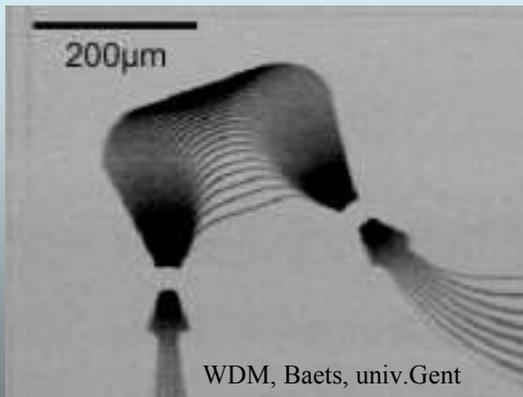


Télécommunications optiques

Yves MOREAU, Université Montpellier II



Cours M2

Plan du cours

- Les télécommunications par fibres optiques
 - I-Fibres et guides optiques
 - II- Les sources
 - III- les photodétecteurs
 - IV-amplification optique
 - IV-Fonctions optiques (coupleurs, isolateurs, filtres passifs, multiplexage, modulateurs externes ...)
 - V-Signaux et systèmes de transmission sur fibre optique (codages, modulations, non linéarités, WDM, FDM...)
 - VI- techniques de transmission dans les réseaux de télécommunications (hiérarchie numérique, câbles sous-marins, réseau terrestre, transmissions locales, distribution)

Free investit 1 milliard d'euros dans la fibre optique

Le Monde.fr

- **L**e fournisseur d'accès à Internet (FAI) Free a décidé de se lancer dans le très haut débit. Lundi 11 septembre, il a annoncé qu'à compter du premier semestre 2007, il commercialiserait une offre à 50 mégabits par seconde, reposant sur la fibre optique, pour 29,99 euros par mois. Aujourd'hui, l'ADSL permet des débits s'élevant au maximum à 28 mégabits.
- Concrètement, ce réseau passera sous les rues - à Paris, par exemple, dans les égouts -, puis, après accords avec les syndicats, la fibre optique sera installée directement chez le client. C'est ce que l'on appelle le FTTH, pour fibre optique jusqu'à l'abonné. Il suffit ensuite de remplacer les boîtiers ADSL par des boîtiers optiques.

L'optique pour les télécommunications

- Très faible atténuation (0.1 dB/ km),
- Très large bande passante (25 THz)
- Faible poids, très petite taille
- Sécurité électrique : isolation totale entre terminaux, utilisation en ambiance explosive... insensible et non générateur de parasites,
- Inviolabilité
- Avantage économique : inférieur au système de cuivre, progrès au niveau des raccordements.



Bob Harrington got on his bike outside his Palo Alto home, which has a fiber-optic connector box for high-speed Internet access.

Surfing faster with fiber

Palo Alto residents test high-speed Internet lines

By Todd Wilfong
CONSUMER STAFF WRITER

Bob Harrington has long been an Internet speed demon. Three years ago, the Palo Alto angel investor signed up for cable modem service, letting him access the Net at speeds dozens of times faster than traditional dial-up modems.

But Harrington says his new connection leaves his cable modem in the dust. For the past few months, Harrington and his neighbors have been testing a next-generation fiber-optic network, which is three to four times faster than cable or DSL service. The speed advantage over wireless and satellite is even starker.

"It feels real good to be one of the latest Internet users on the planet," said Harrington, who pays \$85 per month for the service. "It is way too early to tell just how my Internet habits will change, but they certainly will."

Although more than 10 million U.S. households now have DSL or cable modem service, making Internet access as common



A single strand of optical fiber can handle 5 million telephone conversations

as 50/50 as separate conversations, a scattering of neighborhoods around the country are now experimenting with even faster links, using packets of light instead of electricity to move data at blazing speeds.

To be sure, access is limited to a handful of new developments and experimental trials. Indeed, the figure

PLUGGED IN

Close to 1 in 10 U.S. households now has high-speed Internet service

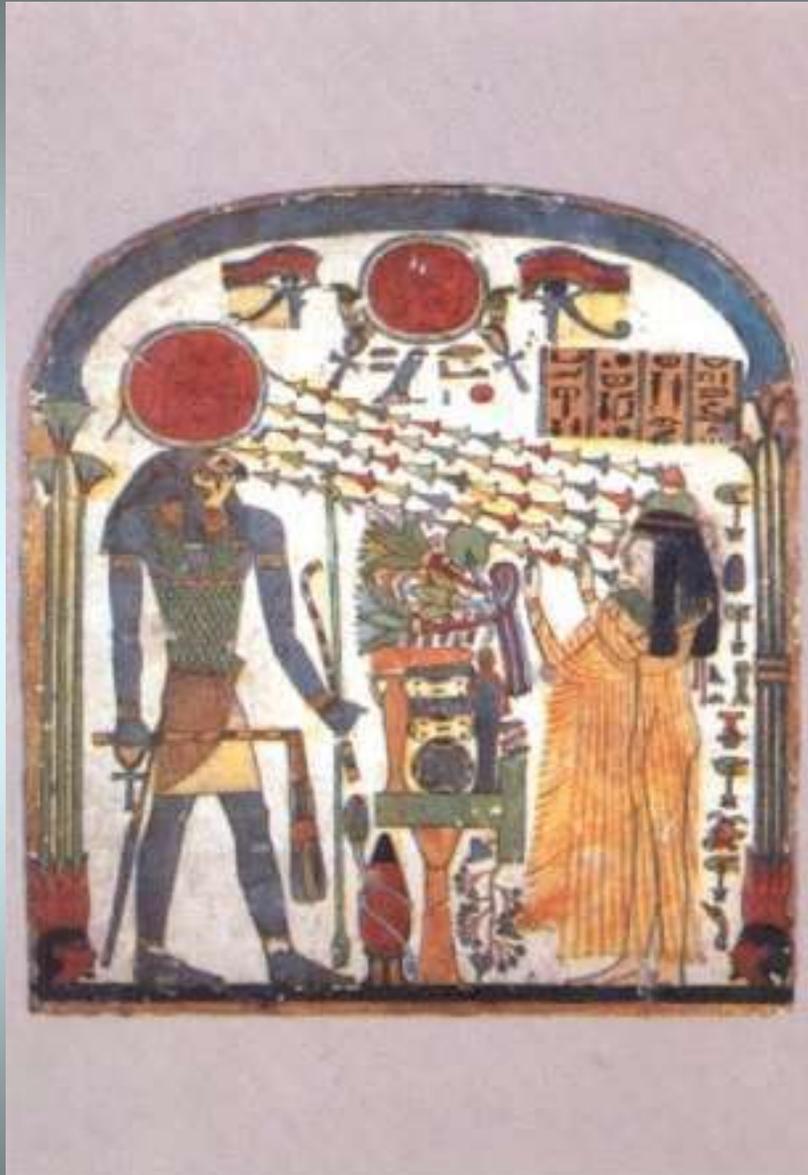
	U.S. users	Speed (megabit per second)*	Monthly price
Cable modem	7 million	1.5	\$40
DSL	3.3 million	1 to 1.5	\$0
Wireless	300,000	0.5 to 3.5	\$0
Satellite	61,000	0.15 to 0.5	75
Fiber	N/A	1.5 to 6	85

- * Typical download speed. Varies by company and location.
- † AT&T Broadband is the dominant cable modem provider in the Bay Area.
- ‡ Speeds and prices are for Sprint Broadband Direct, which operates in the Bay Area but has stopped signing up customers.
- § Speed and price are for Starburst/OnNet Net work.
- ¶ Speeds and prices are for Palo Alto's Fiber-to-the-Home trial.

Source: Yankee Group, Chronicle research

is so small that the Yankee Group, a Boston research firm, hasn't bothered to include fiber optics in its projections for residential high-speed Internet access.

► SPEED: Page B2, Cont. 3



Avant-hier !

La communication optique, voire le multiplexage en longueur d'onde (WDM) sont de vieilles idées !

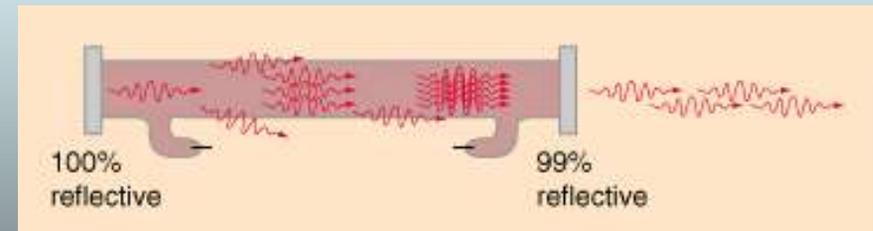
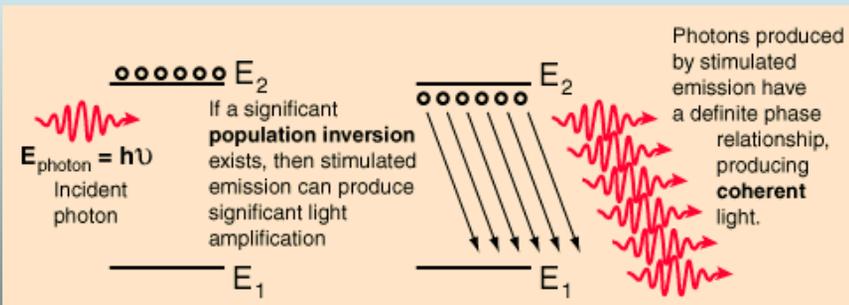
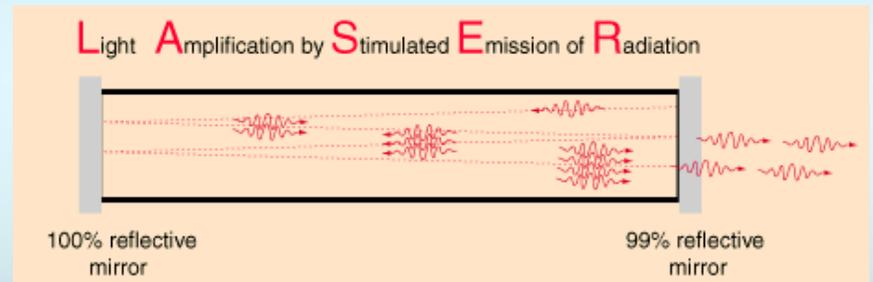
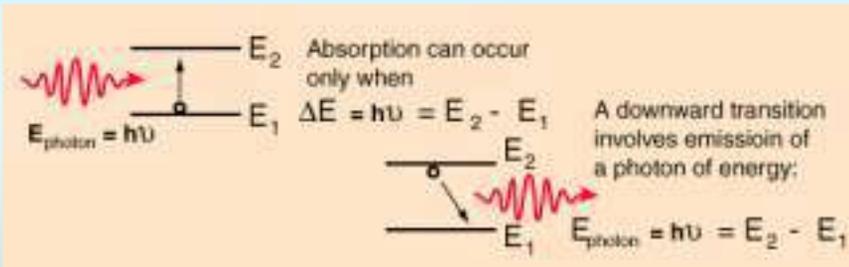
Rê Horaky (le Soleil à midi) transmet un faisceau lumineux multicolore à Tapéret (800-900 B.C.)
Le Louvre, Paris

•Le renouveau de l'optique : deux inventions

Source de lumière cohérente: le laser (Schawlow,1957)

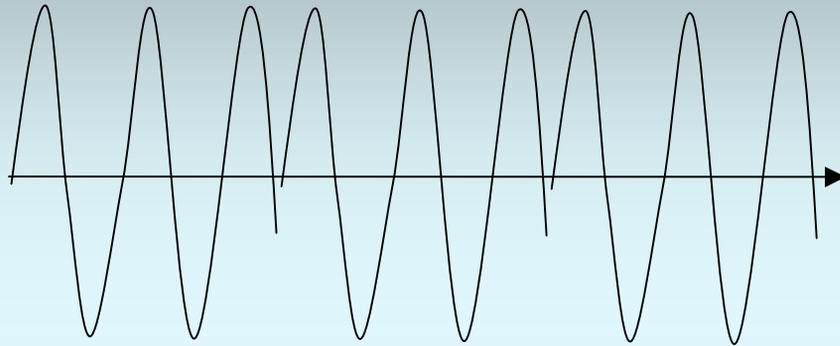
Laser CO₂ à 10,6μm absorbé, volumineux

Laser AlGaAs (1969)



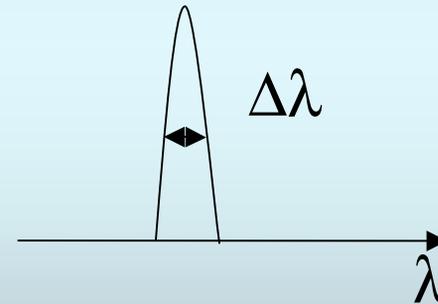
Cohérence

La lumière est constituée d'une suite de trains d'ondes



Plus les trains sont longs,
plus la lumière est dite
cohérente

$$L_c = \lambda^2 / (\pi \Delta \lambda)$$



Cette cohérence est dite « temporelle »

