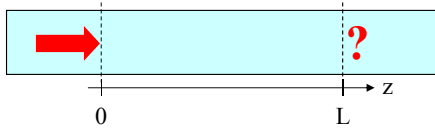
**Amplificateur optique = milieu actif (gain) + source de pompage**

## Inversion de population





## Amplification optique (2)

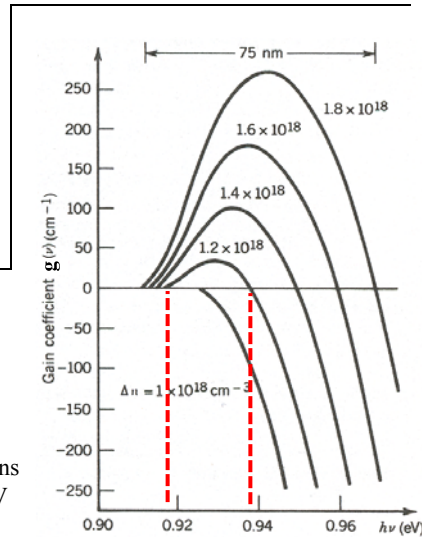


$$\Phi(L) = \Phi(0) \exp(g \cdot L)$$

- si  $g > 0 \Rightarrow$  gain  $\Rightarrow \Phi(L) =$
- si  $g = 0 \Rightarrow$  transparence  $\Rightarrow \Phi(L) =$
- si  $g < 0 \Rightarrow$  pertes  $\Rightarrow \Phi(L) =$

**Cas du matériau InGaAsP, à  $T = 300$  K, soumis à une injection de porteurs  $\Delta n$ .**

- \* Pour  $\Delta n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  :  $g = 0$  pour les photons d'énergie égale à 0,93 eV (sinon  $g < 0$ )
- \* Pour  $\Delta n = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  :  $g > 0$  pour les photons dont l'énergie est comprise entre 0,92 et 0,94 eV



## Amplificateur optique

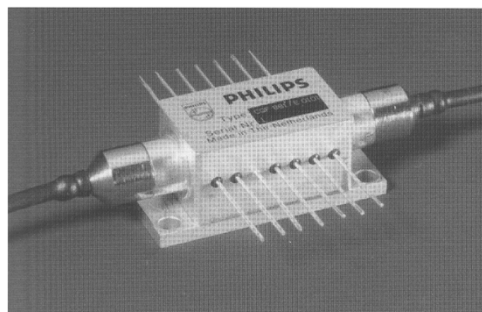
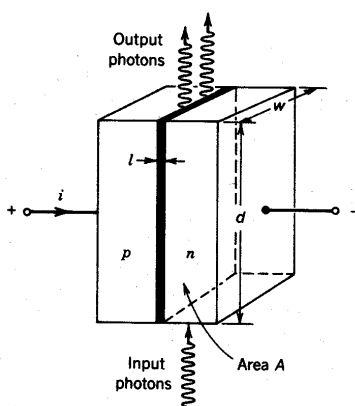
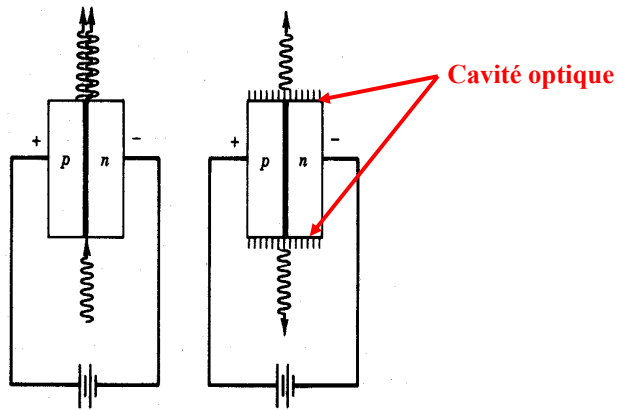


Fig. 5.27. Packaged SOA module (SOA : Semiconductor Optical Amplifier)

## De l'amplificateur optique à la diode laser

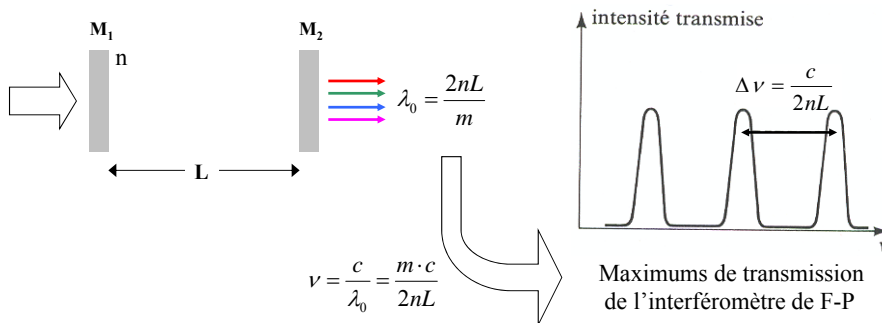
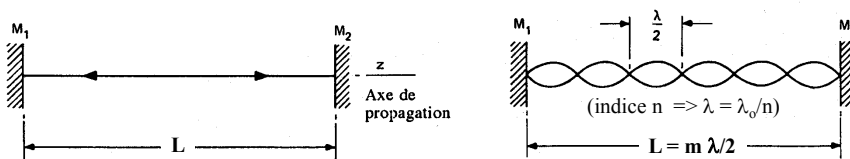
LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



LASER = { milieu ACTIF (amplification de lumière par émission stimulée)  
 + source de POMPAGE (produit l'inversion de population dans le milieu actif)  
 + cavité RESONNANTE (favorise l'amplification et sélectionne les fréquences)

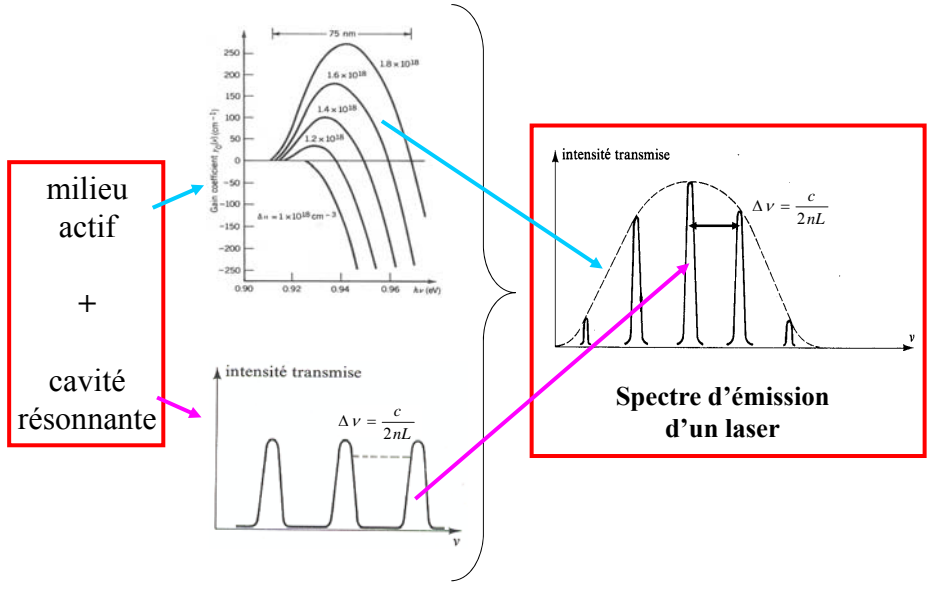
## Cavité résonnante

Cas de l'interféromètre de Fabry-Pérot

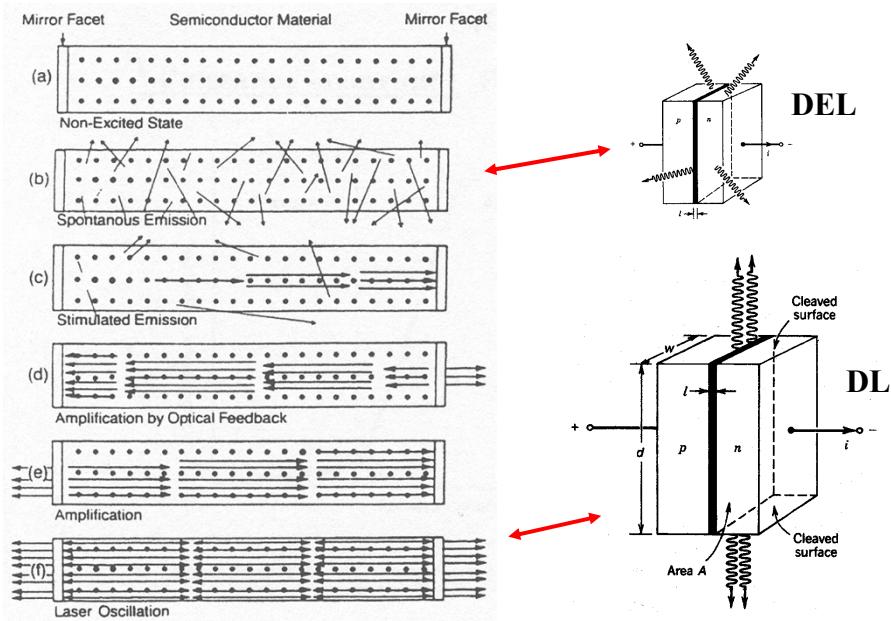


## Effet laser

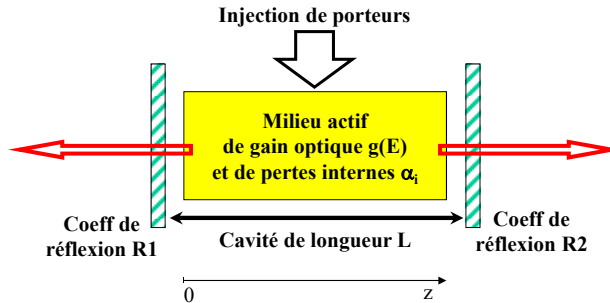
Pompage d'un milieu actif inséré dans une cavité résonnante



## Oscillation laser



## Condition d'oscillation laser (1)



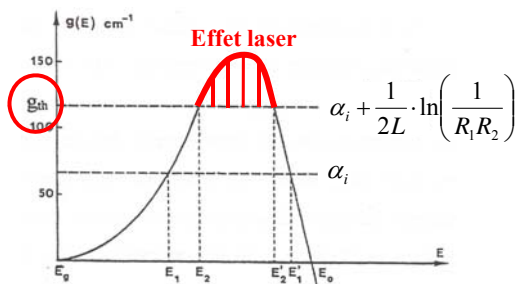
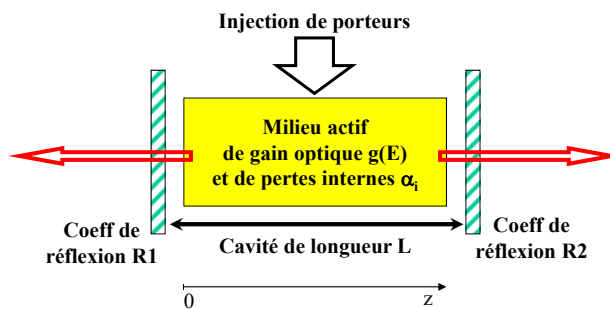
Pour des photons d'énergie  $E$  se propageant selon l'axe  $z$ , la variation de flux est donnée par :  $\Phi(E) = \Phi_0(E) \exp[(g(E) - \alpha_i) \cdot z]$

Il y aura amplification optique si  $\Phi(E) > \Phi_0(E)$ , soit donc :  $g(E) > \alpha_i$

Après un aller-retour :  $\Phi_{AR}(E) = R1 \cdot R2 \cdot \Phi_0(E) \exp[(g(E) - \alpha_i) \cdot 2L]$

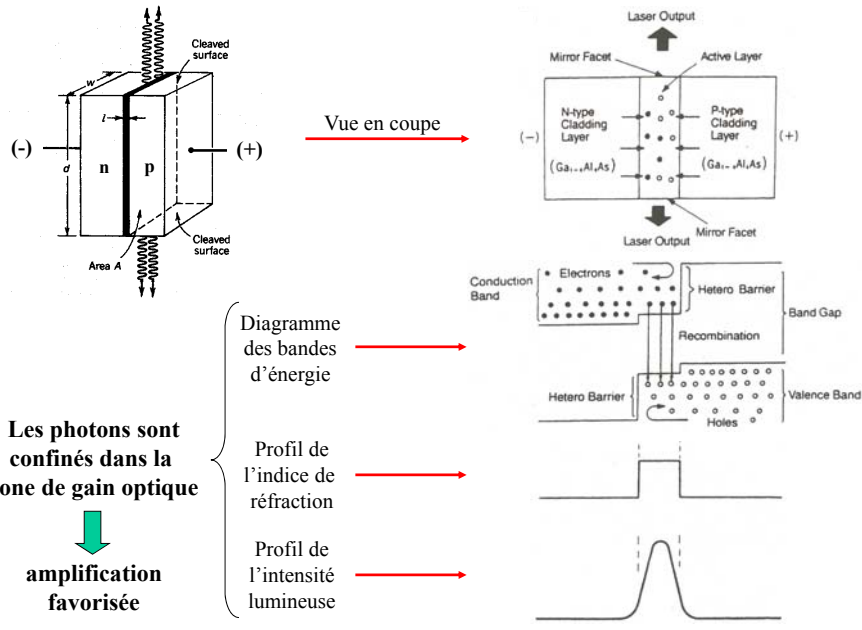
Pour que le flux soit entretenu, il faut :  $\Phi_{AR}(E) = \Phi_0(E)$ ,  
soit donc :  $g(E) = \alpha_i + (1/2L) \cdot \ln[1/(R1 \cdot R2)] = g_{th}$

