

Ingénierie optique

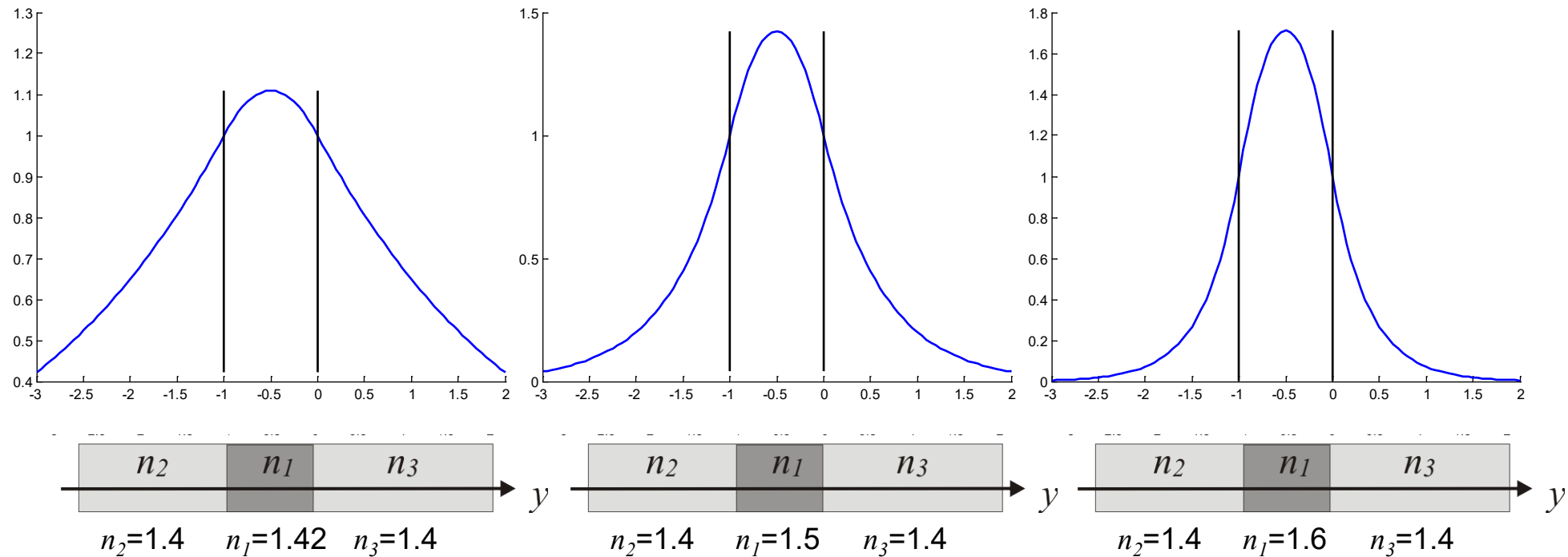
Semaine 9 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Guides diélectriques planaires (guide 1D) – Profile du champ

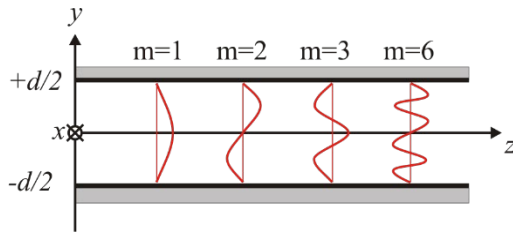
- Pour un guide symétrique, il existe toujours un mode TE



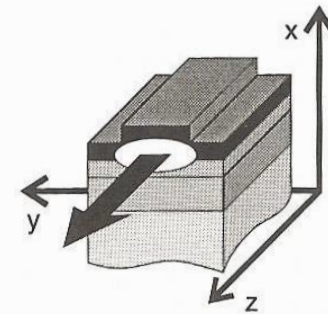
- Le nombre de modes augmente avec l'épaisseur du guide ou avec le contraste d'indice
- La lumière est guidée dans la région d'indice élevé

Guides diélectriques 2D

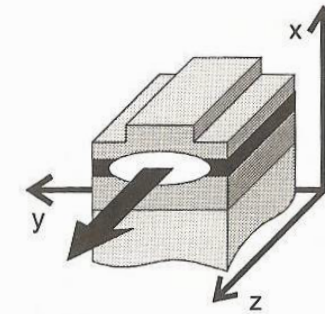
- Jusqu'à présent, nous avons considéré des guides qui ne confinent la lumière que dans une seule direction (guide 1D):



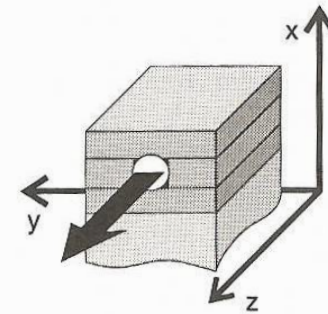
- Pour un guide 2D, le principe est toujours le même: on crée une région d'indice élevé, dans laquelle la lumière est guidée
- Des géométries variées existent qui permettent un confinement de la lumière dans les deux directions transverses et sa propagation dans la troisième direction