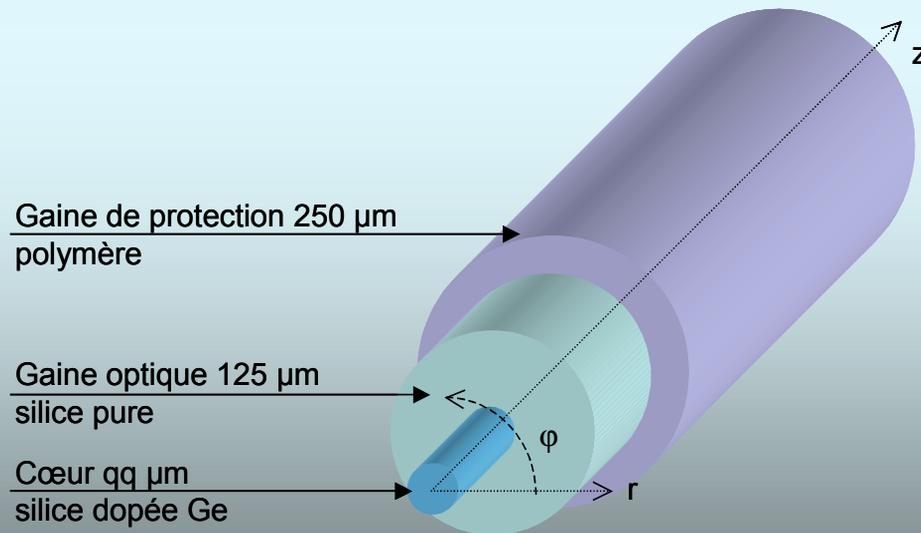
Cohérence spatiale : source = ensemble de points en phase
=> faible divergence

Nota : $\lambda = c/v$ ($1.5 \mu\text{m} \leftrightarrow 2 \cdot 10^{14} \text{Hz}$)

$dv = -cd\lambda/\lambda^2$ ($10 \text{ GHz} \leftrightarrow 0,8 \text{ nm}$)

Autre avancée : la fibre optique

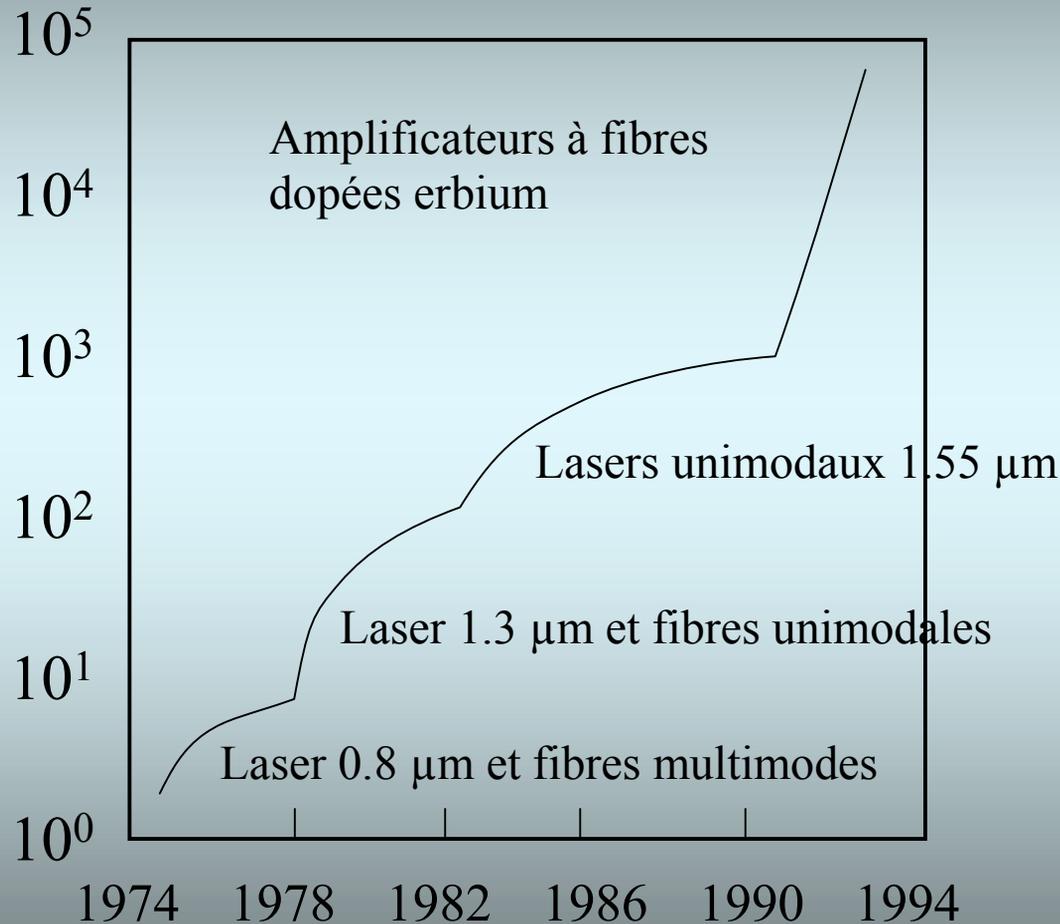
- 1970: fibre de silice < 20 dB/km
- Aujourd'hui, 0.15 dB/km seulement de pertes à $1,55 \mu\text{m}$



Domaines d'utilisation

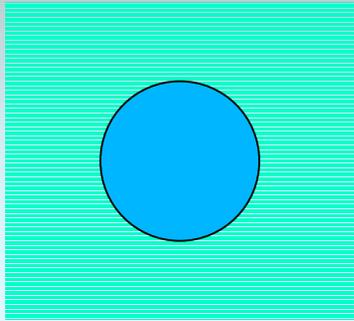
- Télécommunications : Liaisons urbaines et interurbaines (grande capacité), liaisons sous-marines
- Vidéocommunications
- Liaison et réseaux de données
- Liaisons industrielles
- Capteurs et instrumentation

Télécommunications : produit débit x distance (Gbits/s*km)

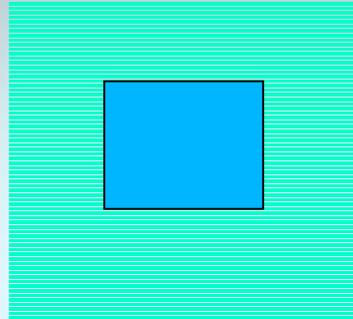


Aujourd'hui :
qq Terabits sur
tronçons de 100
km

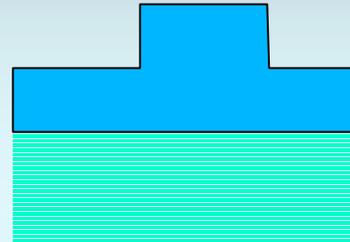
Fibres et guides optiques



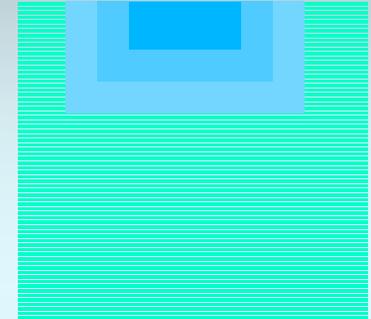
Fibre circulaire



Guide enterré

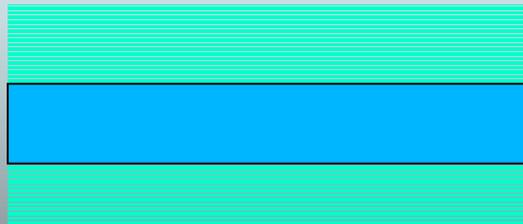


Guide en arête

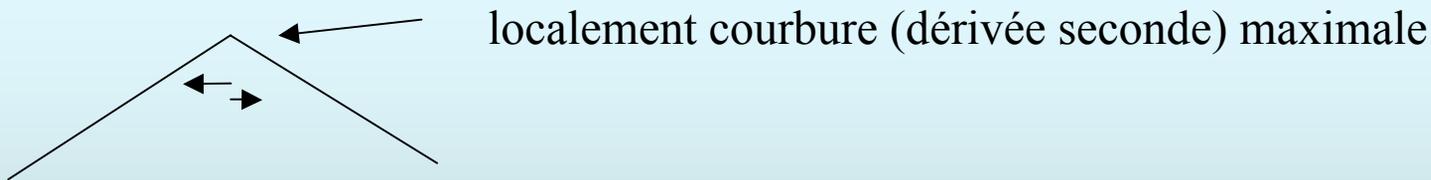
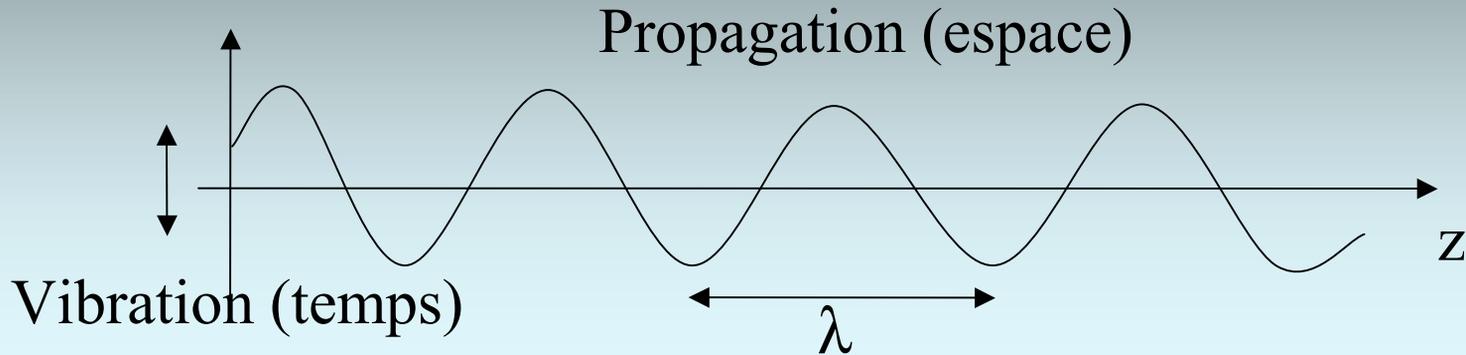


Guide diffusé

Guide plan



Propagation optique

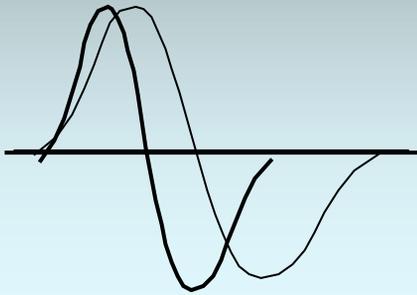


Pour une onde plane $E_x = E_0 \cdot \exp(j(\omega t - kz))$

Nombre d'onde $k = 2\pi/\lambda$

Vitesse de phase $v_\phi = \omega/k$

Indice de réfraction



- Onde électromagnétique : E et H
- Rapport E/H = Impédance Z
- Vide : $Z_0 = E_0/H_0 = 377 \Omega$

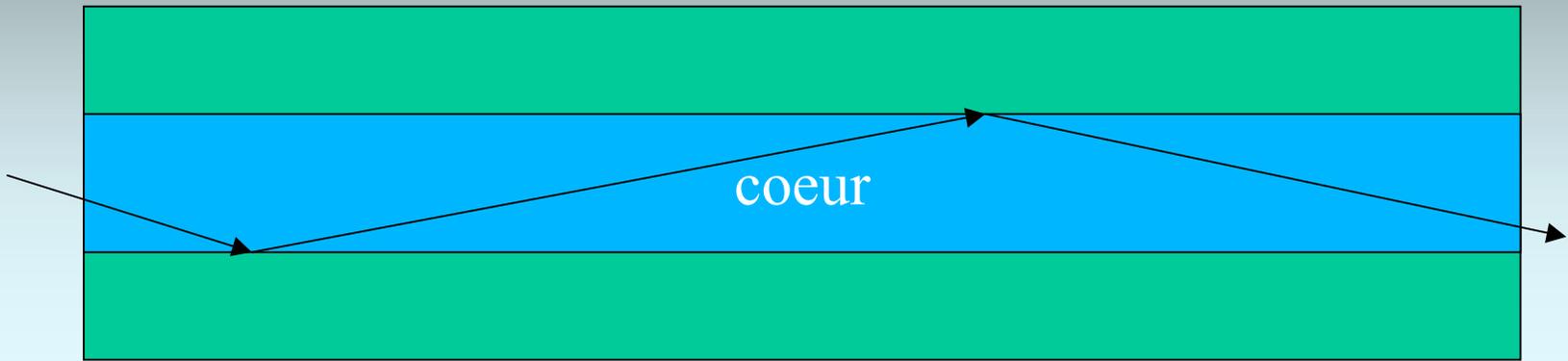
$$k = \beta = k_0 * n = 2\pi/\lambda_0 * n, Z = Z_0/n$$

Raccourcissement de la période avec l'indice,
diminution de la vitesse de phase $V_\varphi = \omega/k$

$$E(x,y) * \cos(\omega t - \beta z) = E(x,y) * \cos(\omega(t + \Delta t) - \beta(z + \Delta z)) \text{ si } \Delta z = \omega/\beta \Delta t$$

Si milieu hétérogène, l'onde propagée est associée à un indice « effectif » de valeur intermédiaire