## Condition d'oscillation laser (2)



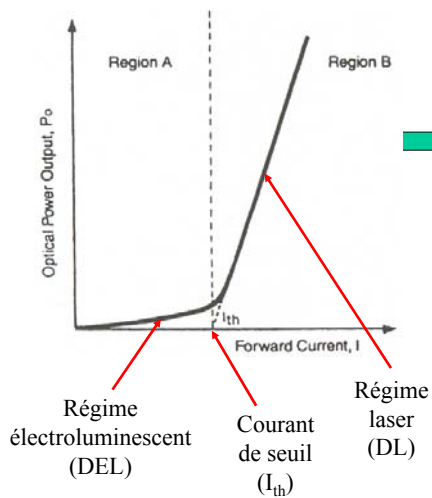
Oscillation laser  
 $\downarrow$   
 $g(E) > g_{th}$   
 avec  $g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \cdot \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$

## Diode laser (1)



## Diode laser (2)

Caractéristique « puissance-courant » :  $P_o(I)$



**Rendements  $\eta_i$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_{ex}$  et  $\eta_D$**

$$\begin{cases} I < I_{th} & \Rightarrow \Phi \neq 0 \\ I > I_{th} & \Rightarrow \Phi = \eta_i \cdot (I - I_{th}) / q \end{cases}$$

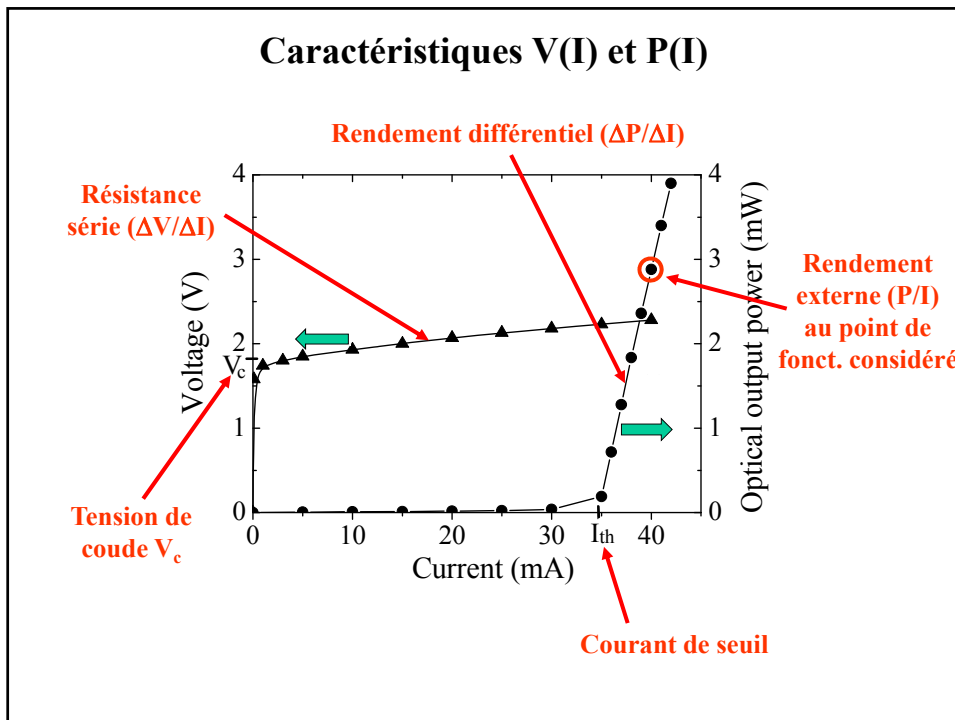
$$\Phi_o = \eta_t \cdot \Phi = \eta_{ex} \cdot I / q$$

$$\Phi_o = \eta_t \cdot \Phi = \eta_D \cdot (I - I_{th}) / q$$

$$P_o = \Phi_o \cdot h\nu = \eta_D \cdot (I - I_{th}) \cdot 1,24 / \lambda_o$$

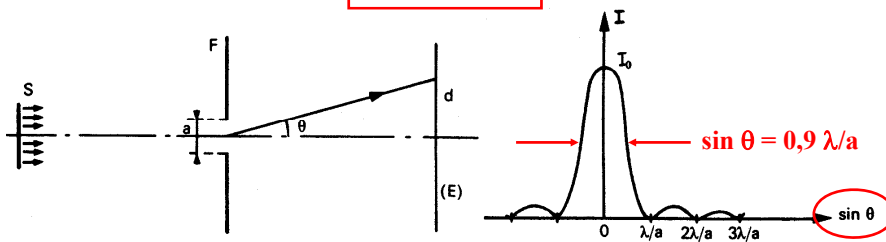
( $P_o$  exprimé en W,  $I$  en A,  $\lambda_o$  en  $\mu\text{m}$ )

## Caractéristiques V(I) et P(I)



## Diffraction à l'infini (Fraunhofer) par une fente de largeur $a$ :

**RAPPEL**



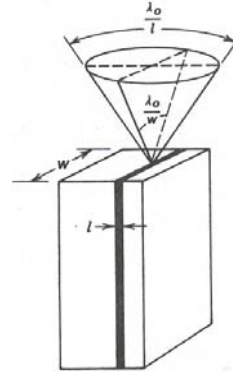
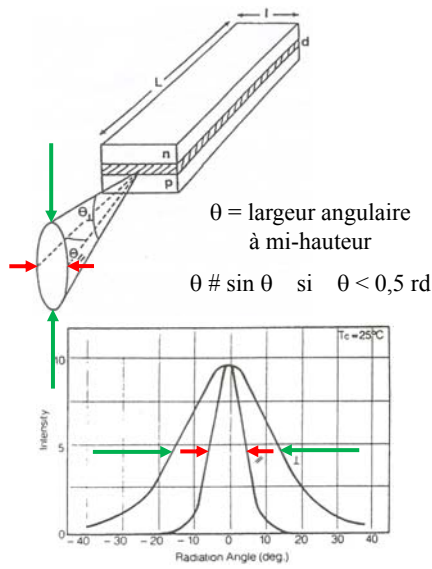
$$I = I_0 \cdot \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot a \cdot \sin \theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \cdot a \cdot \sin \theta}{\lambda}} \right]^2 = I_0 \cdot \left[ \text{sin}_{\text{Card}}\left(\frac{a \cdot \sin \theta}{\lambda}\right) \right]^2$$

$$I_{\max} = I_0 \quad \text{pour} \quad \theta = 0 \quad ; \quad I_{\min} = 0 \quad \text{pour} \quad \sin \theta = k\lambda/a \quad (\text{k entier} \neq 0)$$

Remarque : largeur totale du pic central à mi-hauteur  $\approx 0,9 \lambda/a$

### Diode laser (3)

#### Diagramme de rayonnement : $P_o(\theta)$

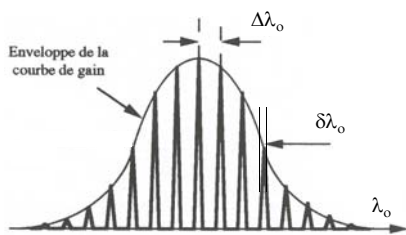


Pour une fenêtre de longueur  $w$  et de largeur  $l$ , les angles  $\theta_{//}$  et  $\theta_{\perp}$  sont donnés approximativement par :

$$\sin \theta_{//} = \lambda_0/w \quad \text{et} \quad \sin \theta_{\perp} = \lambda_0/l$$

### Diode laser (4)

#### Spectre d'émission : $P_o(\lambda_0)$

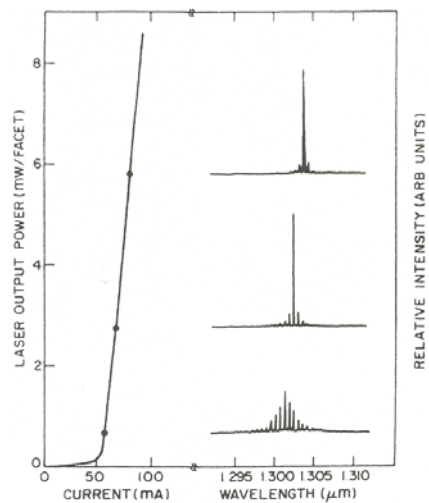


Pour une cavité de longueur  $L$  :

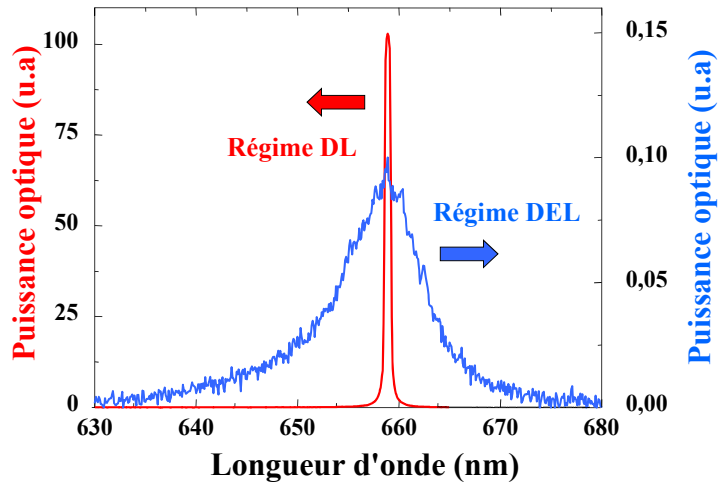
$$\Delta \nu = c / (2nL)$$


$$\Delta \lambda_0 = \lambda_0^2 \cdot \Delta \nu / c$$

$$\delta \lambda_0 = \lambda_0^2 \cdot \delta \nu / c$$

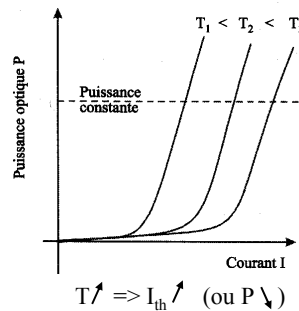
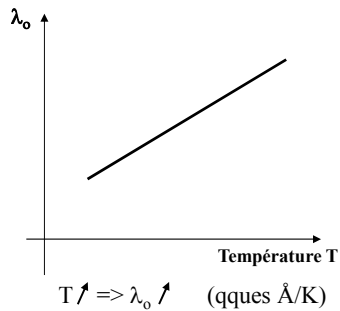


## Diode laser : caractéristique $P_o(\lambda)$ (Spectre d'émission)



## Diode laser (5)

Coefficient de température :  $T_o$



Le coefficient de température, noté  $T_o$ , indique la dépendance des caractéristiques d'une diode laser aux variations de température.

$T_o$  est un coefficient empirique exprimé en **Kelvin**, défini par :

$$I_{th}(T_2) = I_{th}(T_1) \exp[(T_2 - T_1)/T_o]$$

(Ex :  $T_o \sim 70$  K pour InGaAsP et  $T_o \sim 130$  K pour InGaAlP)

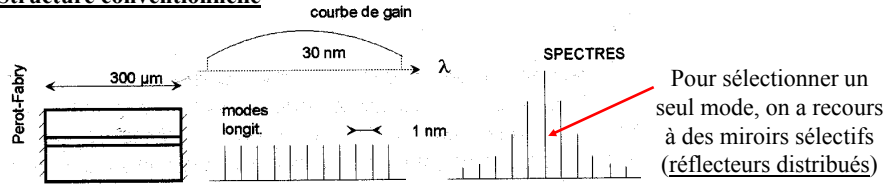
➡ Importance du contrôle de la température (module à effet Peltier)



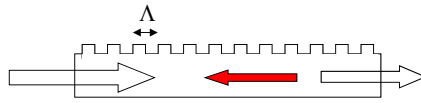
## Diode laser (6)

### Les principales structures

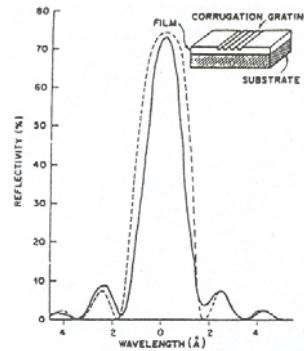
#### Structure conventionnelle



#### Propriétés des réflecteurs distribués



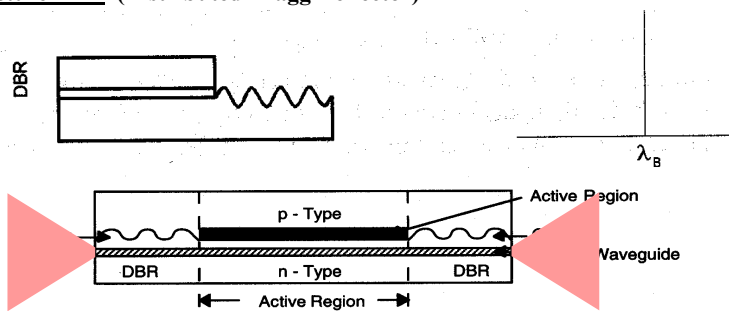
La longueur d'onde réfléchie vérifie la relation :  $\lambda_0 = 2n\Delta$   
(n est l'indice effectif du guide)