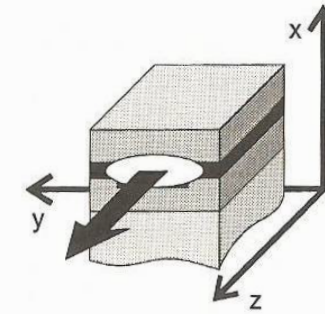
Rib waveguide



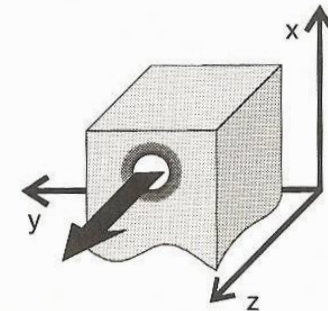
Strip-loaded waveguide



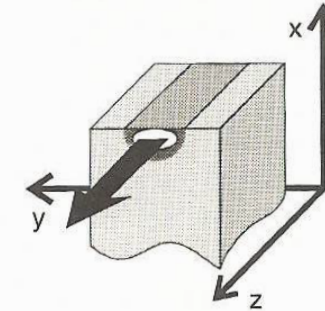
Buried-strip waveguide



Buried-rib waveguide



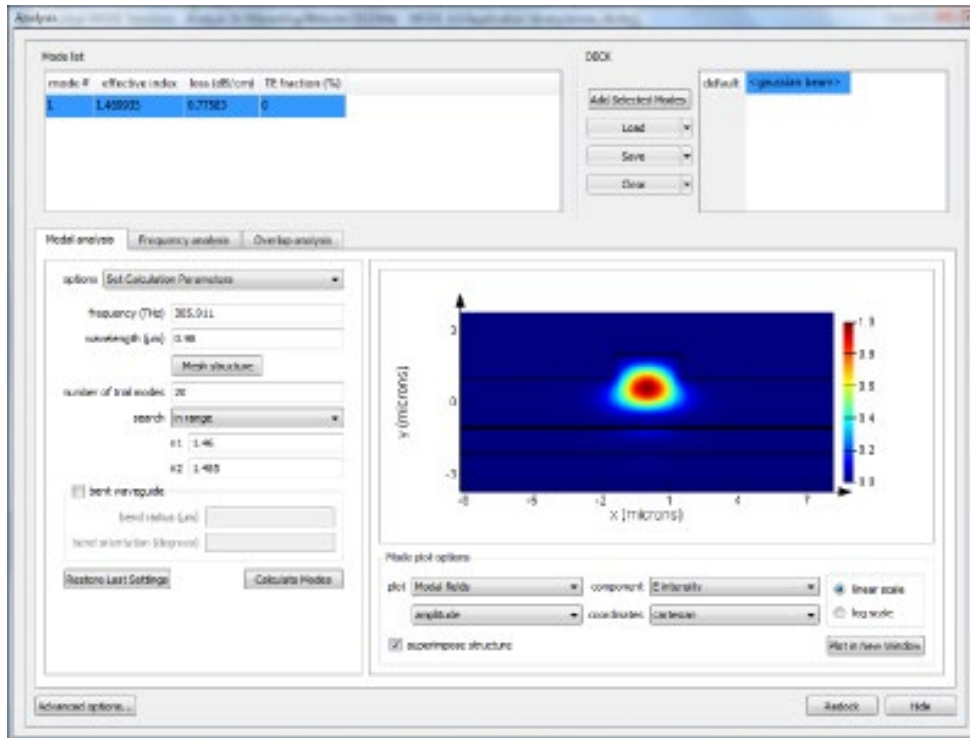
Buried diffused waveguide



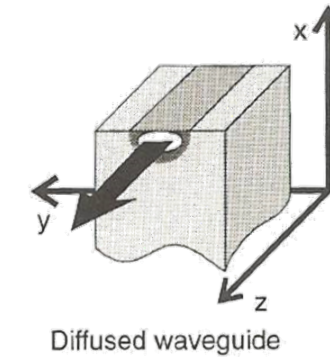
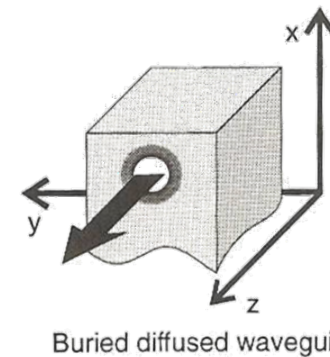
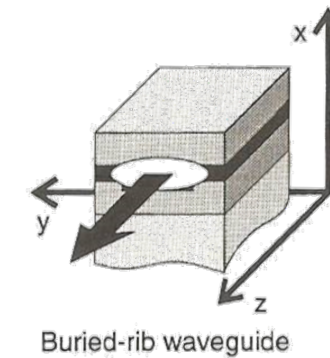
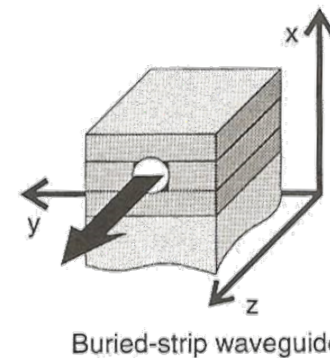
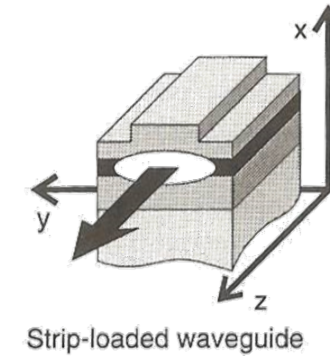
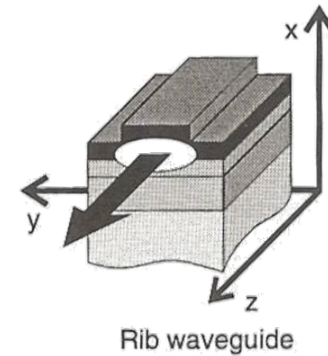
Diffused waveguide

Guides diélectriques 2D

- On ne peut plus calculer les modes (semi)-analytiquement, il faut utiliser des méthodes numériques basées sur un maillage en éléments finis ou en différences finies de la section du guide:



www.lumerical.com



R.G. Hunsperger, Integrated optics: theory and technology (3rd Ed. Springer, 1991)