Mécanismes de guidage



La lumière est piégée dans la zone d'indice un peu plus élevé

$$\text{Paramètre de guidage : } \Delta = \frac{n_c^2 - n_g^2}{2 n_g^2} = \frac{n_c - n_g}{n_g}$$

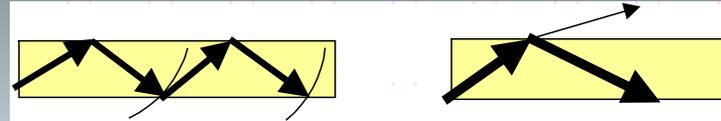
Guidage « fort » d'autant plus que Δ est grand

$$\text{Fréquence normalisée : } V = 2\pi a / \lambda n_{\text{sub}} \sqrt{2 \Delta}$$

a = rayon du cœur (fibre), épaisseur (guide rectangulaire)

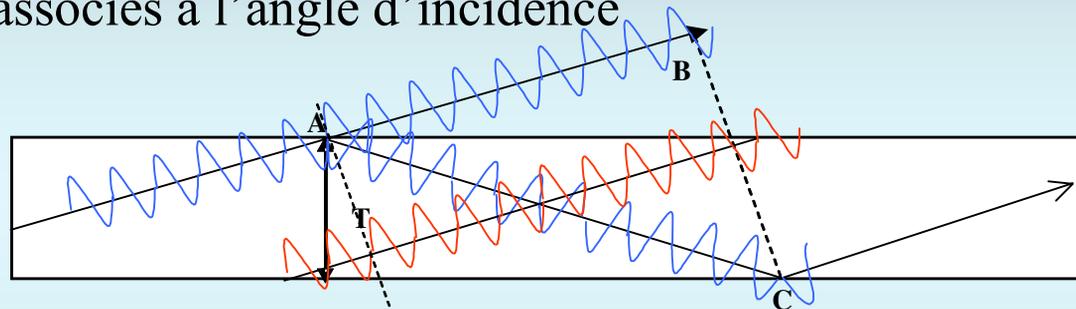
Propagation dans un guide

Dans un guide, plusieurs milieux



Approche géométrique

Modes associés à l'angle d'incidence



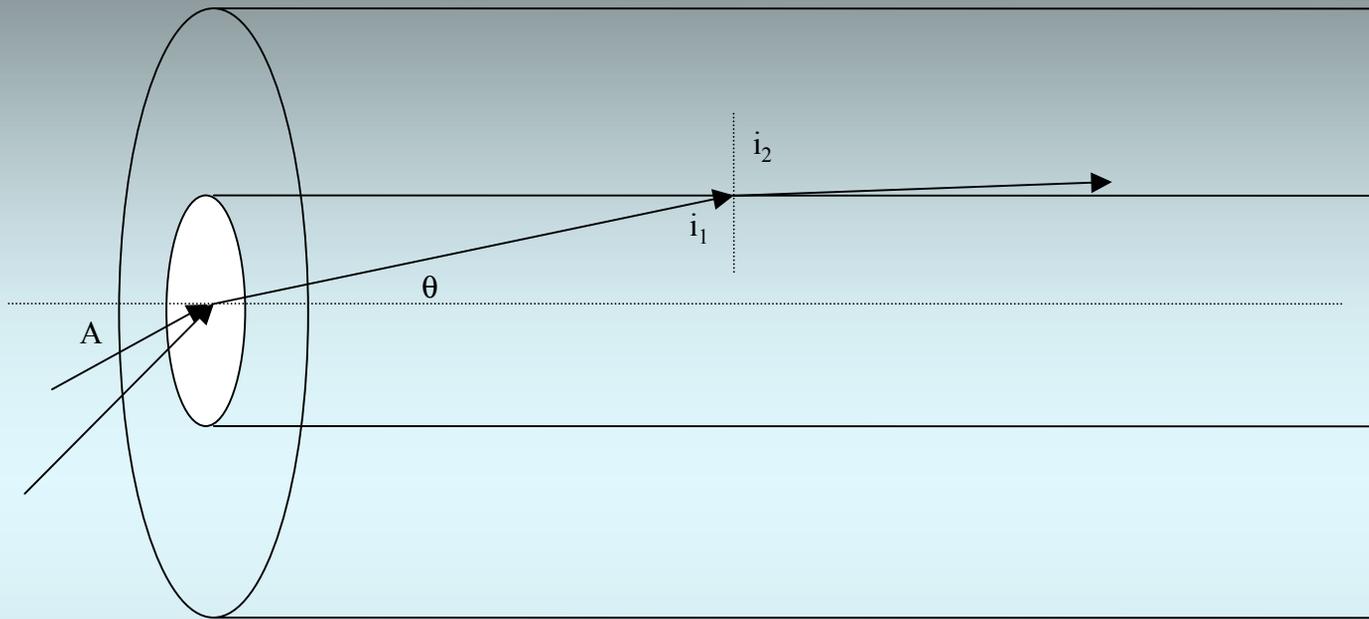
Réflexion totale aux interfaces, en fait au voisinage (« Gooth Hanchen »)
Rayons en phase après une double réflexion

$$\frac{2\pi AC}{\lambda/n_g} - \pi - \frac{2\pi AB}{\lambda/n_g} - \pi = 2m\pi : \text{différence de chemin} = \text{nombre entier de longueurs d'onde}$$

$$\frac{2\pi AC}{\lambda/n_g} (1 - \cos(2\alpha_m)) = \frac{2\pi T/\sin\alpha_m}{\lambda/n_g} (1 - \cos(2\alpha_m)) = 2(1+m)\pi \Rightarrow \sin(\alpha_m) = \frac{\lambda/n_g * (1+m)}{2*T}$$

Indice « effectif » = $n_g * \cos(\alpha_m)$, m ordre du « mode »

Fibre optique: ouverture numérique

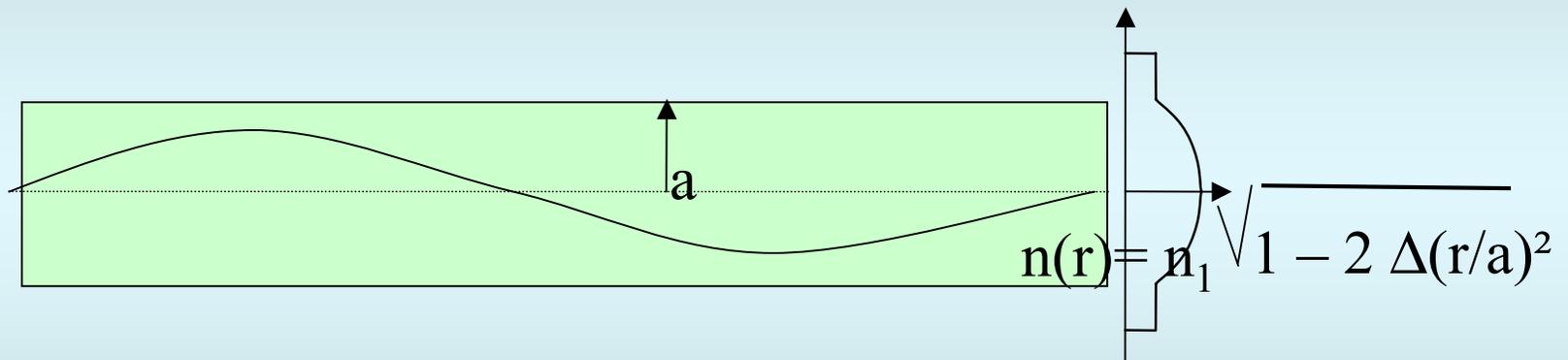


$n_1 \cdot \cos \theta_c = n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ (θ et i_1 complémentaire) et
 pour i_2 limite ($= 90^\circ$) $n_1 \cos \theta_c = n_2 = n_1 \sqrt{1 - \theta_c^2}$

$$n_1^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_c = n_2^2 \Rightarrow n_1 \sin \theta_c = \sqrt{(n_1 - n_2 + n_2)^2 - n_2^2}$$

$$= \text{ON} = \sin A = n_1 \sin \theta_c = n_1 \sqrt{2 (n_1 - n_2) / n_2}$$

Fibre multimode à gradient d'indice



Ouverture numérique plus faible (ON $\sim 0,2$)
 \Rightarrow 2 fois moins de puissance couplée

Fibres optiques : modes

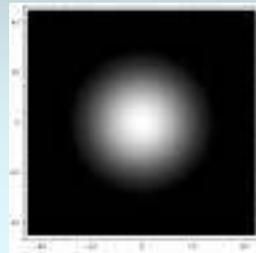
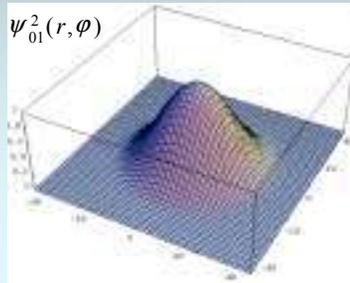
- Fibre optique : guide circulaire.
- Calcul en coordonnées cylindriques (r, ψ, z)

$$\nabla^2 E \text{ (Laplacien}(E)) = \mu_0 \epsilon_0 n^2 \partial^2 E / \partial t^2$$

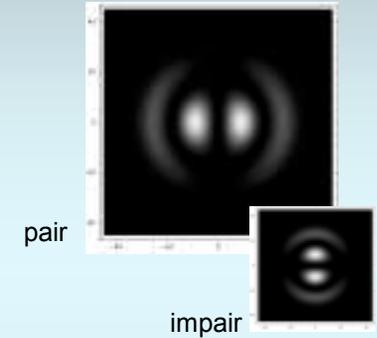
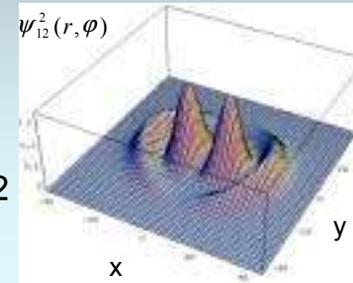
- $E(r)$ solutions en fonctions de Bessel J_v
- Ordre azimutal v : déphasage de $2\pi v$ sur un tour
- $v = 0 \Rightarrow$ modes TE_{0m} ou TM_{0m} ,
sinon modes hybrides HE_{vm} HM_{vm}
- Nombre de modes : $V^2/2$ (saut d'indice) et $V^2/4$ (gradient)
avec $V = 2\pi r / \lambda_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Quelques modes dans les fibres

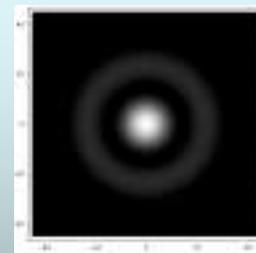
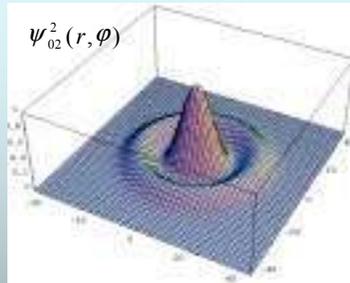
LP₀₁



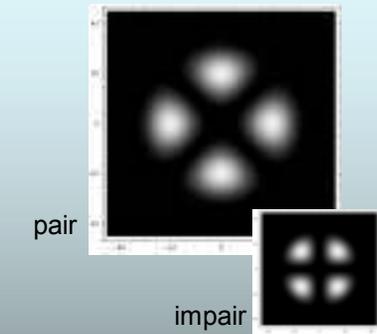
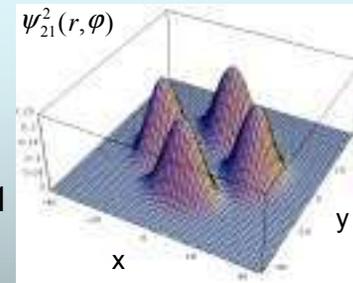
LP₁₂