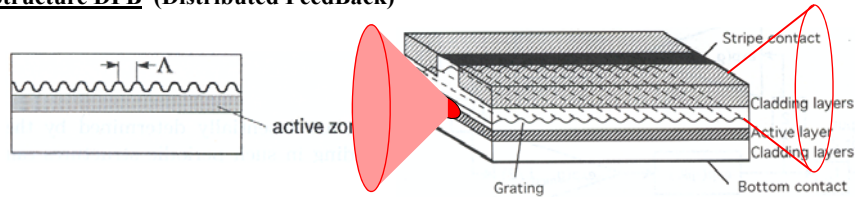
## Diode laser (7)

### Les principales structures

#### Structure DBR (Distributed Bragg Reflector)

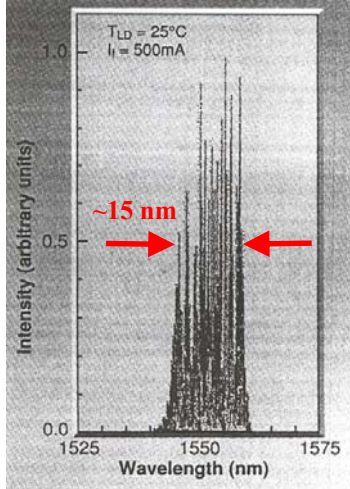


#### Structure DFB (Distributed FeedBack)

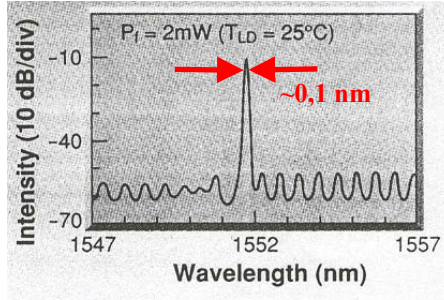


## Diode laser (8)

### Les principales structures



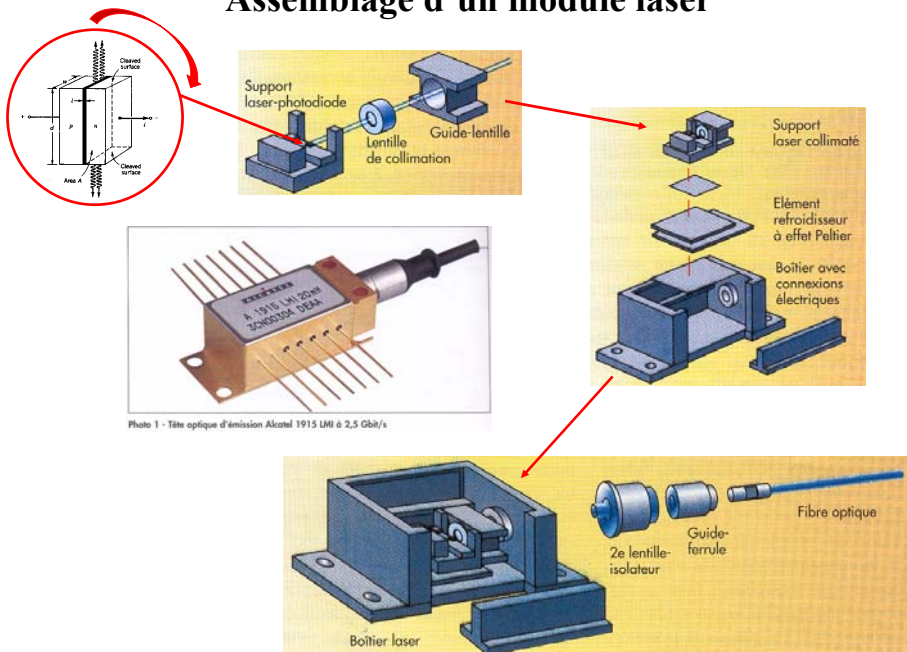
Spectre d'une diode laser conventionnelle



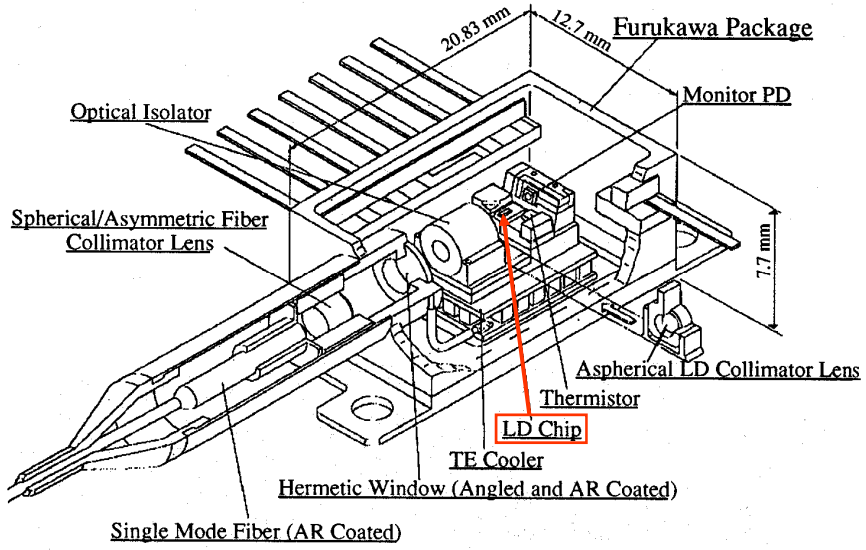
Spectre d'une diode laser DFB

Apport de la réflexion distribuée

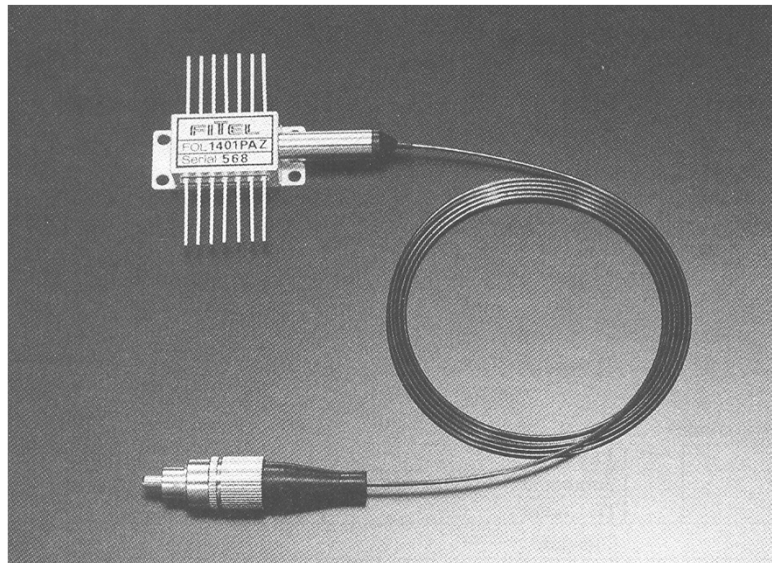
## Assemblage d'un module laser



### Exemple de module laser

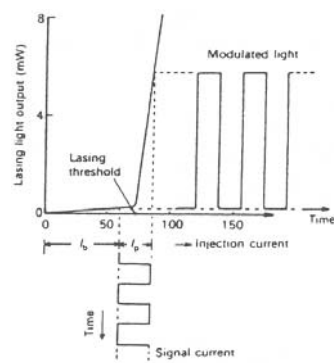


### Exemple de module laser avec fibre amorce

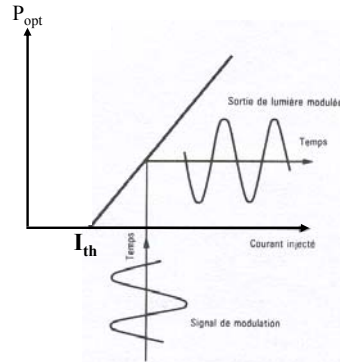


## Modulation optique (1)

➔ Modulation DIRECTE



Modulation numérique



Modulation analogique

**LIMITATIONS** dues à :

- \* décalage de la longueur d'onde
- \* variation de la largeur spectrale
- \* augmentation du nombre de modes

## Modulation optique (2)

➔ Modulation EXTERNE : La DL fonctionne à courant constant

⇒ Modulateur de Mach-Zehnder (analogique ou numérique)

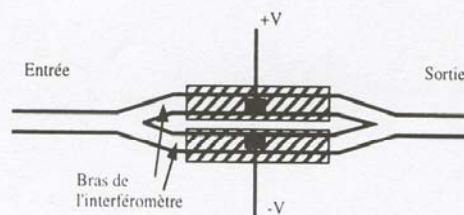
**Effet POCKELS**

$$\Delta n = n^3 \cdot r' \cdot E/2$$

$r'$  = coeff. électro-optique effectif  
 $E$  = champ électrique externe



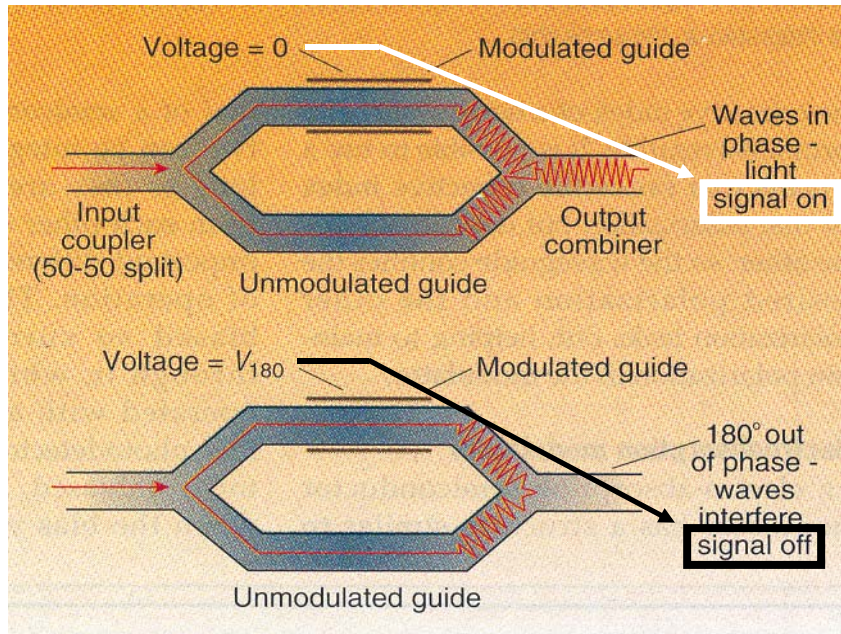
$$\Delta n = f(E) \Rightarrow \Delta n = f(V) \Rightarrow P_o = f(V)$$



⇒ Modulateur à électro-absorption (numérique)

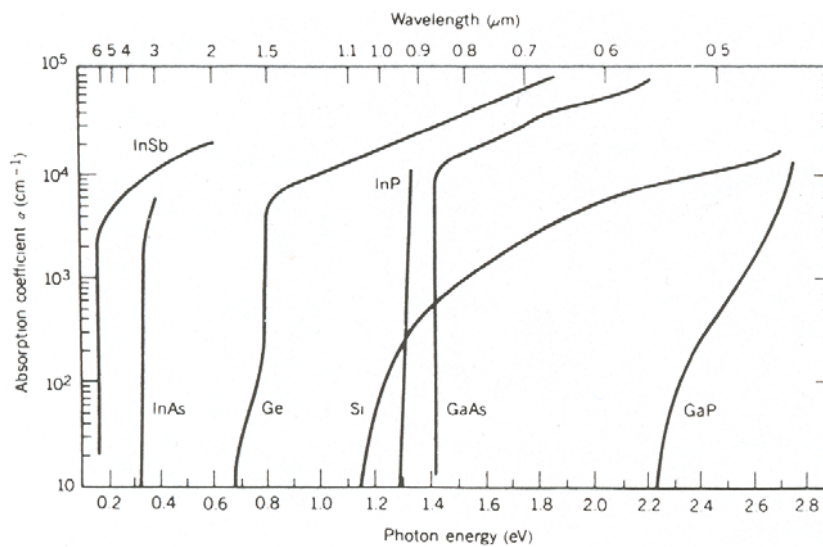
Principe : position du front d'absorption =  $f(E)$  :  $E \nearrow \Rightarrow \lambda_{abs} \searrow$

### Modulateur de Mach-Zehnder



### RAPPEL

Absorption de différents matériaux  $\Rightarrow$  Modulation à électro-absorption