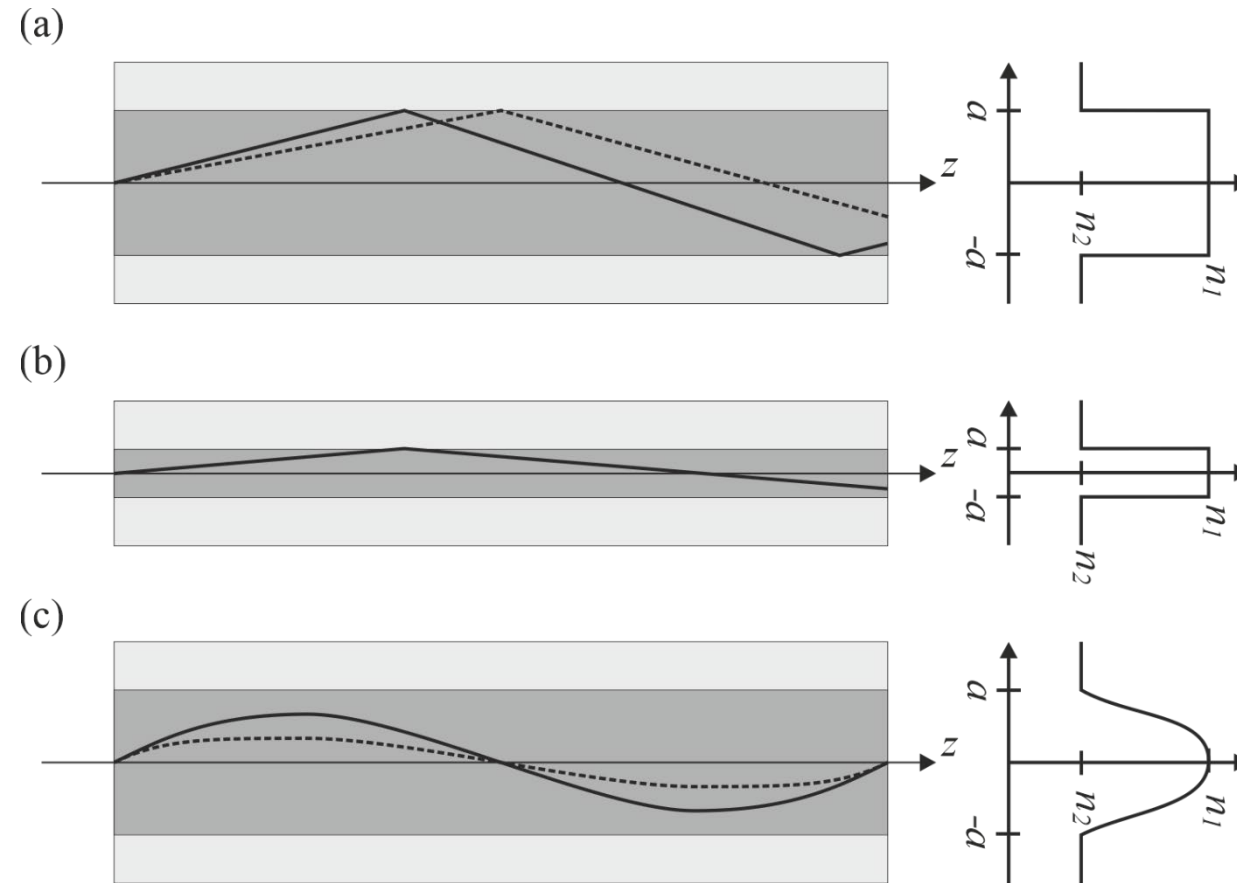
Ingénierie optique

Semaine 9 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

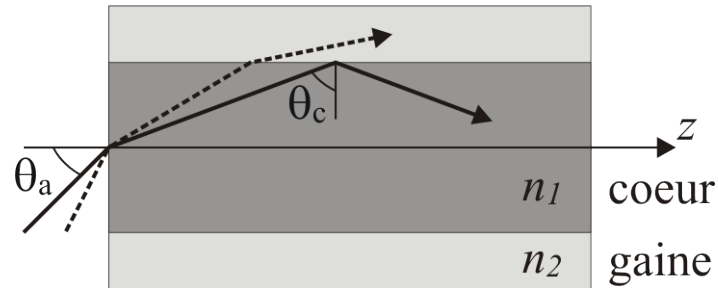


Fibres optiques



- Géométrie cylindrique
- Propagation dans la direction z
- Différents profils d'indice existent pour le coeur de la fibre
- La gaine offre essentiellement une protection mécanique

Fibres à saut d'indice



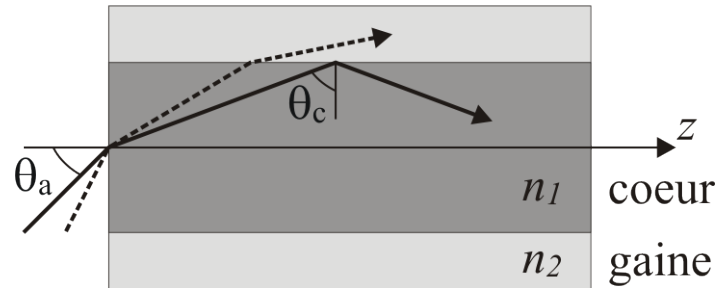
- Comme pour le guide diélectrique, propagation par réflexion totale interne
- Les ondes incidentes avec $\theta > \theta_a$ ne sont pas guides dans la fibre
- Angle d'acceptance:

$$\sin \theta_a = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