LP₀₂



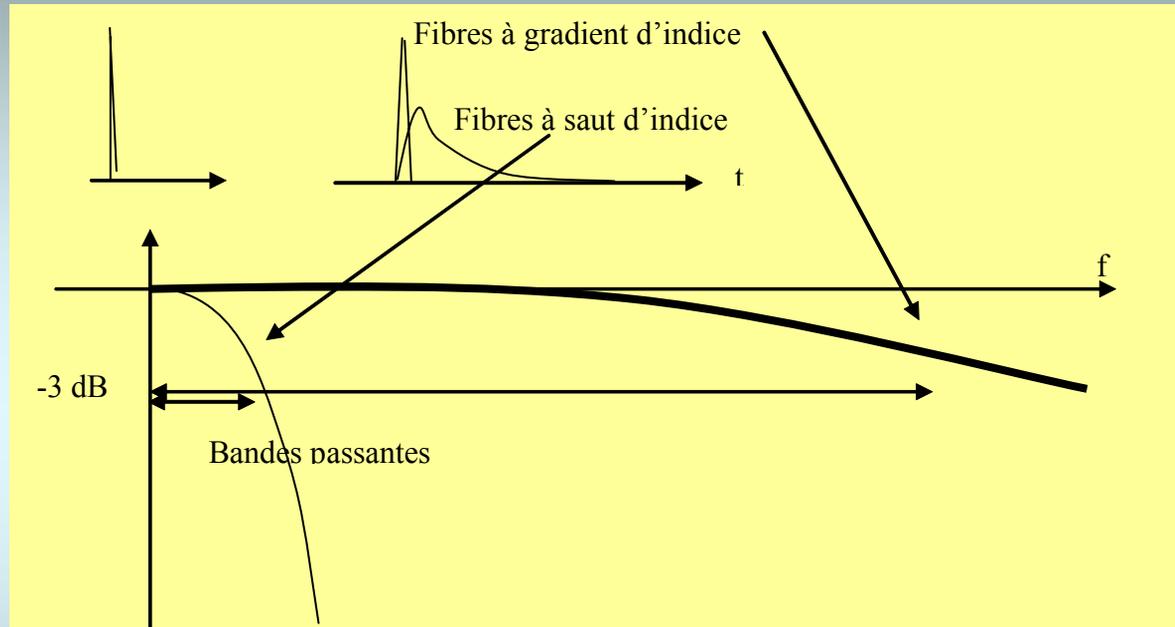
LP₂₁



Champ électromagnétique en m et θ

LP_{mn} où $m \Rightarrow \cos(m\theta)$ et $n=nb$ d'extrema en r

Dispersion fibres multimodes



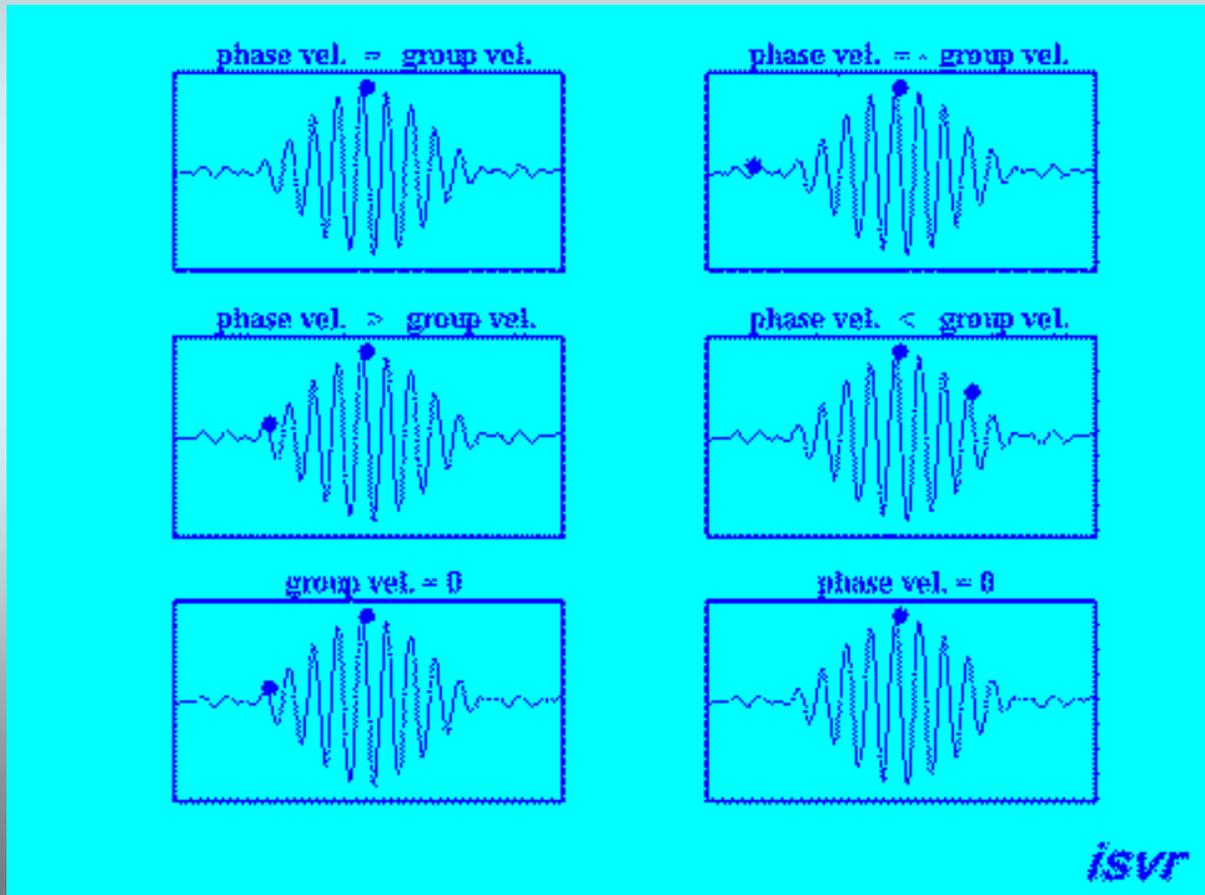
$$BP = 1 / (2 \Delta\tau_{im})$$

$$\Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_{im}^2 + \Delta\tau_c^2} \sim ON^2/2n_1c$$

BP*km = qq MHz.km (saut d'indice), qq centaines MHz.km

Vitesse de groupe

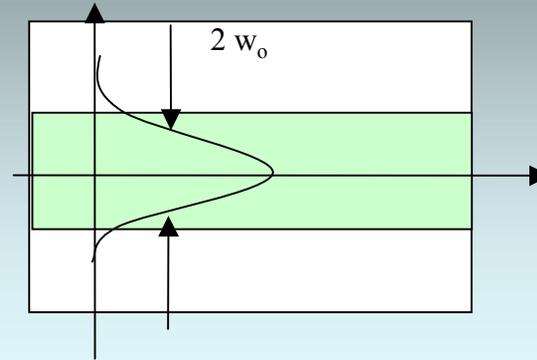
Vitesse de propagation de l'information (de l'enveloppe) $V_g = d\omega/d\beta$ [$V_\phi = \omega/\beta$]



Fibre unimodale

$$V < 2,4$$

Faibles dimensions



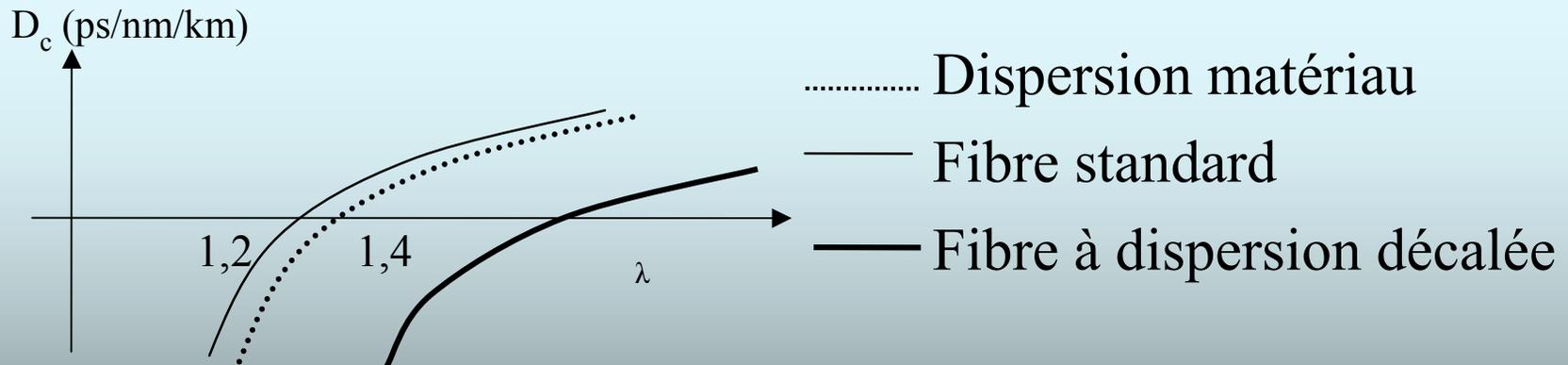
=> Peu de dispersion, dispersion chromatique seulement.

Dispersion chromatique

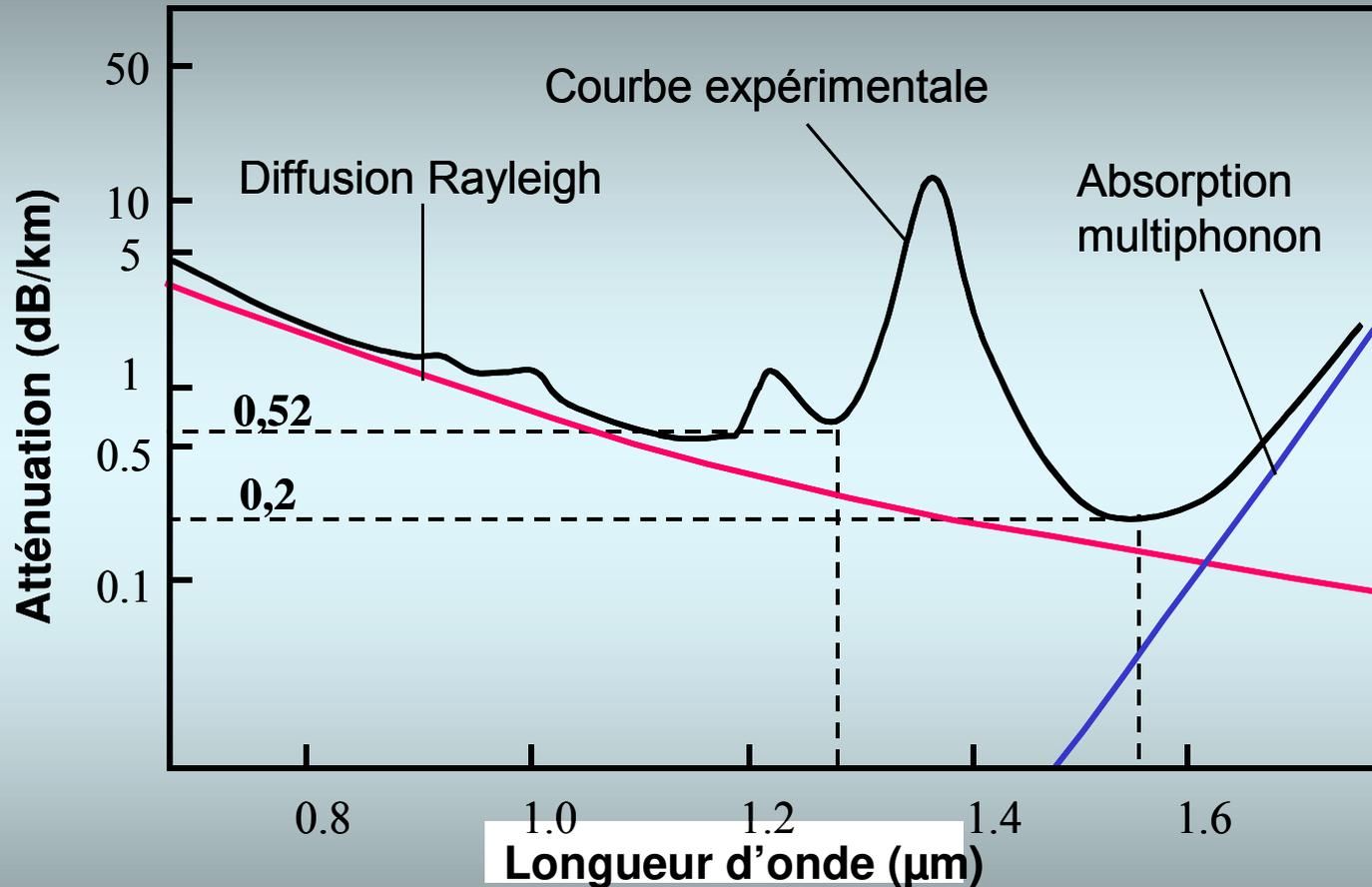
$\Delta\tau_c = D_c L \Delta\lambda$ avec $D_c = D_M + D_G$ en ps/nm/km

$D_G = (n_1 - n_2)/c\lambda \cdot 2/V^2$ pour $1.7 < V < 2.4$

$$D_M = \frac{-\lambda_0 \, d^2 n_1}{c \, d\lambda_0^2}$$



Atténuation des fibres optiques



$$P(L) = P_0 10^{-\alpha L/10}$$

Matériaux	plastique	Silice(cœur)/silicone-gaine)	Silice (cœur dopé Germanium)Saut d'indice	Silice (cœur dopé Germanium)Gradient d'indice	Silice (cœur dopé Germanium) Monomode	Verres fluorés
Diamètre cœur/gaine (μm)	980/1000	200/380	100/140	50/125	7-9/125	
Atténuation (dB/km)	200	5-10	2-5	3 à 0,85 0,9 à 1.3 μm	0.5 à 1.3	1 à 2.5μm, théor. < 0,01
λ utilisés (μm)	0,45-0,70	0.7-1	0.8-1.6	0.8-1.6	0.2 à 1.55	0.7-2
Ouverture numérique	0.5	0.4	0.3	0.2		
Bande passante (MHz km)	10	20	50	500		
résistance mécanique	souple mais déformable	limitée	bonne si protégée			fragile
Coût des systèmes	faible	moyen	assez élevé	assez faible	assez élevé	très cher
Mise en œuvre	très facile	délicate	relativement facile	Gradient d'indice		très délicate
Applications	éclairage, visualisation, transmission courte	transport d'énergie	transmission courte distance	Télécom moyenne distance, réseaux informatiques	télécom longue distance	instrumentation infrarouge



Fabrication des fibres

La synthèse des matériaux est réalisée par oxydation en phase vapeur. On obtient :

- de la silice : $SiCl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2Cl_2$
- de l'oxyde de germanium : $GeCl_4 + O_2 \rightarrow GeO_2 + 2Cl_2$
- de l'oxyde de phosphore : $GeCl_4 + O_2 \rightarrow GeO_2 + 2Cl_2$
- de l'oxyde de bore : $4BCl_3 + 3O_2 \rightarrow 2B_2O_3 + 6Cl_2$

On chauffe les gaz réactifs dans un tube de silice tournant autour de son axe et, en fonction des gaz introduits dans le tube,

On dépose des couches dont on peut faire varier l'indice : le germanium ou le phosphore augmentent l'indice, le bore ou le fluor le diminuent.