## DL et modulateur intégrés

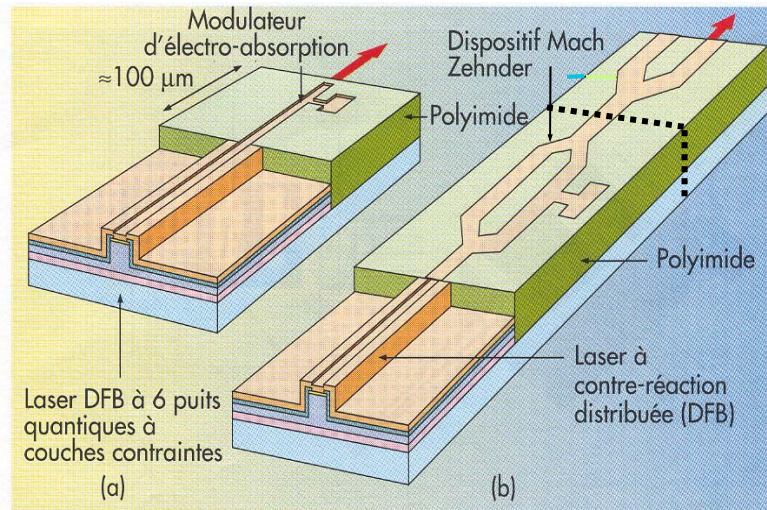
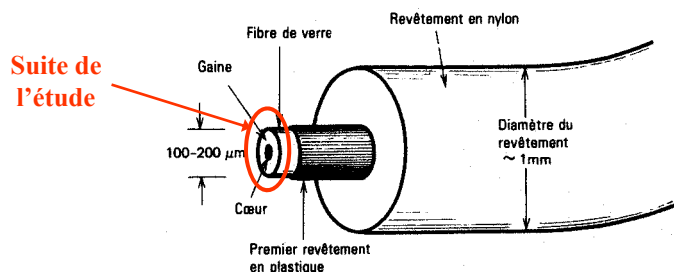
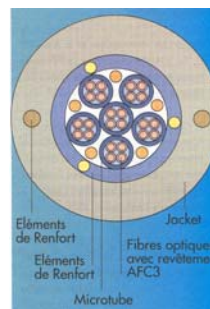
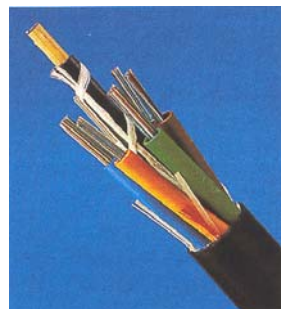
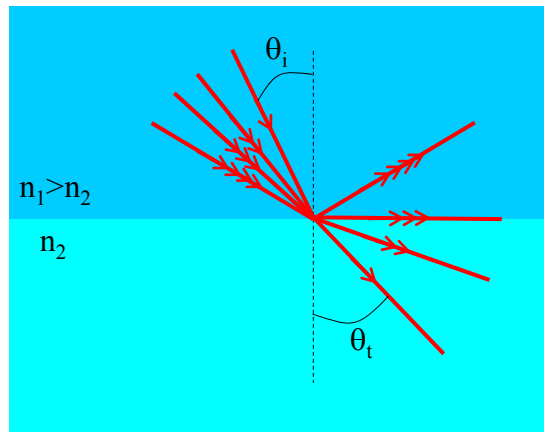


Figure 2 – Structures de modulateurs à lasers intégrés: (a) modulateur à électro-absorption et (b) modulateur Mach-Zehnder

## Câbles à fibres optiques



## Principe du guidage optique



Réflexion totale interne

$$\theta_i > \theta_L$$

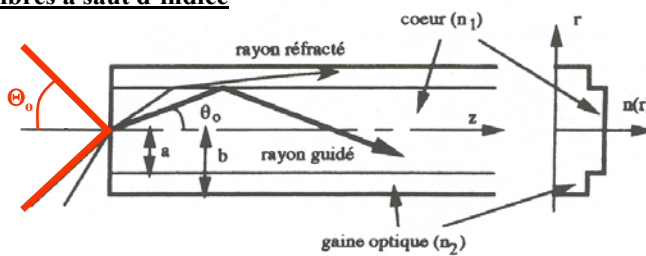
Angle limite :  $\theta_i = \theta_L$

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

$$n_1 > n_2 \Rightarrow \theta_t > \theta_i$$

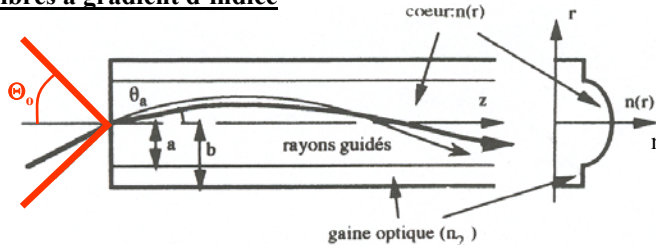
## Fibres optiques (1)

### Fibres à saut d'indice



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

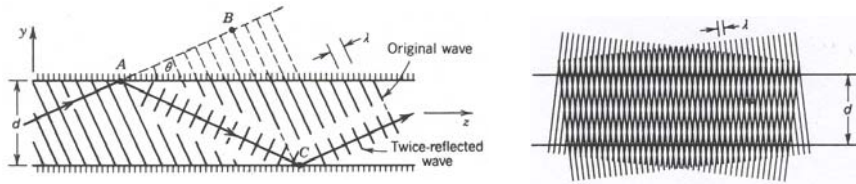
### Fibres à gradient d'indice



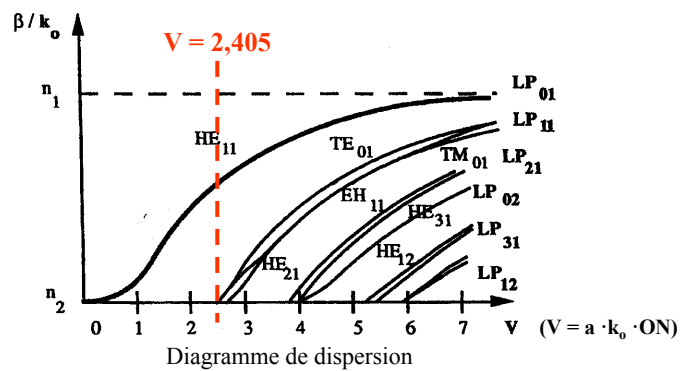
Guidage pour  
 $n(r) \cdot \cos \theta(r) = n_1 \cdot \cos \theta_a$

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

## Fibres optiques (2)



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



## Fibres optiques (3)

**Paramètres utiles** (le rayon du cœur est noté « a » et la fibre est dans l'air)

**Ouverture numérique :** 
$$\text{O. N.} = \sin \Theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

**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 :** 
$$V = a \cdot k_0 \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

**Nombre de modes d'une fibre :** 
$$N \approx \frac{\alpha}{\alpha + 2} \cdot \frac{V^2}{2}$$

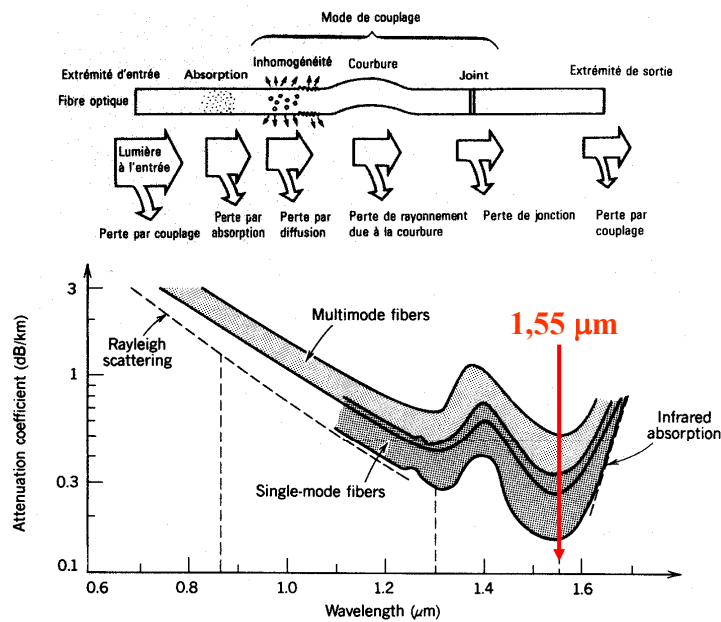
**Régime monomode pour :** 
$$V < 2,405$$

et propagation monomode pour  $\lambda_0 > \lambda_c$  avec : 
$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

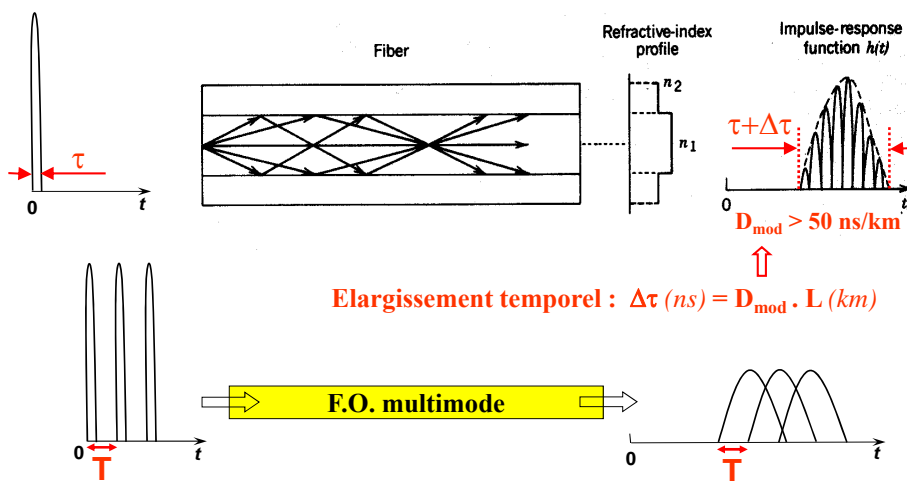
(En effet :  $V = a \cdot \text{O.N.} \cdot 2\pi/\lambda_0 \Rightarrow$  si  $V = 2,405$  pour  $\lambda_c$ , alors  $V < 2,405$  pour  $\lambda_0 > \lambda_c$ )



## Atténuation dans une fibre optique en silice



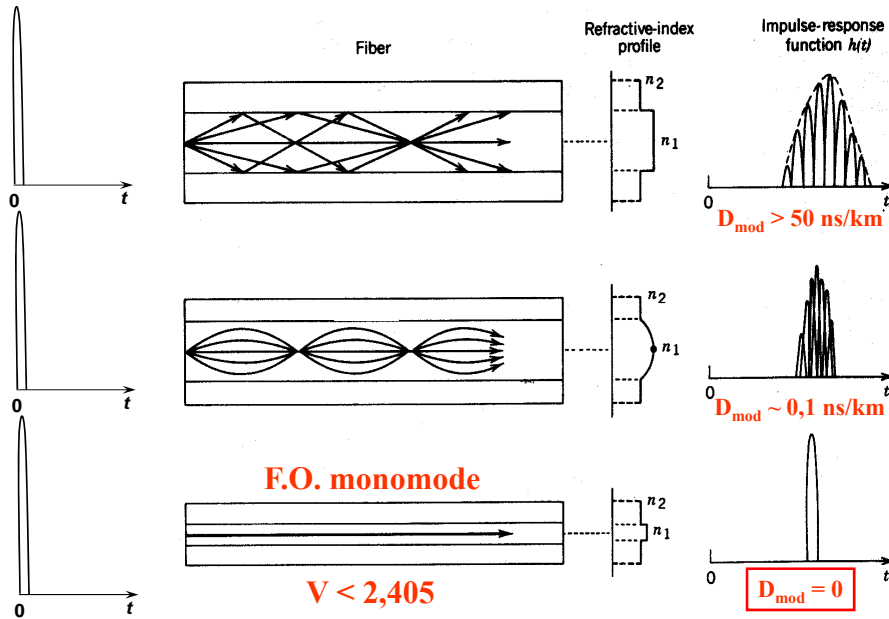
## Dispersion modale dans une fibre optique (1)



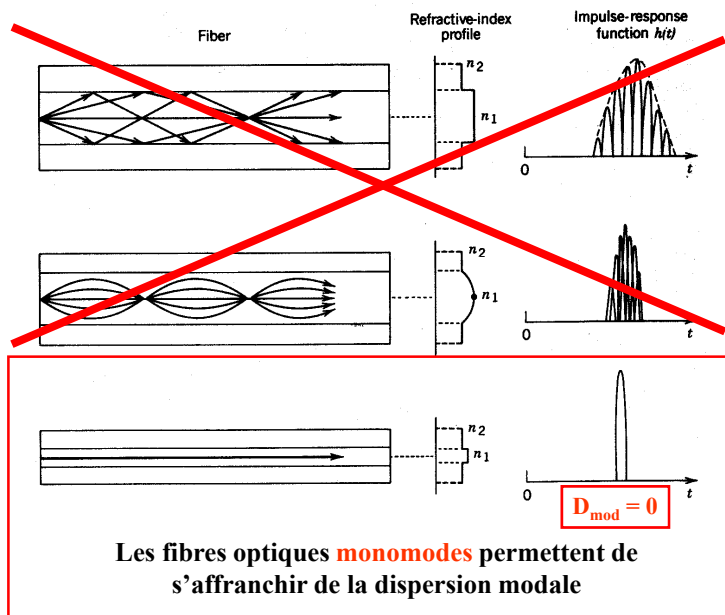
On doit  $\nearrow T$  pour pouvoir discerner les impulsions en sortie de fibre