Pertes de courbure

- Pour conserver une propagation avec surfaces de phase planes perpendiculaires à l'axe de propagation, la vitesse du champ à l'extérieur devrait être plus importante, voire dépasser la vitesse de la lumière \Rightarrow la partie du champ extérieur ne participe pas à la propagation.

Rayon diminué de $a/\Delta \Rightarrow$ pertes multipliées par e

Exemple : $a = 4\mu\text{m}$, $D=4.10^{-3}$, R diminué de 1 cm \Rightarrow pertes $\times 10^4$

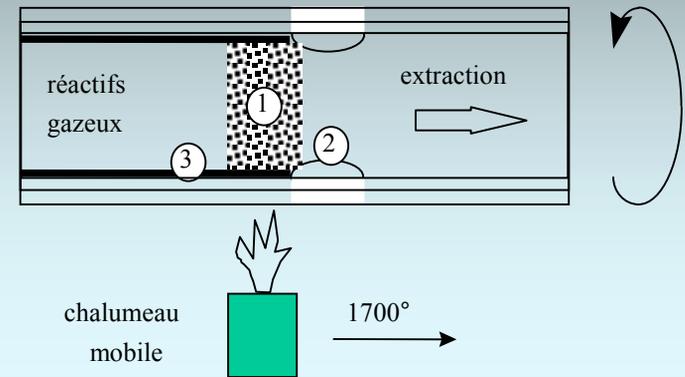
Atténuation de courbure: phénomène à seuil

Fibres standard : Rayon de qq cm toléré

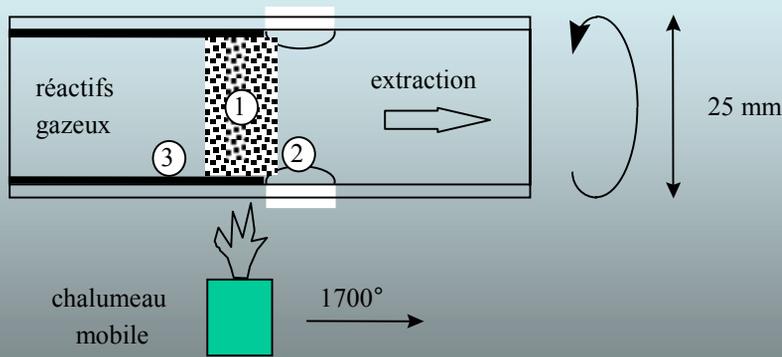
Fabrication d'une préforme (CVD)

- Réaction chimique et formation de suies.
- Dépôt de suies.
- Vitrification du dépôt.

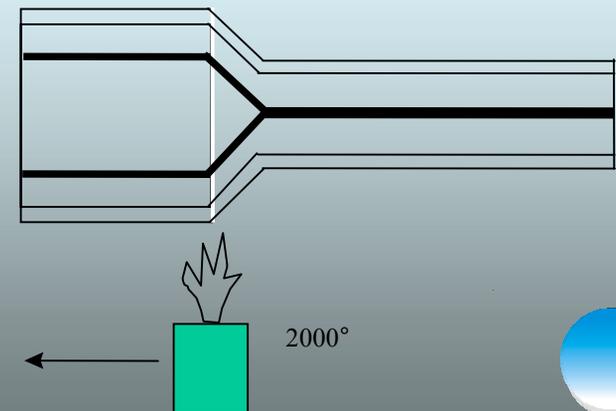
Dépôt du coeur



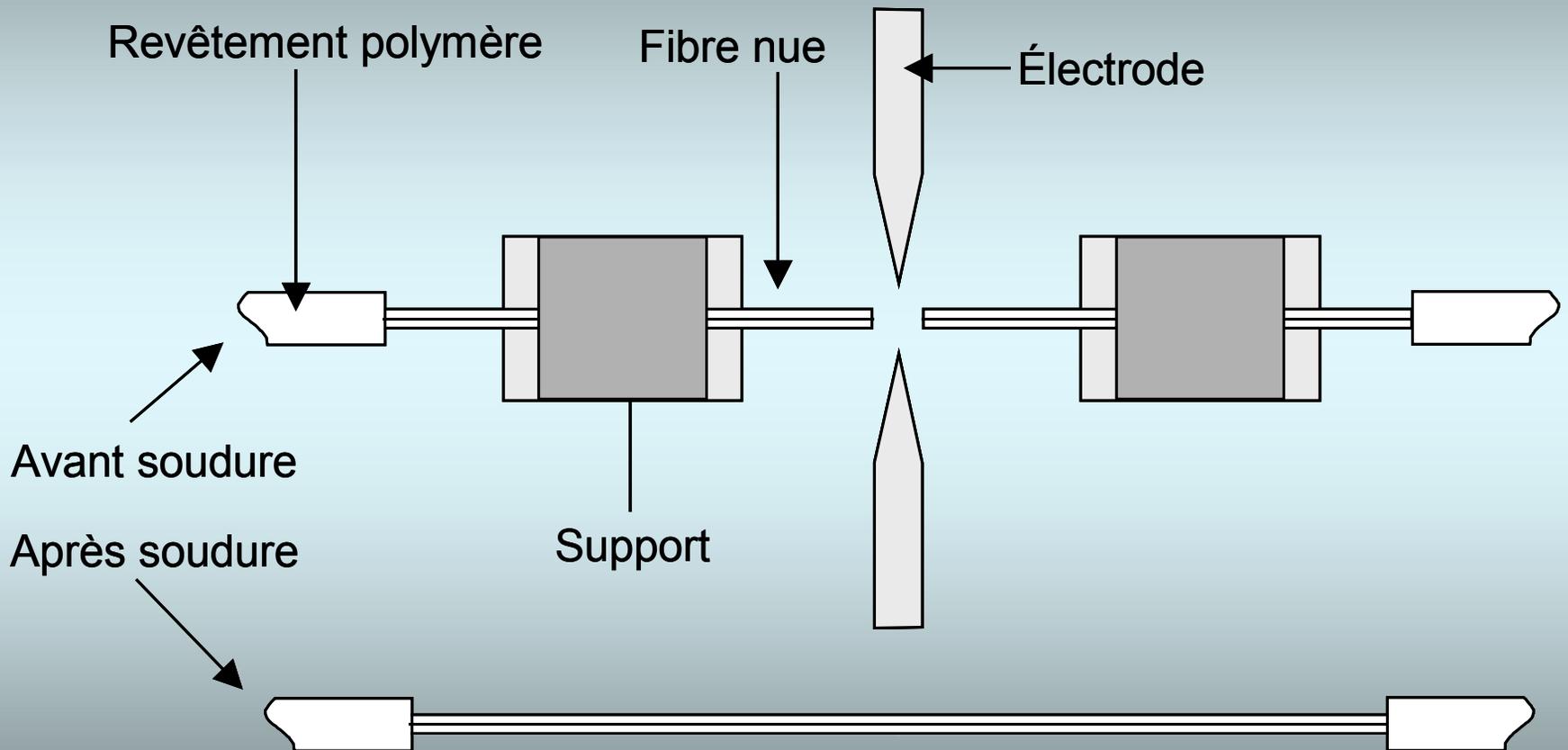
Dépôt de la gaine



Rétreint

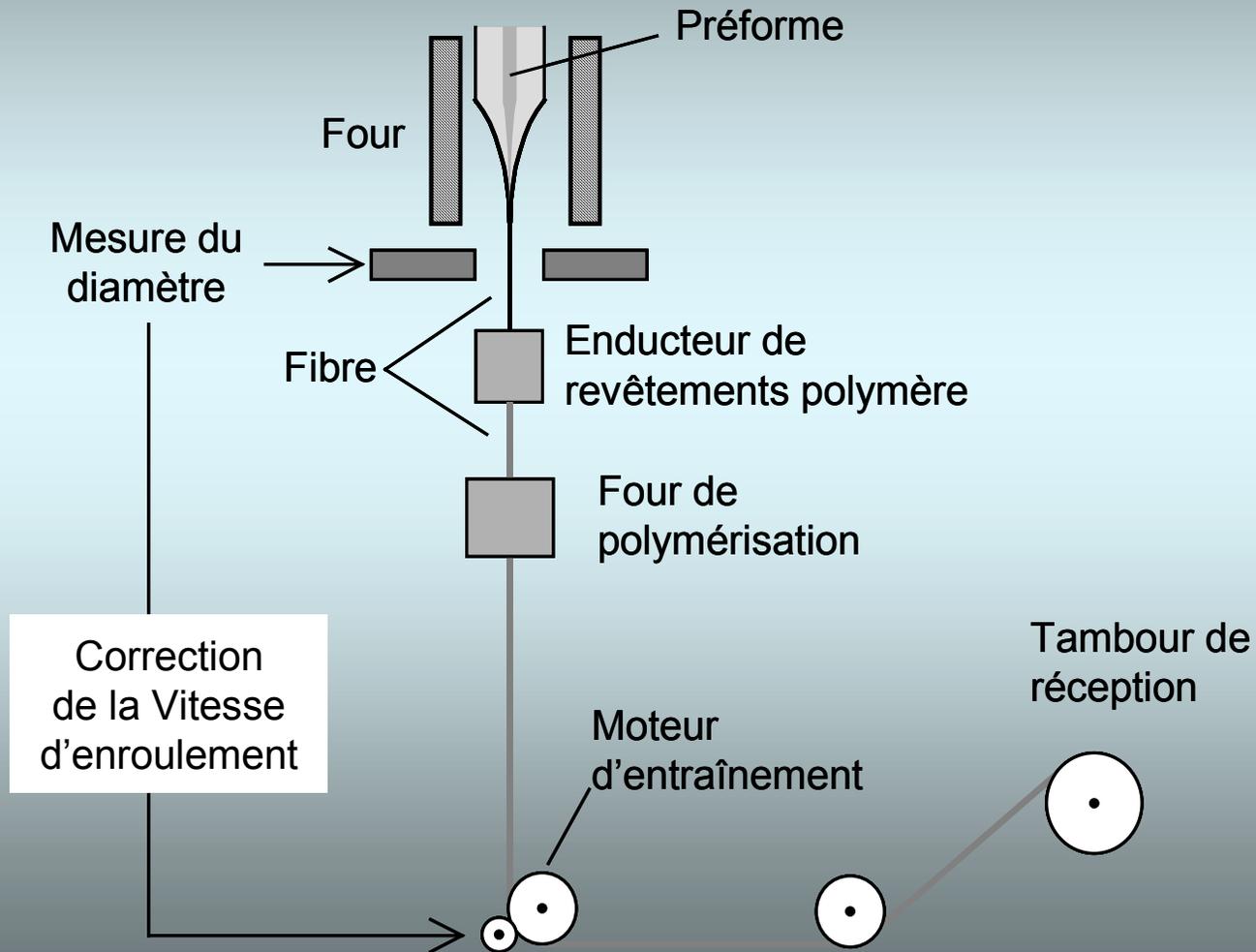


Soudeuse à fibre

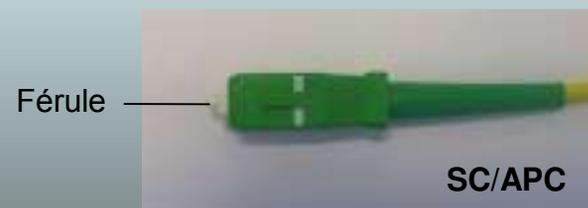
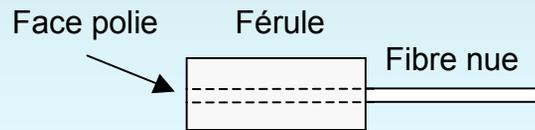


Perte estimée: 0.1 dB

Schéma d'une tour de fibrage



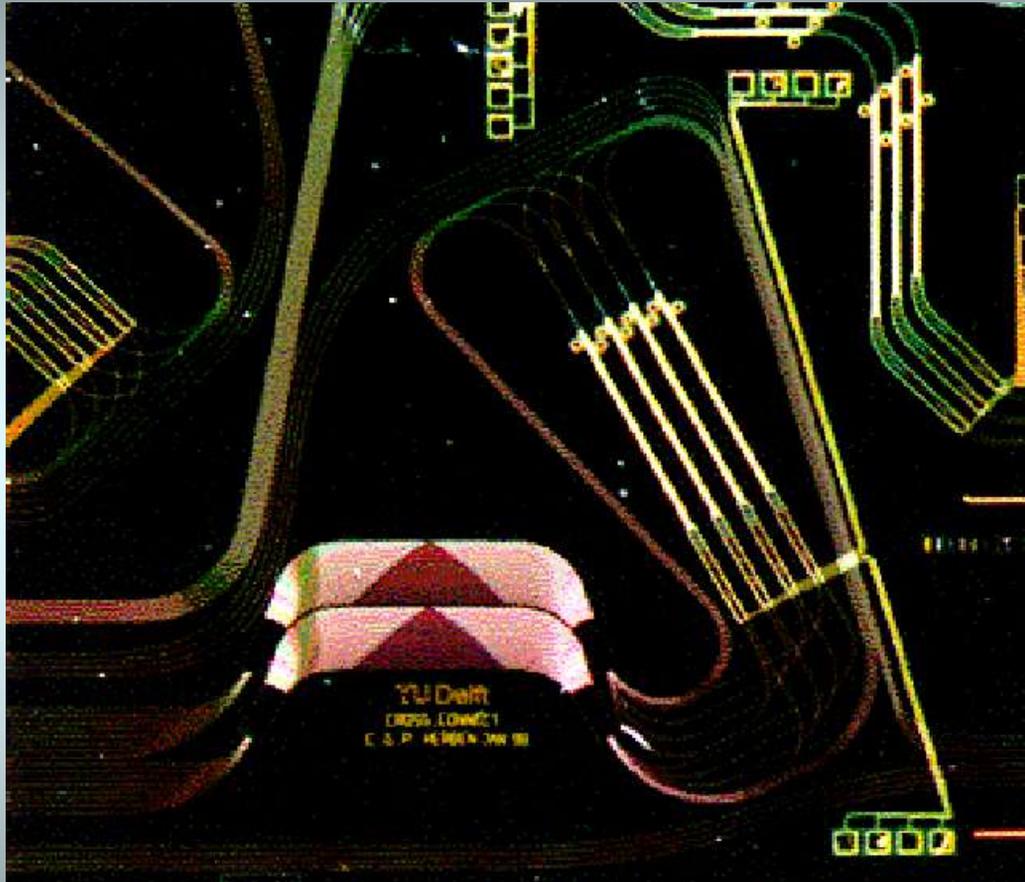
Connecteurs pour fibres



Aux extrémités des fibres

- Les circuits optiques
- Les sources
- Les photodétecteurs

« L'Optique intégrée » (Miller 1969)



Le circuit optique intégré a pour but de réaliser une fonction (filtre, couplage, etc .) et non de transmettre sans perte (fibres)

1 mm



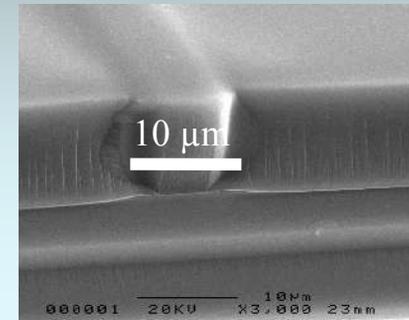
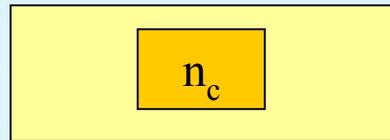
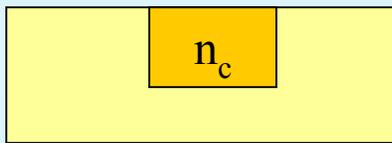
Double Phasar X connect (Herben et al., TU Delft)

Optique intégrée : des guides de lumière

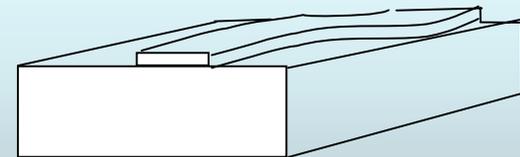
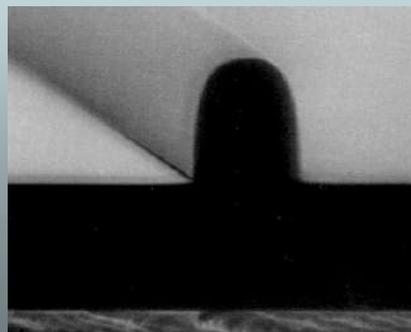
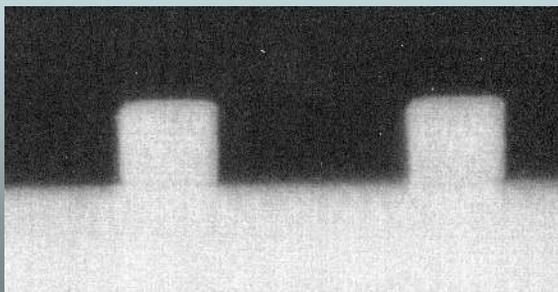
La lumière est guidée dans la zone d'indice plus élevé

Guide enterré (buried) :

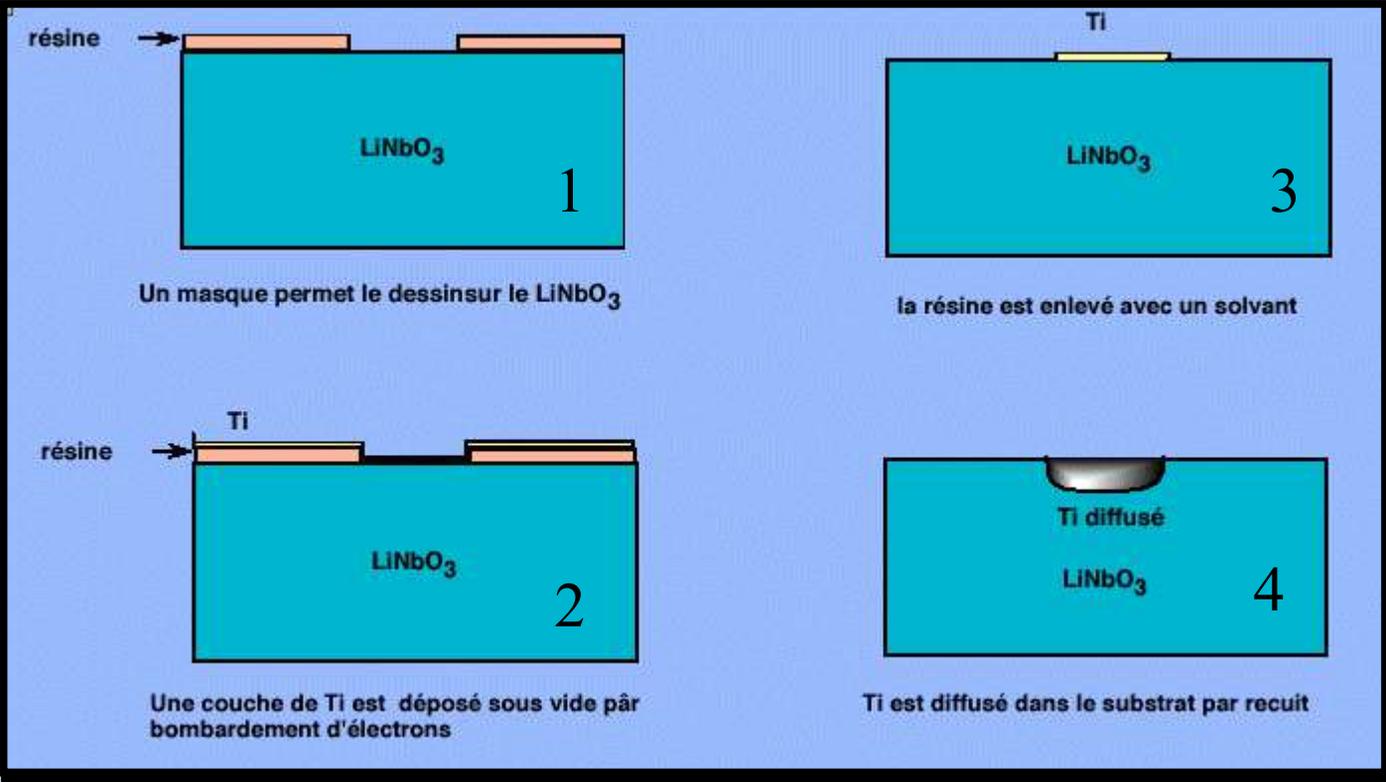
par exemple : échange d'ions sur substrat de verre, ou matériau organique polymérisé localement



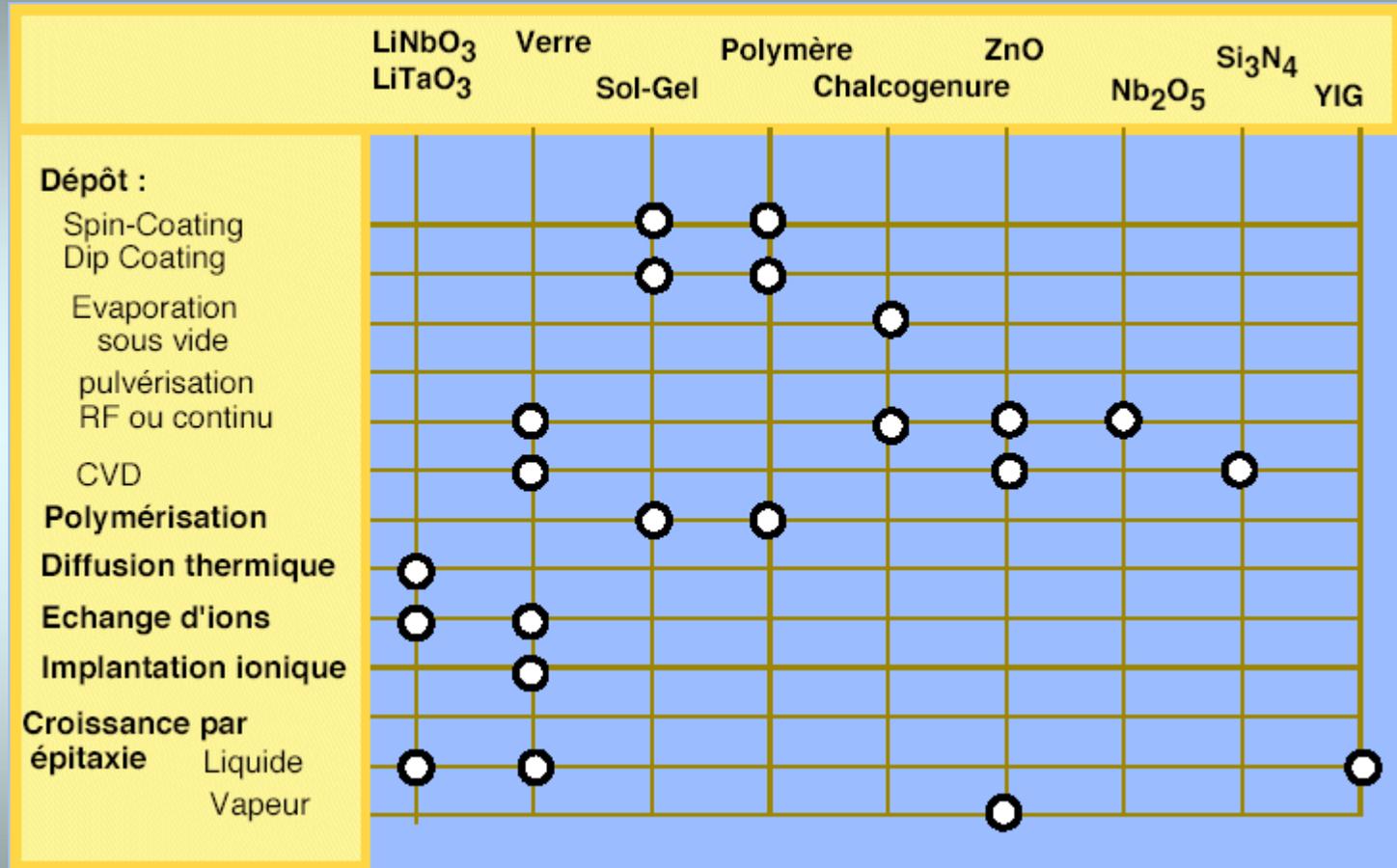
Guide en relief (ridge):



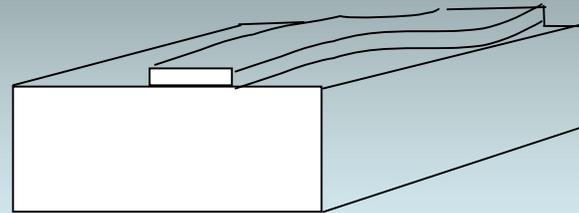
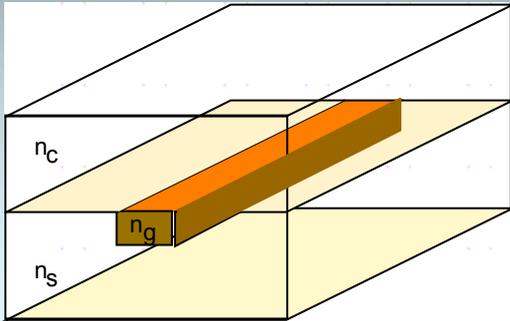
Fabrication de guides d'ondes LiNbO₃ par diffusion de Titane