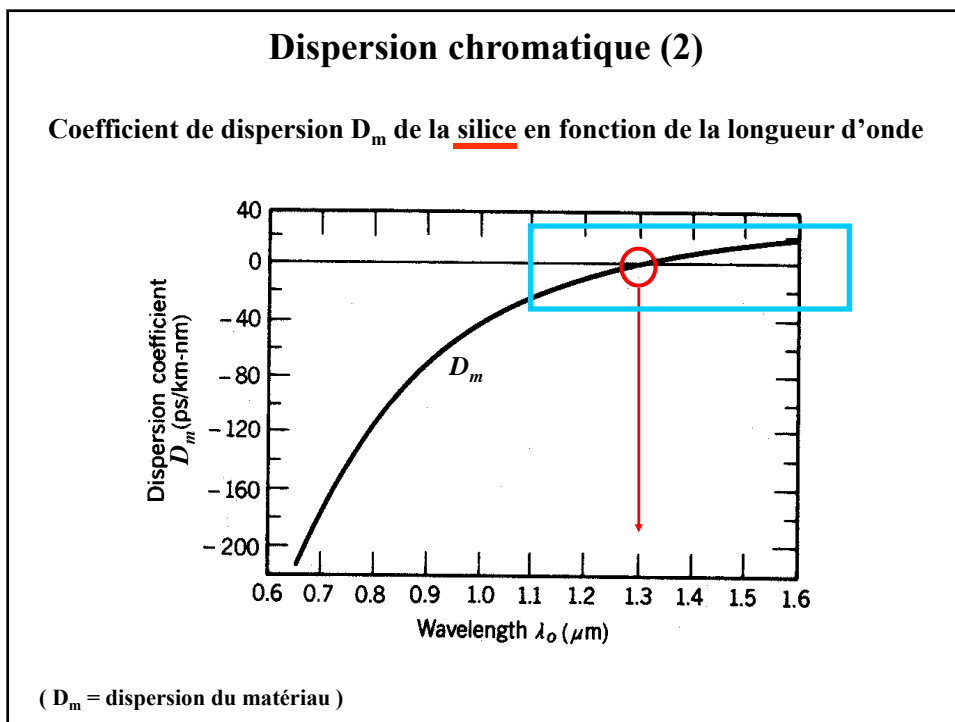
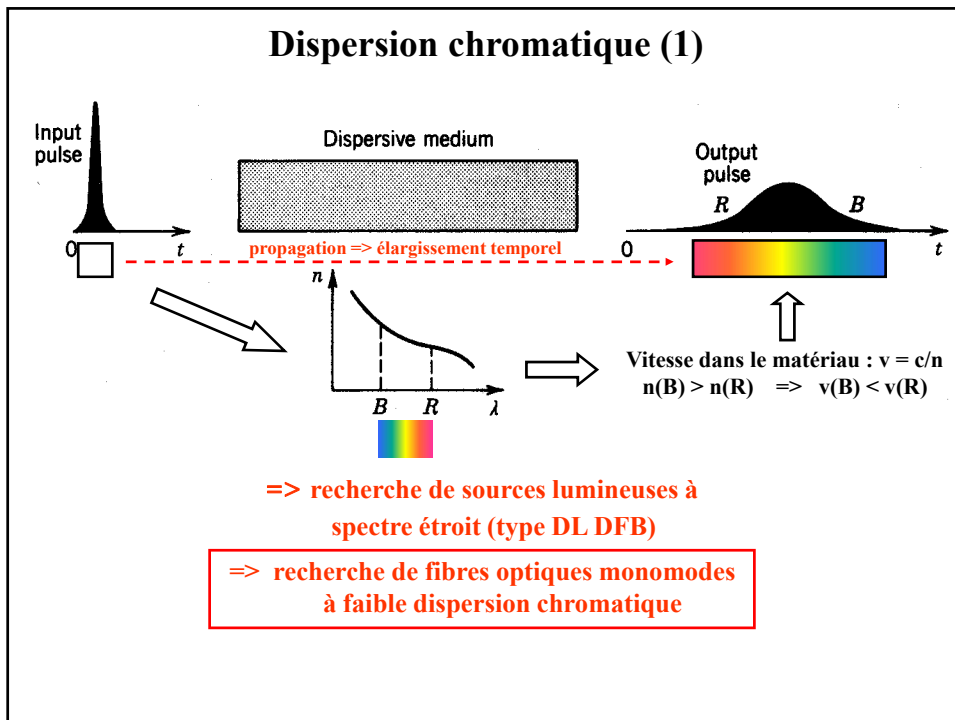
Débit =  $1/T$  => **La dispersion modale limite le débit de la liaison**

## Dispersion modale dans une fibre optique (2)



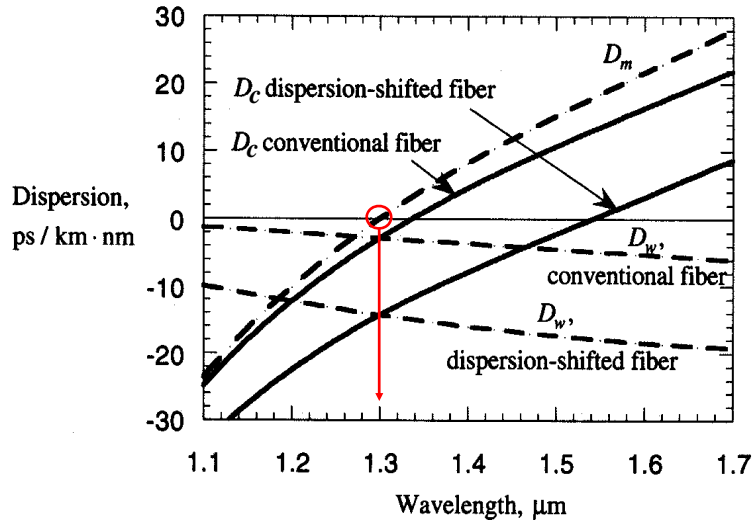
## Dispersion modale dans une fibre optique (3)





### Dispersion chromatique (3)

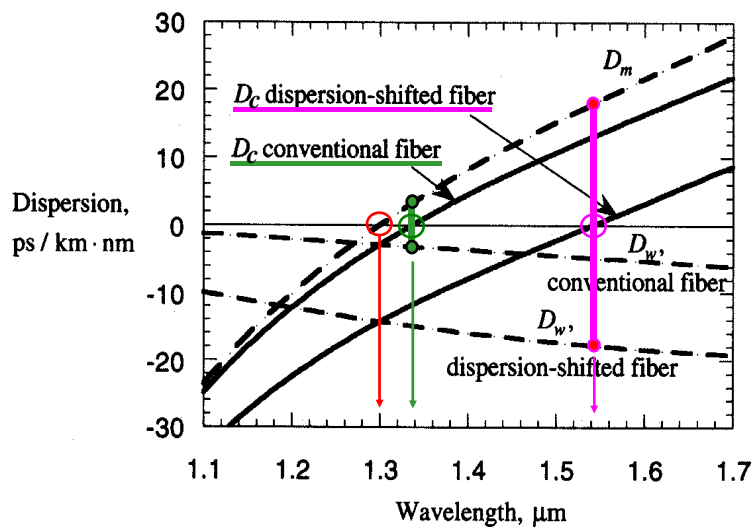
Coefficient de dispersion  $D_c = D_m + D_w$  d'une  fibre optique en silice



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

### Dispersion chromatique (3)

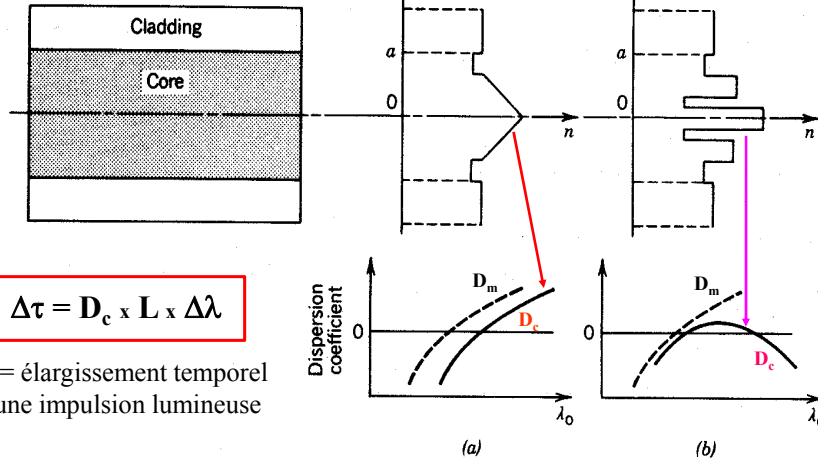
Coefficient de dispersion  $D_c = D_m + D_w$  d'une  fibre optique en silice



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

## Dispersion chromatique (4)

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

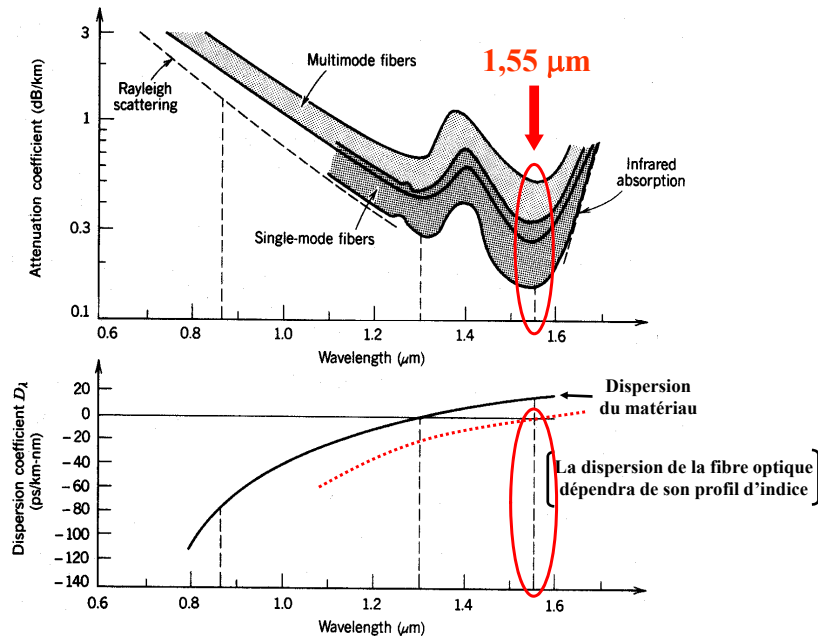


$$\Delta\tau = D_c \times L \times \Delta\lambda$$

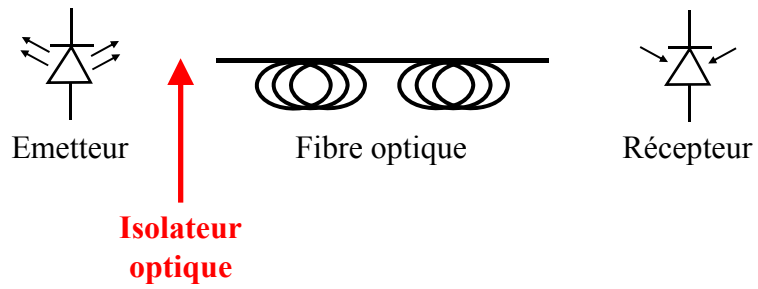
$\Delta\tau$  = élargissement temporel d'une impulsion lumineuse

**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.

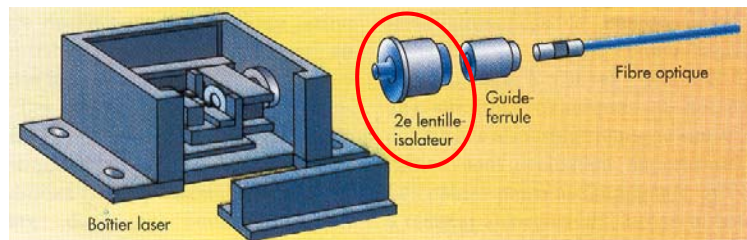
## Récapitulatif : atténuation et dispersion pour une fibre de silice