De nombreux matériaux possibles :



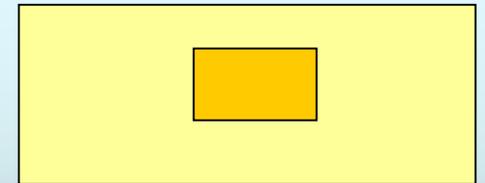
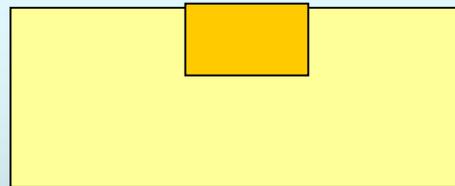
Guides à largeur limitée



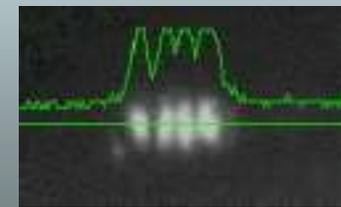
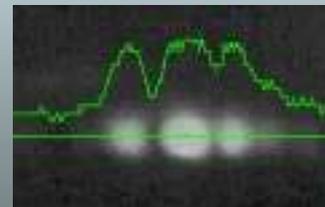
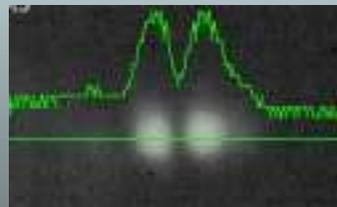
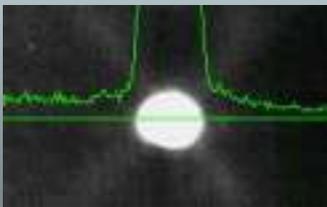
Guide relief (ridge)

Guide canal

Guide enterré



Modes : profils (en fonction de l'injection)



Exemple : interféromètre Mach Zehnder



Déphasage de $\pi =$ coupure $(J+1/2)*\lambda/n_{ep} = J* \lambda /n_{ei}$, J entier

Beaucoup utilisé : la longueur d'un bras ou l'indice dans un bras peut varier avec la température, une tension électrique etc ...

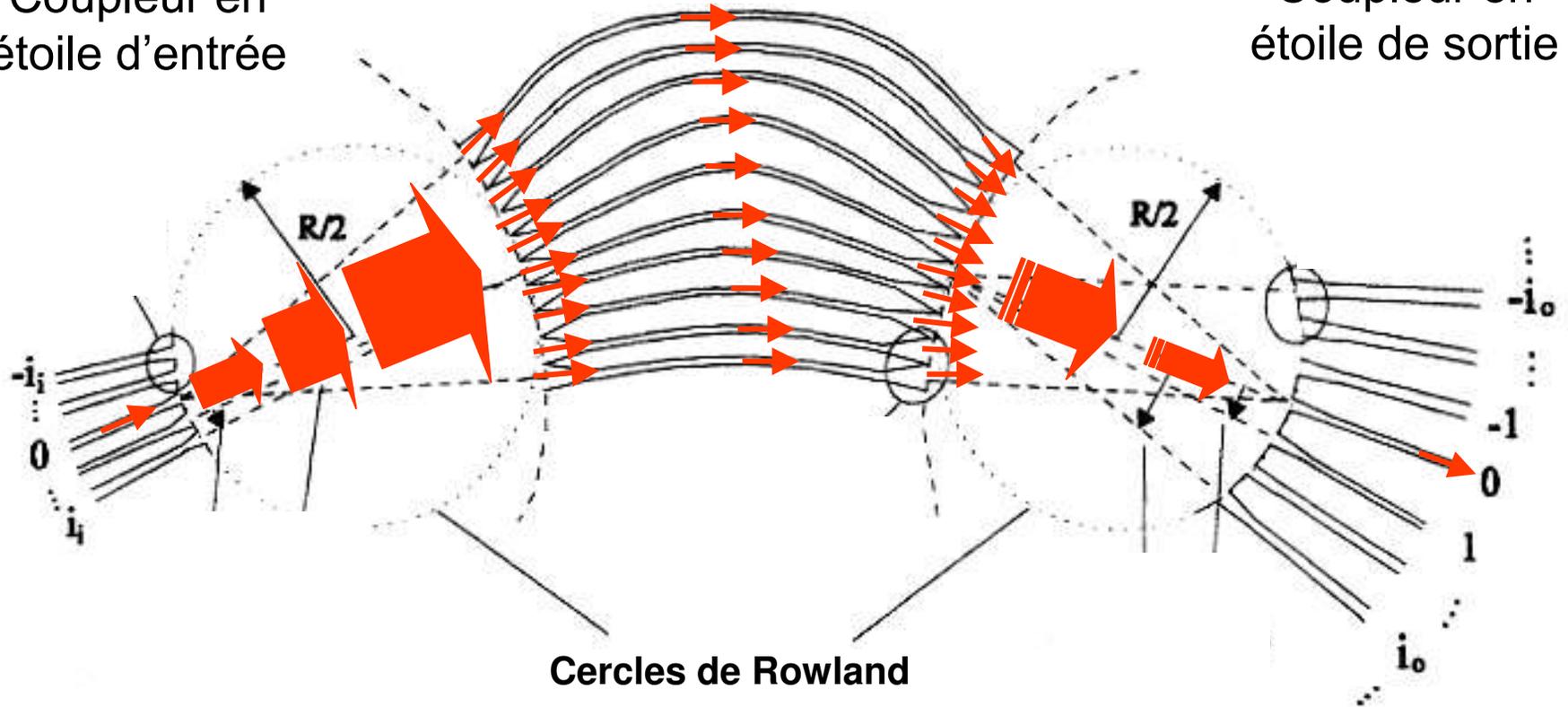
=> Modulateurs, capteurs

WDM à coupleurs en étoile

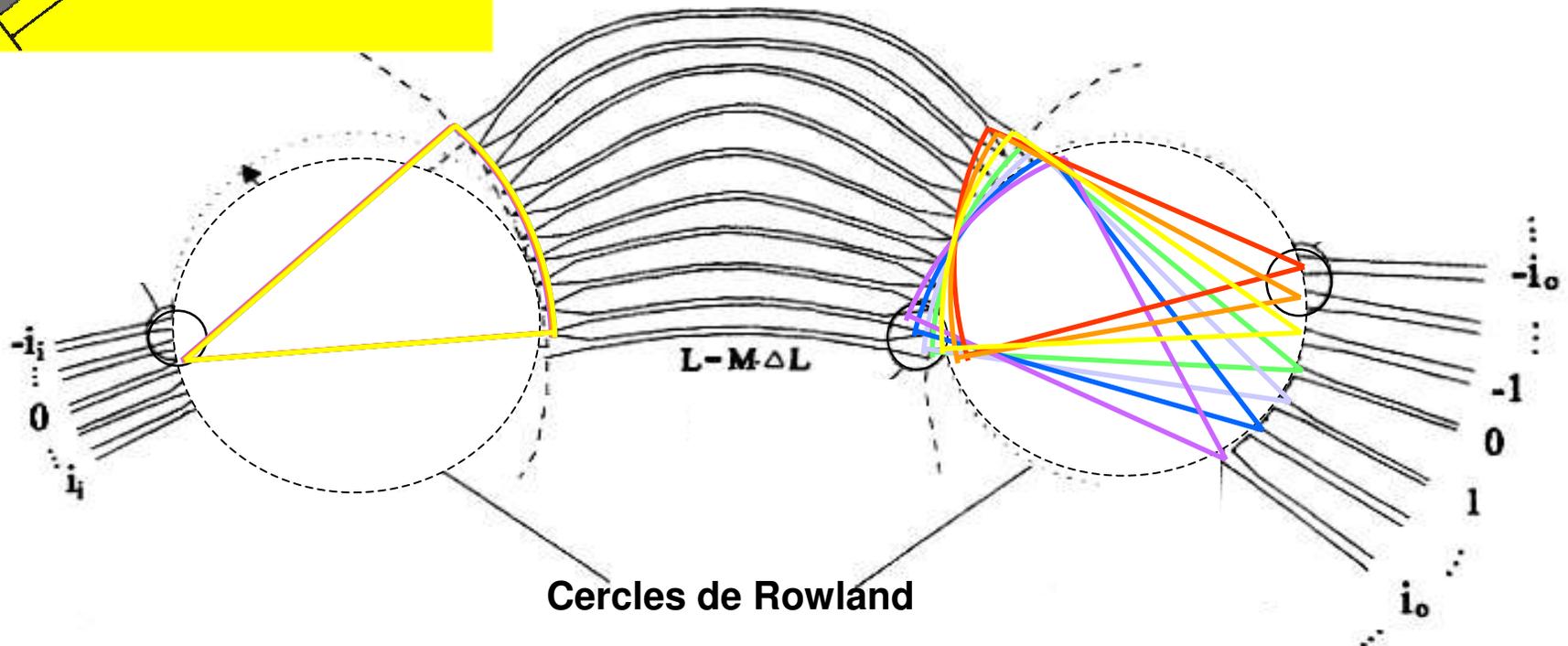
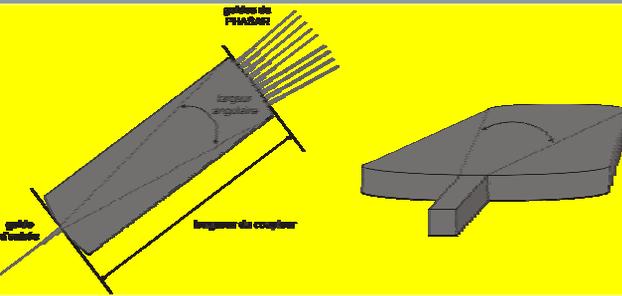
PHASAR

Coupleur en étoile d'entrée

Coupleur en étoile de sortie



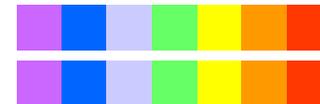
WDM à coupleurs en étoile



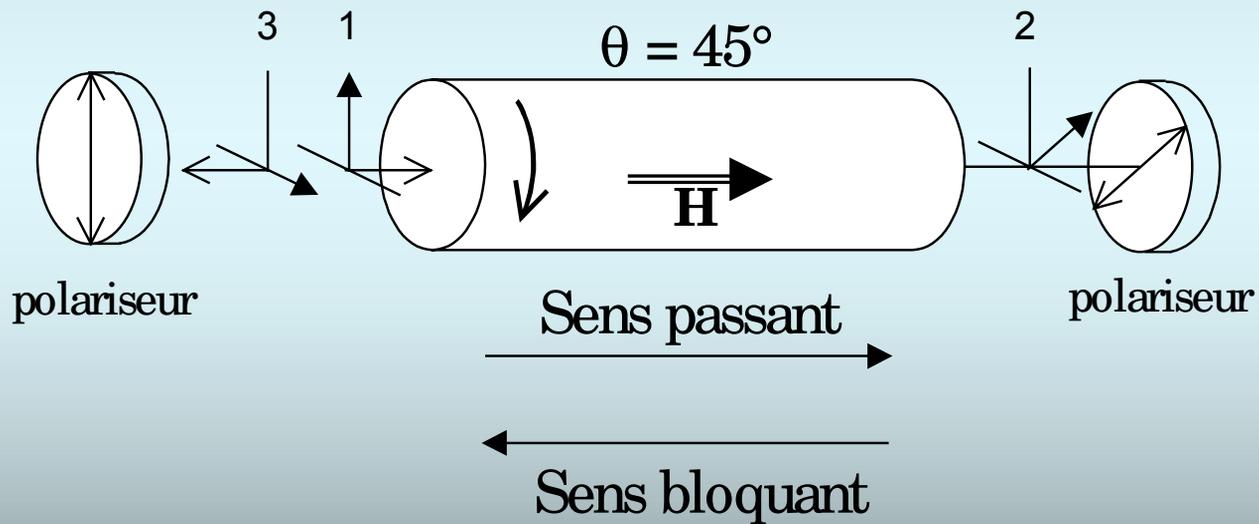
Cercles de Rowland

Ordre des couleurs par longueur d'onde :

Ordre des couleurs en sortie pour l'entrée centrale :