## Liaisons optiques



### Isolateur optique (1)



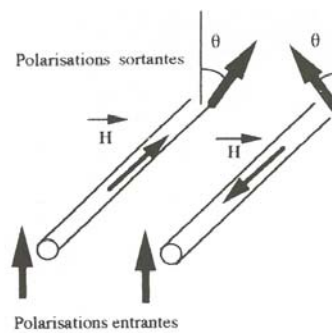
• **Effet FARADAY :**

$$\theta = V_F \cdot L \cdot H$$

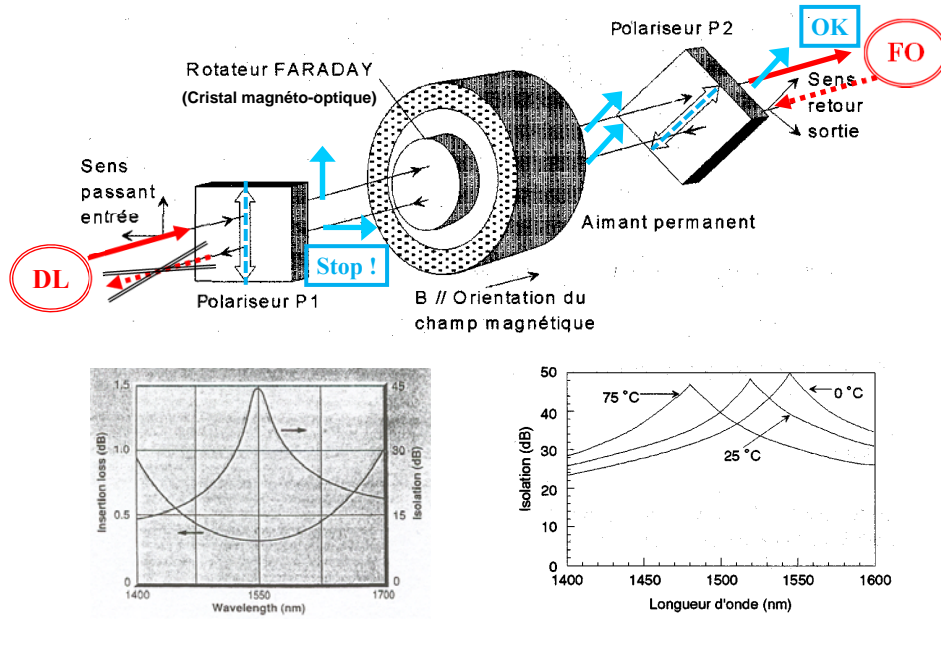
$V_F$  = constante de Verdet

$L$  = longueur d'interaction

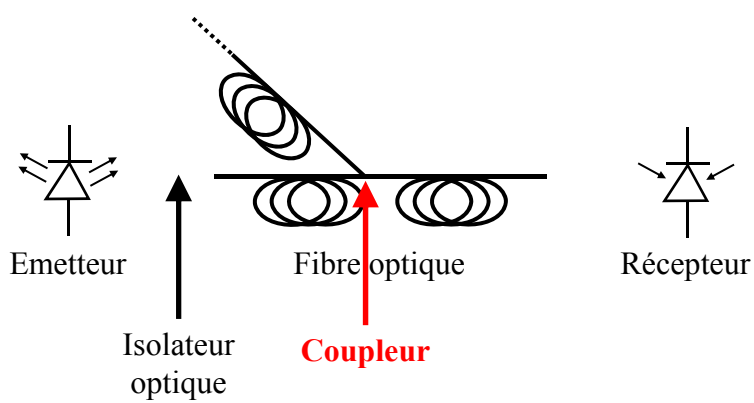
$H$  = champ magnétique longitudinal



## Isolateur optique (2)

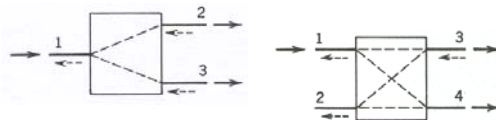
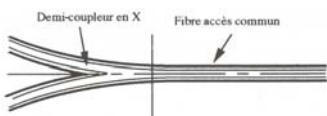


## Liaisons optiques

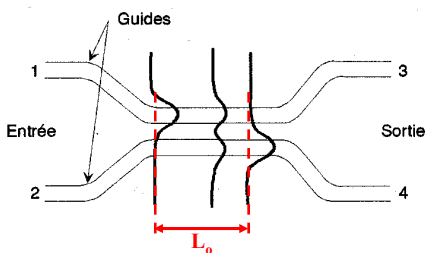


## Coupleur

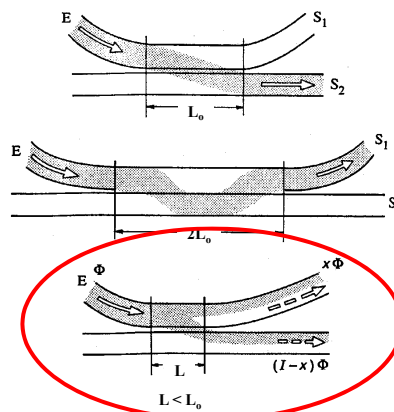
### Coupleur en Y



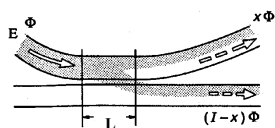
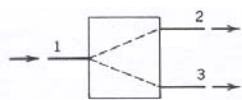
### Coupleur par champ évanescent



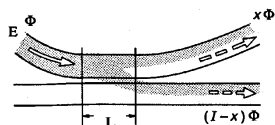
( $L_0$  = distance de transfert)



### Coupleur « 1 vers 2 »

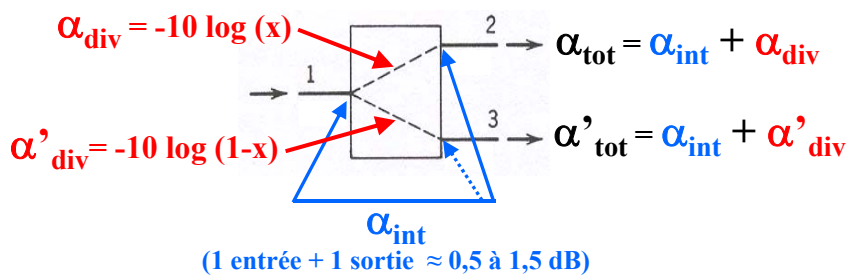


Si  $x = 0,5$   
↓  
coupleur « 50/50 »



Si  $x = 0,8$   
↓  
coupleur « 80/20 »

Atténuations exprimées en dB



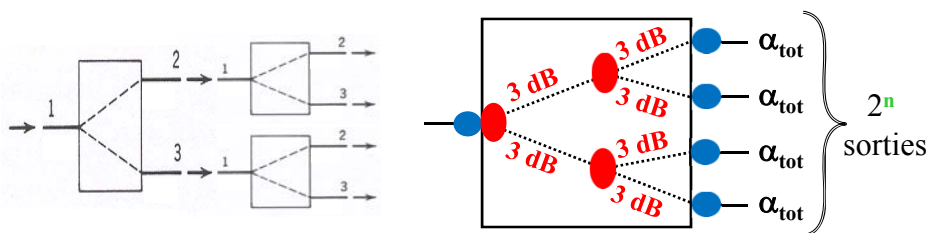


## Coupleur « 1 vers N »

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



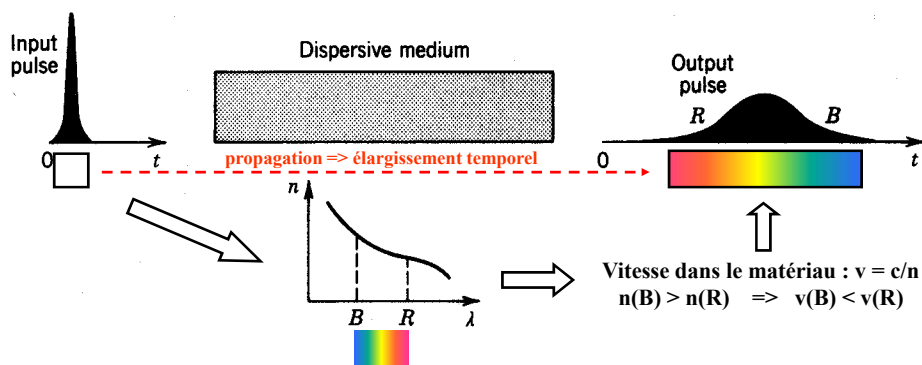
Chaque ramification présente des pertes de division  
 $\alpha_{div} = -10 \log(0,5) = 3 \text{ dB}$



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

## RAPPEL

## Dispersion chromatique

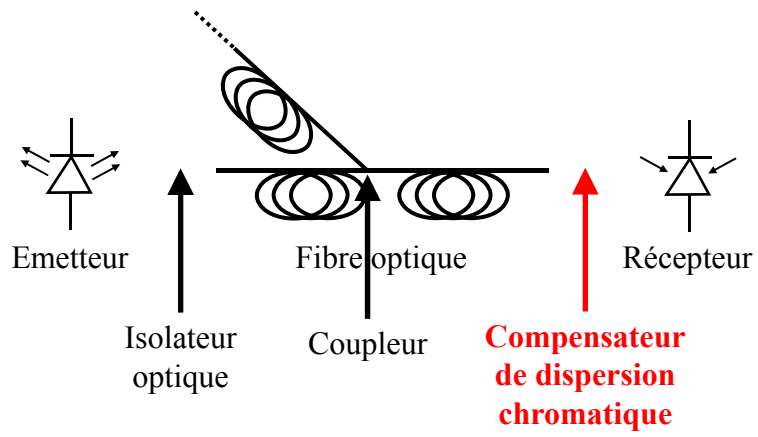


$\Rightarrow$  recherche de sources lumineuses à spectre étroit (type DL DFB)

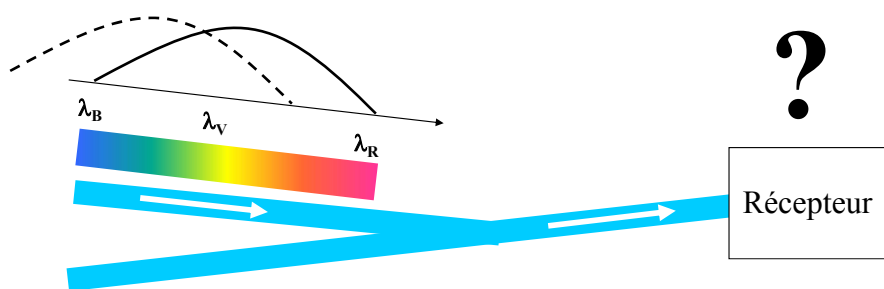
$\Rightarrow$  recherche de fibres optiques monomodes à faible dispersion chromatique

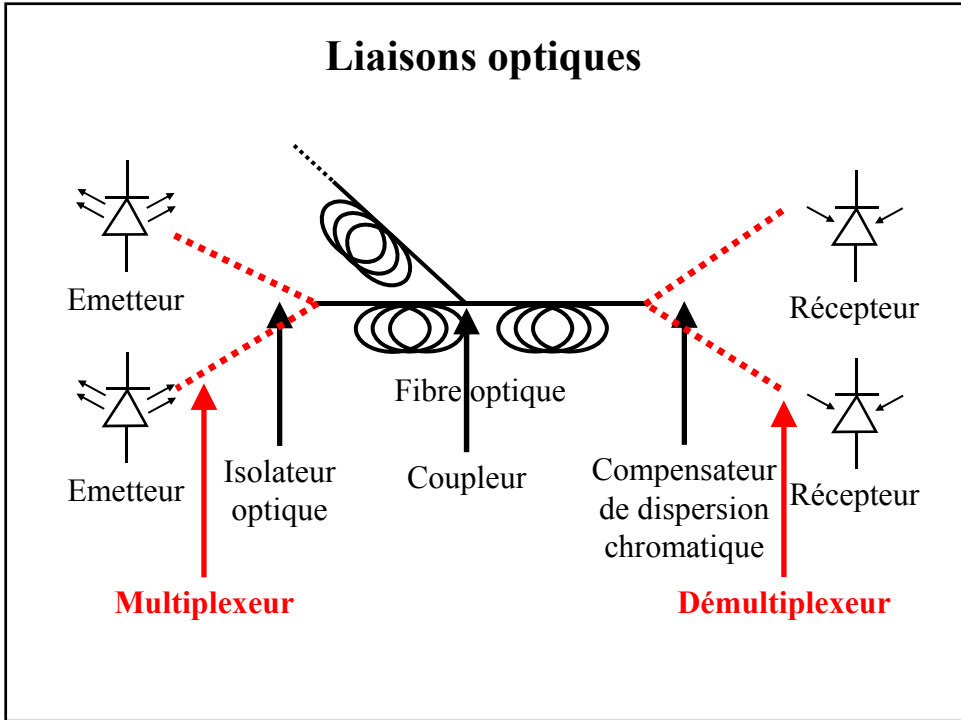
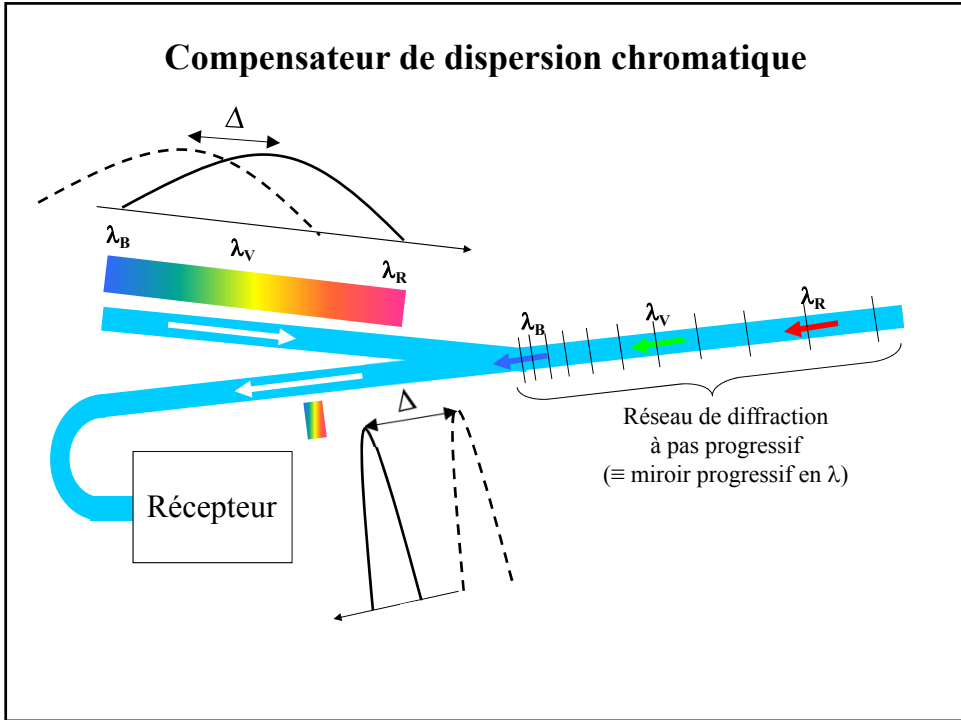
$\Rightarrow$  recherche de dispositifs compensant la dispersion chromatique « résiduelle »