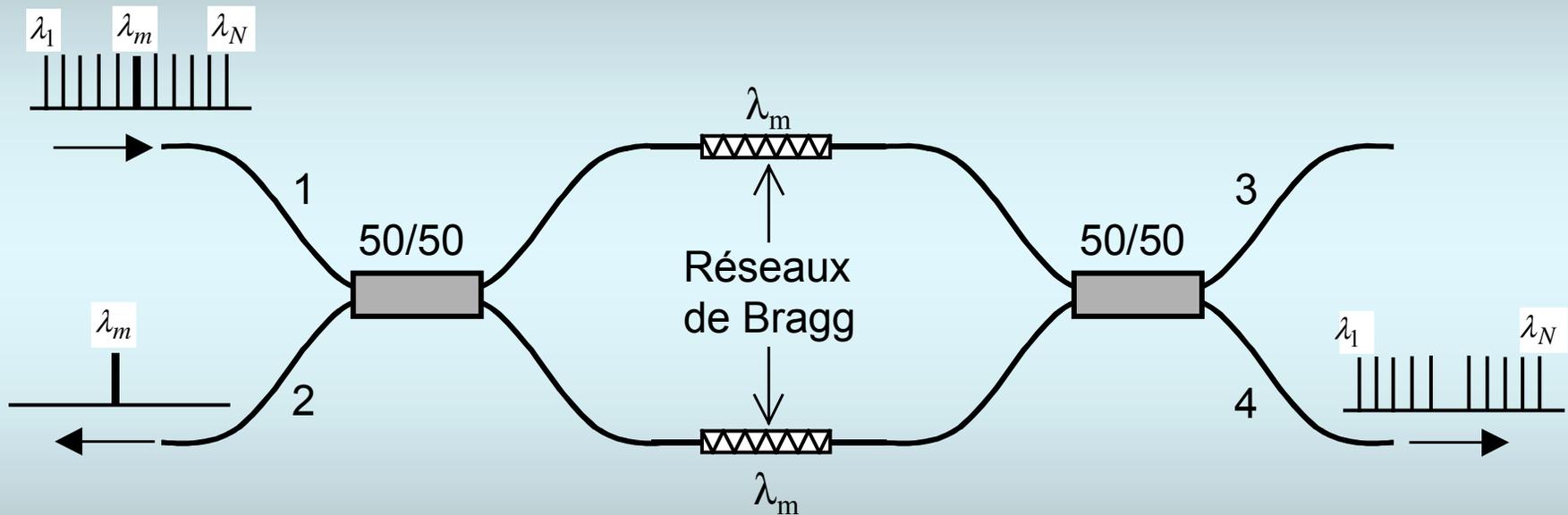


Isolateur rotateur Faraday



Pertes importantes

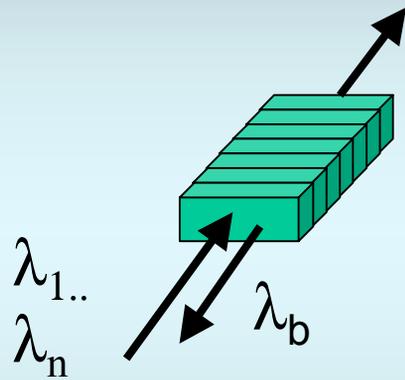
Insertion/Extraction avec coupleurs



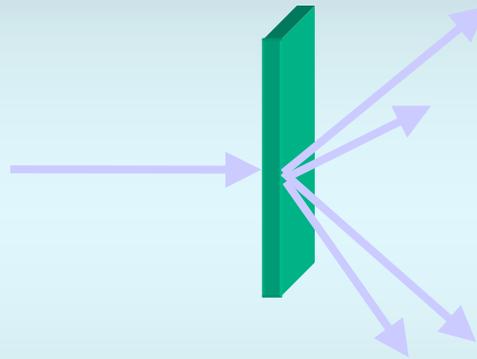
Extraction en 2, insertion en 3

Réseaux de Bragg

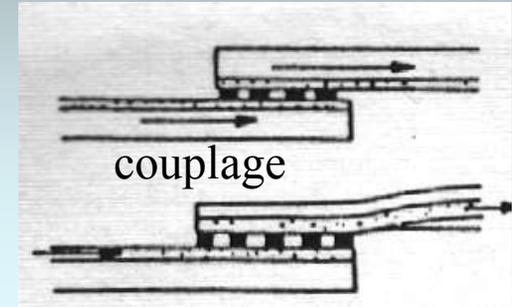
Structure périodique avec alternances de couches ($< 1\mu\text{m}$) à fort et faible indice



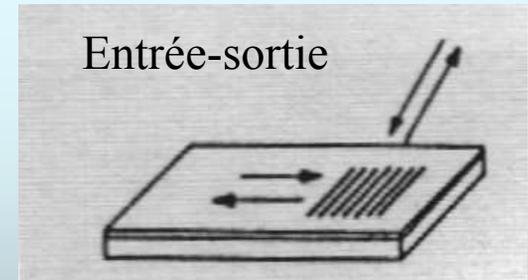
Filtre en longueur d'onde



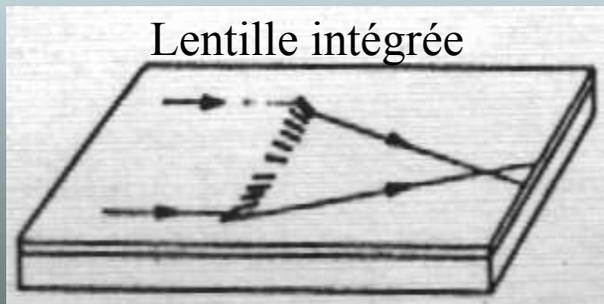
Distributeur de lumière



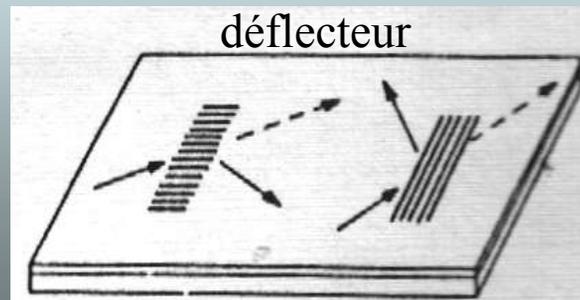
couplage



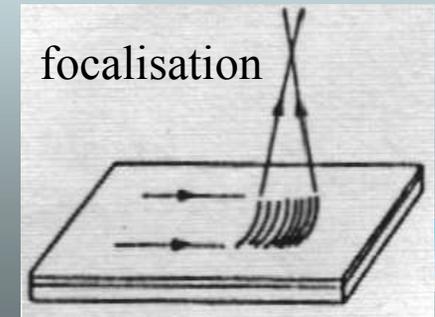
Entrée-sortie



Lentille intégrée

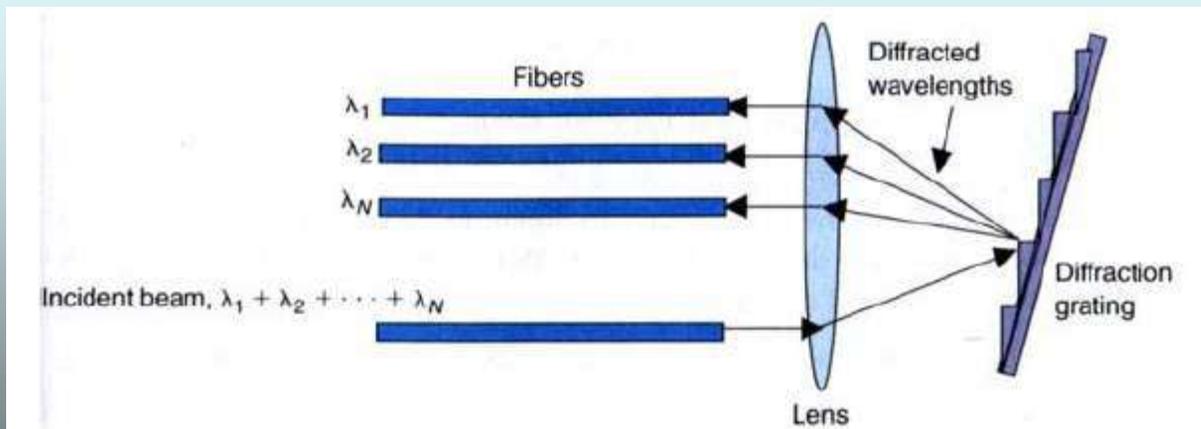
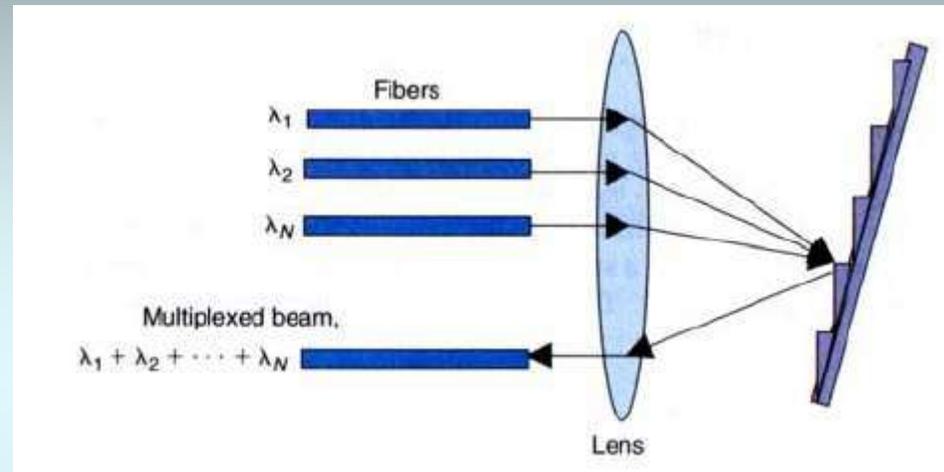


défecteur

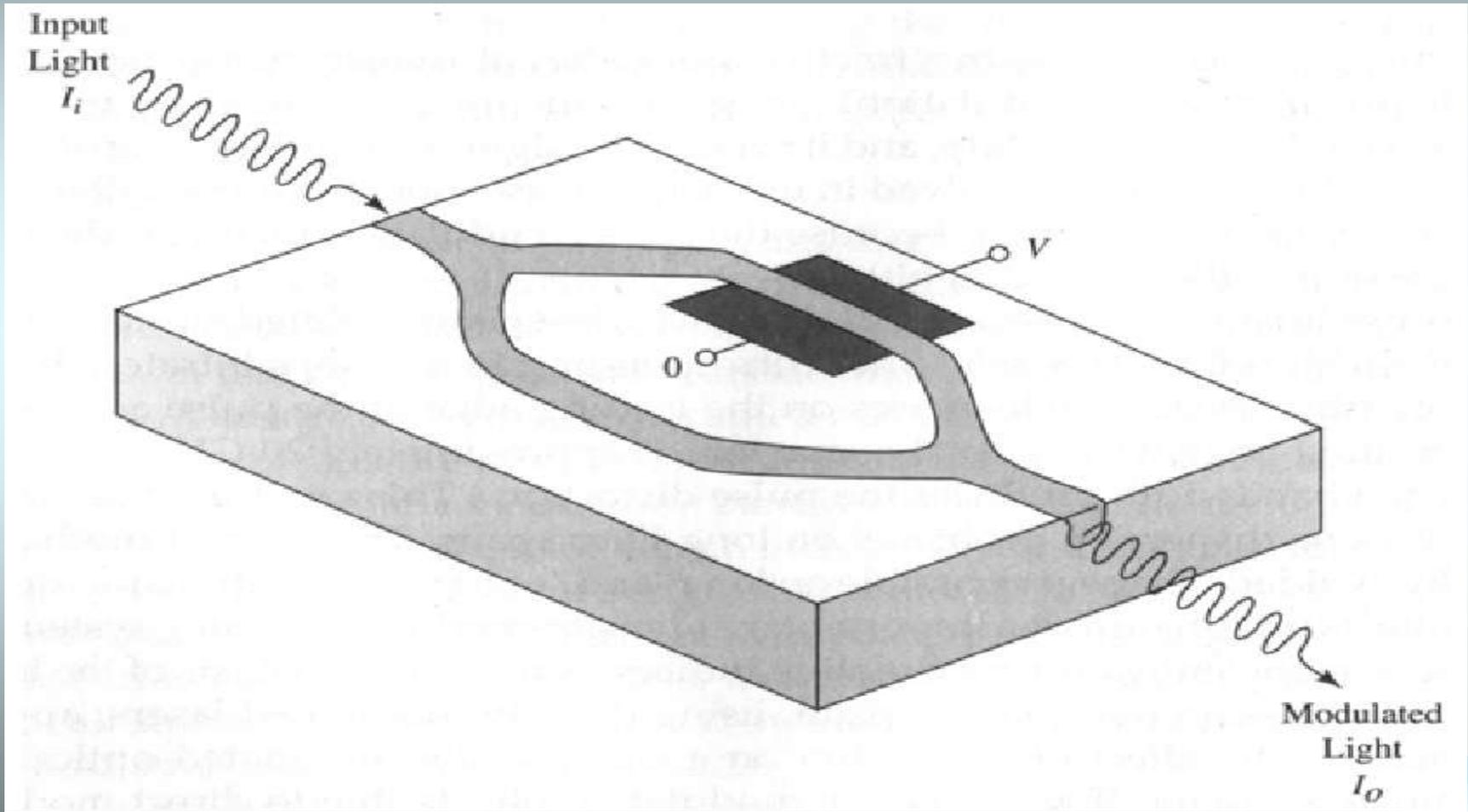


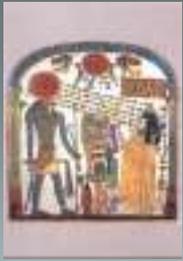
focalisation

(Dé)multiplexeur à réseaux



Modulation externe avec Mach Zehnder





Conclusion

L'optique est une vieille science qui connaît son renouveau

- en Télécoms (performances des fibres et puces optiques)
- en mesure (capteurs, détecteurs, analyse...)

La photonique est dans le sillon des nanotechnologies

L'optique propose des solutions? Reste à trouver les problèmes !

Merci de votre attention!