## Liaisons optiques



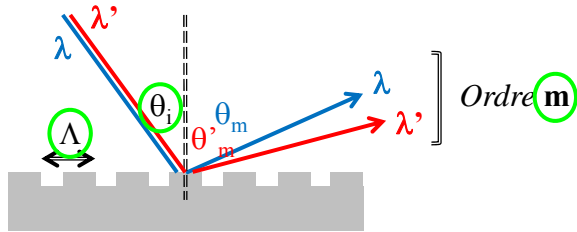
## Compensateur de dispersion chromatique





**RAPPEL**

## Réseaux de diffraction

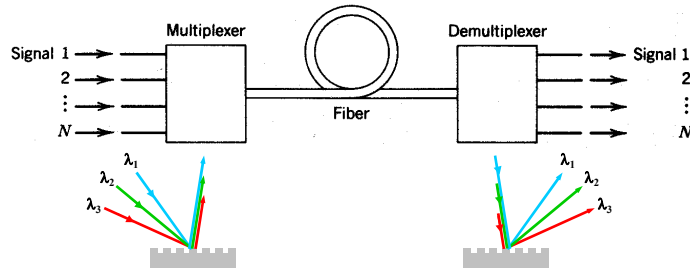


**Relation fondamentale des réseaux :** (milieu unique d'indice  $n \Rightarrow \lambda = \lambda_0/n$ )

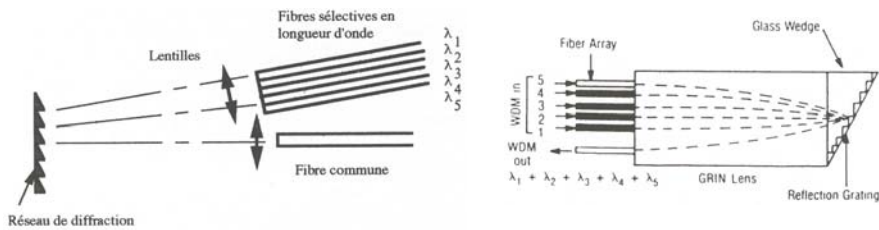
$$\Lambda (\sin \theta_i \pm \sin \theta_m) = m \lambda$$

- $\Lambda$  = pas du réseau
- $\theta_i$  = angle d'incidence
- $\theta_m$  = 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



## Multiplexage de 16 longueurs d'onde

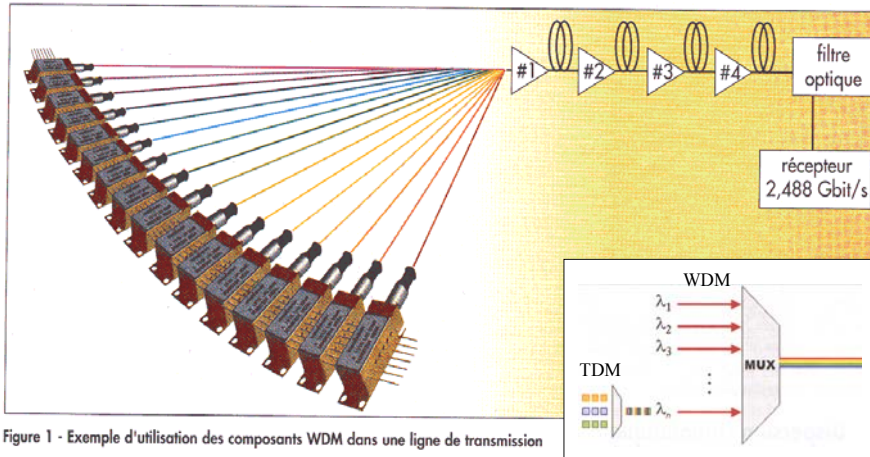


Figure 1 - Exemple d'utilisation des composants WDM dans une ligne de transmission

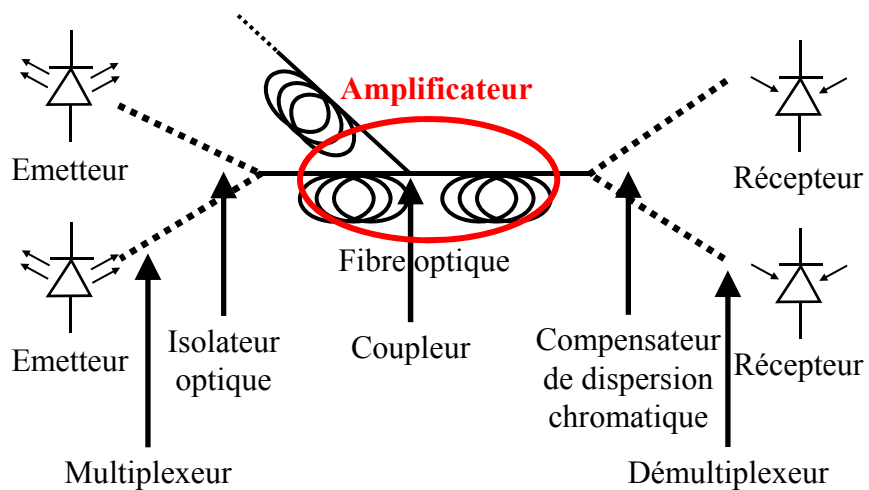
Espacement  $\Delta\lambda$  des longueurs d'onde au voisinage de 1550 nm :

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

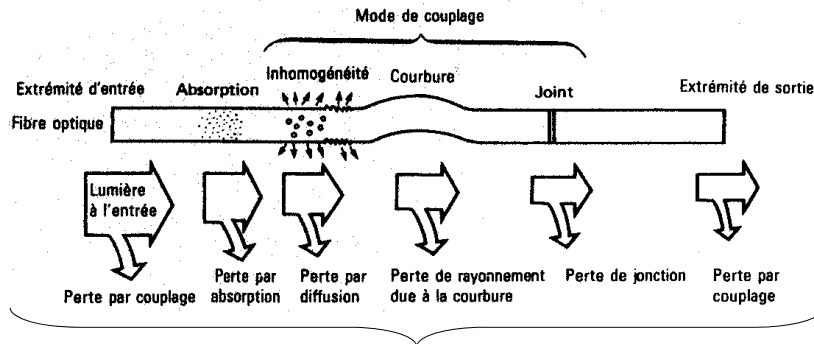
$$\Delta\nu = 50 \text{ GHz} \Leftrightarrow \Delta\lambda = 0,4 \text{ nm}$$

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

## Liaisons optiques



## Régénération de signaux (1)



Recherche d'un système amplificateur

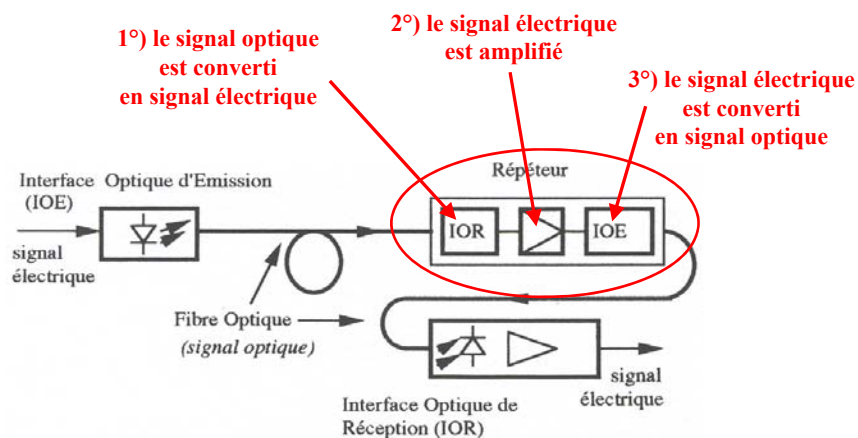
2 solutions

**Double conversion**  
(historique)

**Amplification optique**  
(actuel)

## Régénération de signaux (2)

**Double conversion** : utilisation de convertisseurs O/E et E/O (méthode classique)



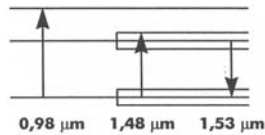
Gain = 40 à 50 dB ;  $P_o$  (sortie) < 10 dBm

**Inconvénient : amplification d'une seule  $\lambda$  par amplificateur**

### Régénération de signaux (3)

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

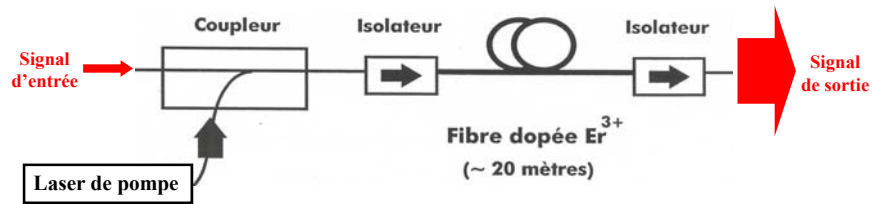
Niveaux d'énergie de l'Erbium dans une matrice de silice



→ Deux raies de pompage optique : 0,98  $\mu\text{m}$  et 1,48  $\mu\text{m}$

→ Er présente des recombinaisons radiatives autour de 1,53  $\mu\text{m}$

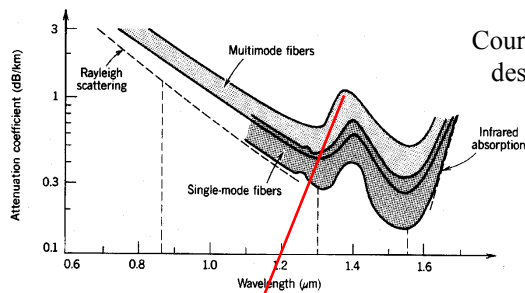
Schéma d'un amplificateur à fibre dopée Erbium



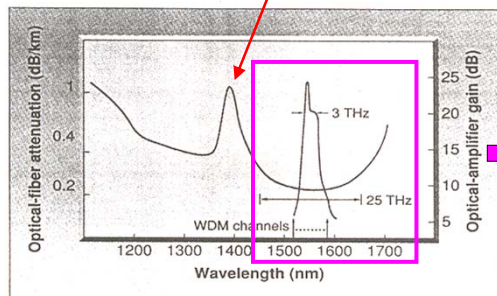
Gain = 30 à 40 dB ;  $P_o$  (sortie)  $\sim$  20 dBm

**Avantage : amplification simultanée de plusieurs  $\lambda$  voisins de 1,5  $\mu\text{m}$**

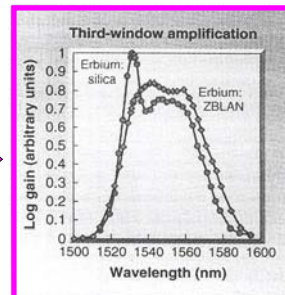
### Les EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier)



Courbes d'atténuation des fibres de silice

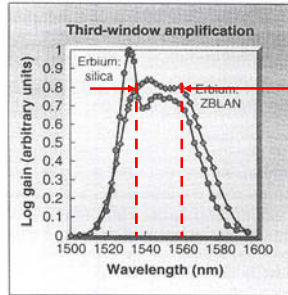


Courbe de gain d'un EDFA



## Les EDFA (2)

### Egalisation du gain d'un EDFA

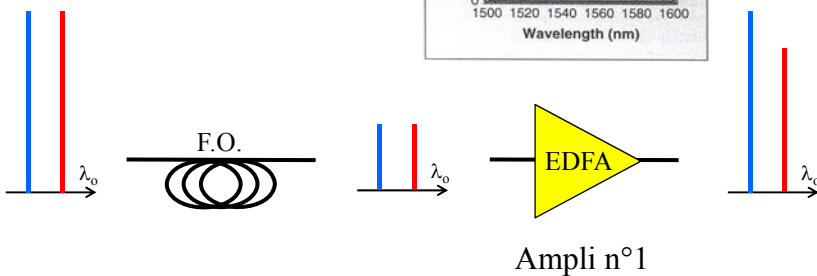
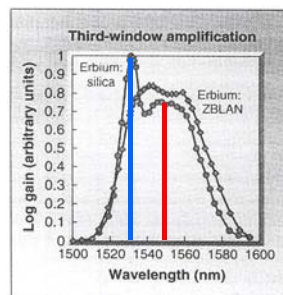


Plusieurs EDFA en cascade vont entraîner une réduction de la bande spectrale d'amplification

???

## Les EDFA (2)

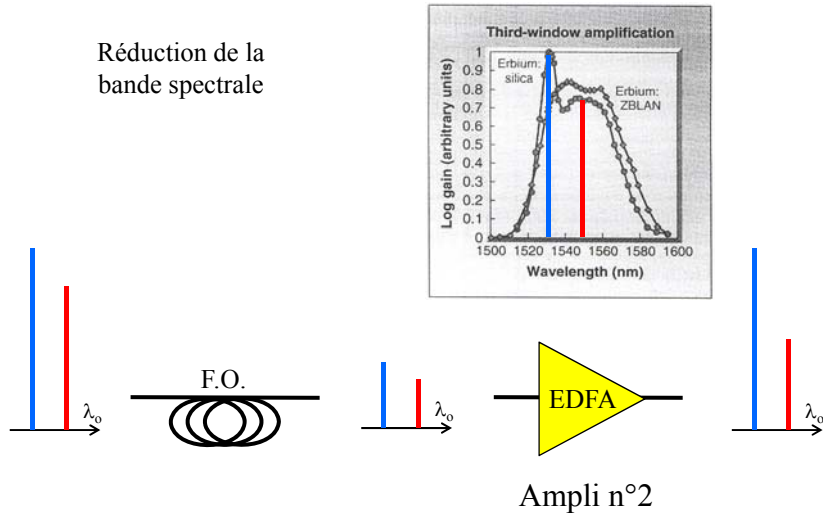
Réduction de la bande spectrale...  
Pourquoi ?





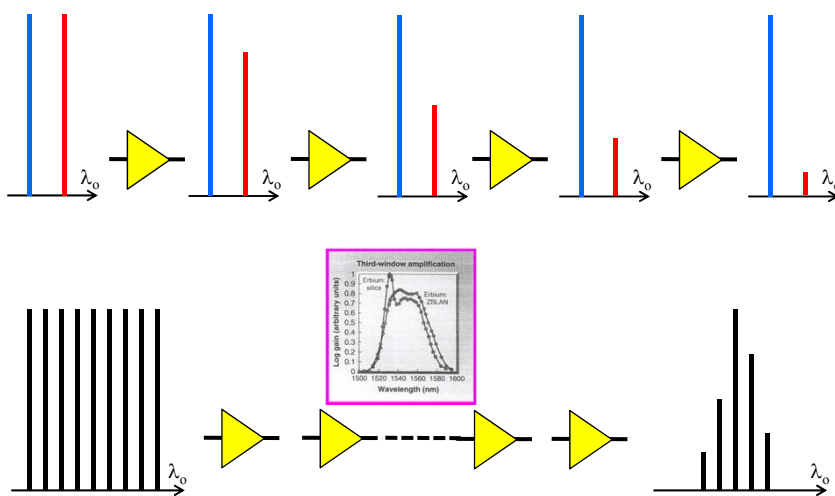
## Les EDFA (2)

Réduction de la bande spectrale



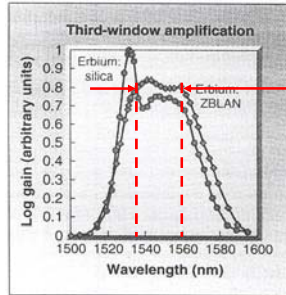
## Les EDFA (2)

Réduction de la bande spectrale



## Les EDFA (2)

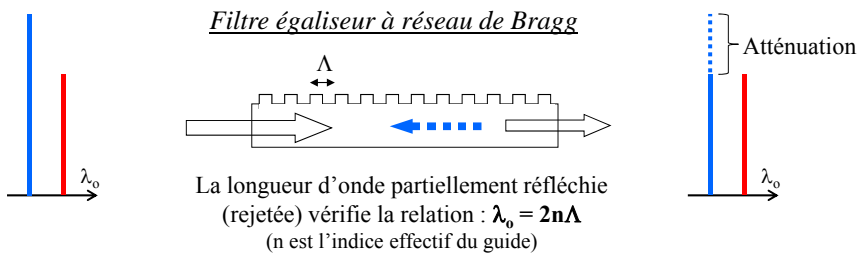
### Egalisation du gain d'un EDFA



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

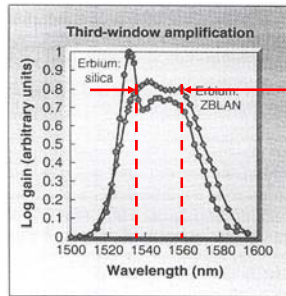


Utilisation de fibres à réseau de Bragg pour rejeter partiellement, en sortie de l'amplificateur, les longueurs d'onde les plus puissantes (Filtre égaliseur de gain)



## Les EDFA (2)

### Egalisation du gain d'un EDFA

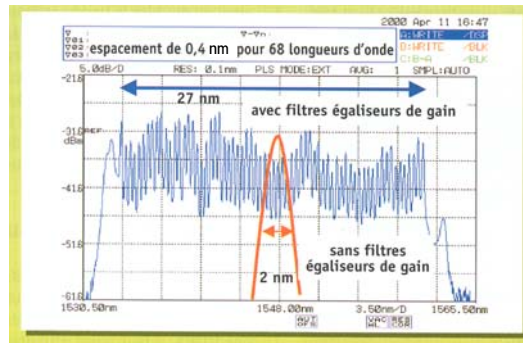


Plusieurs EDFA en cascade vont entraîner une réduction de la bande spectrale d'amplification



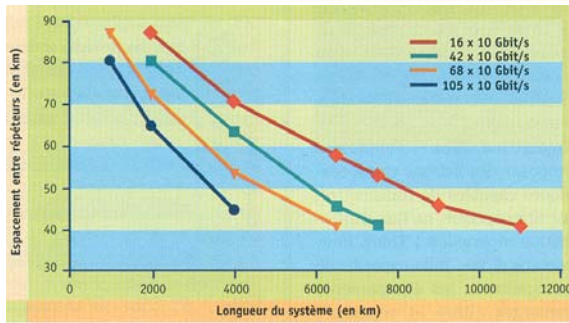
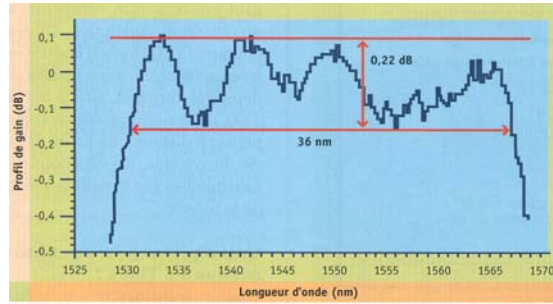
Utilisation de fibres à réseau de Bragg pour rejeter partiellement, en sortie de l'amplificateur, les longueurs d'onde les plus puissantes (Filtre égaliseur de gain)

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



### Les EDFA (3)

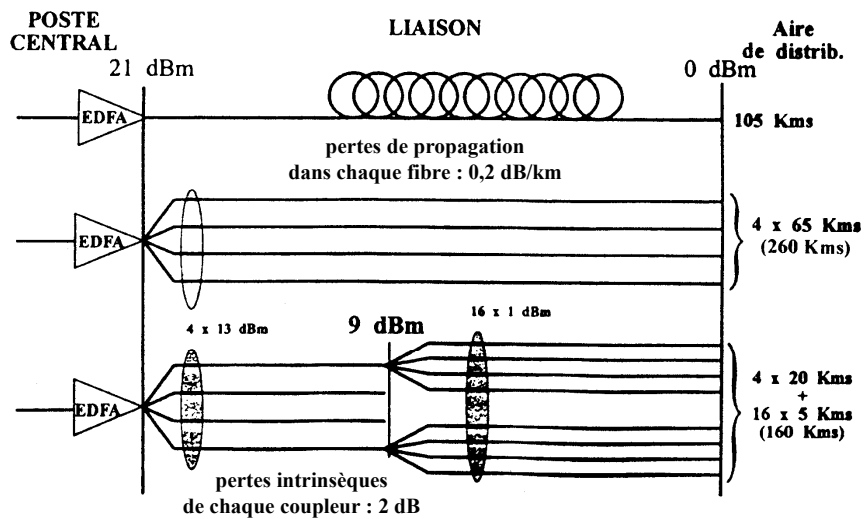
Spectre d'amplification d'un EDFA large bande avec filtre égaliseur



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

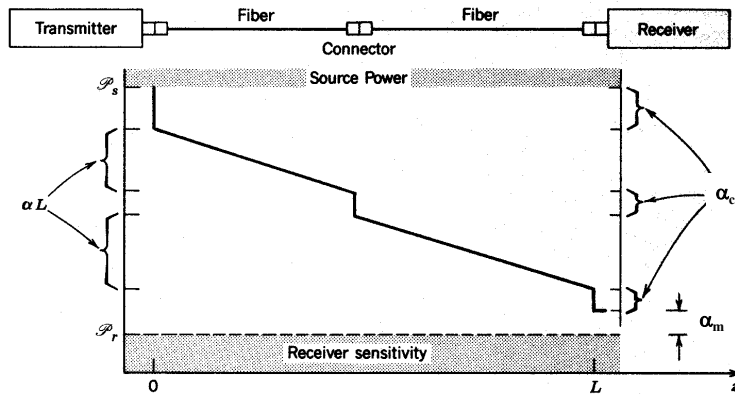
### Réseaux de transmissions optiques

Exemples de réseaux de distribution à amplificateur optique



## Bilan de liaison (1)

Bilan de puissance à débit fixe



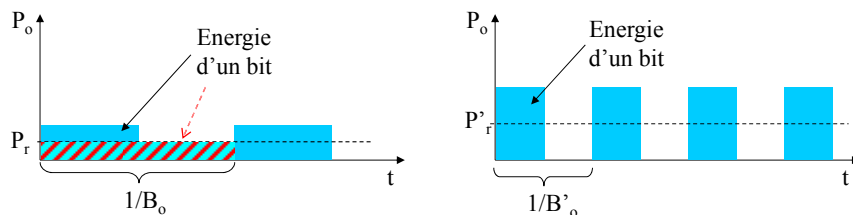
$$P_r \text{ (dBm)} = P_s \text{ (dBm)} - \Sigma \alpha \text{ (dB)} + \Sigma G \text{ (dB)}$$

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

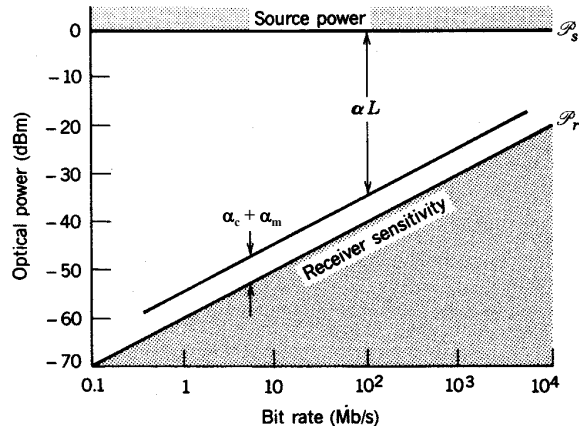
Le **paramètre fondamental** à prendre en compte est  
 l'**énergie minimum reçue par bit** :  $N_{\min} \cdot h\nu$  ; soit donc :  $P_{r-\min} / B_o$



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

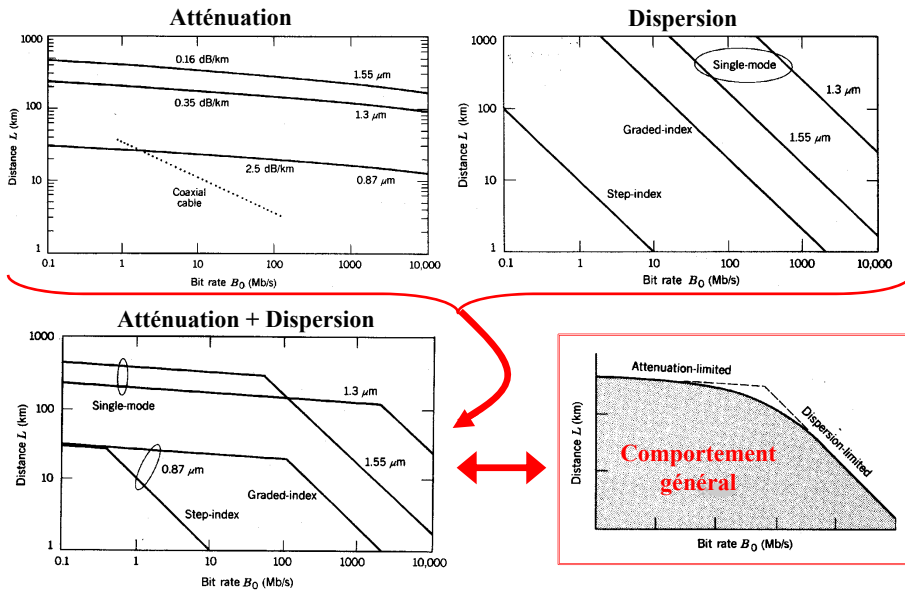
### Bilan de liaison (3)



$$L_{MAX} = L_0 - (10/\alpha) \log B_0$$

### Bilan de liaison (4)

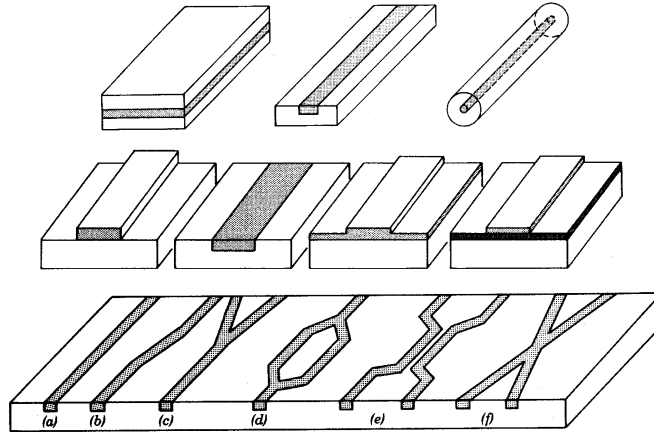
Bilan complet de liaison (atténuation + dispersion)



## Optique intégrée

C'est la technologie qui permet d'associer, sur un même substrat, des éléments et composants pouvant assurer différentes fonctions optiques

➡ Nécessité de réaliser des guides d'ondes optiques



**Figure 7.3-4** Different configurations for waveguides: (a) straight; (b) S bend; (c) Y branch; (d) Mach-Zehnder; (e) directional coupler; (f) intersection.

# FIN