- L'angle d'acceptance dépend du contraste diélectrique
- Ouverture numérique:

$$\text{NA} = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Fibres à saut d'indice



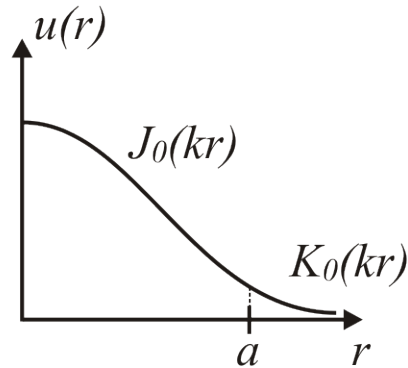
- Différence relative d'indice $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1$
- L'ouverture numérique devient $NA \simeq n_1 \sqrt{2\Delta}$
- Fréquence normalisée de la fibre (*fibre parameter*):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} NA = k_0 a NA \quad a: \text{rayon du coeur}$$

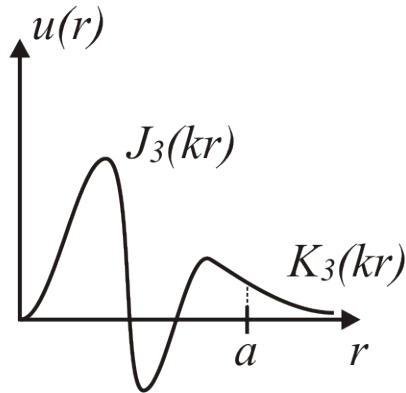
- Permet de caractériser le nombre de modes de la fibre

Fibres optiques – Profile du champ des modes

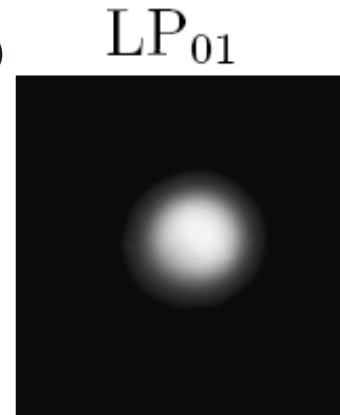
(a)



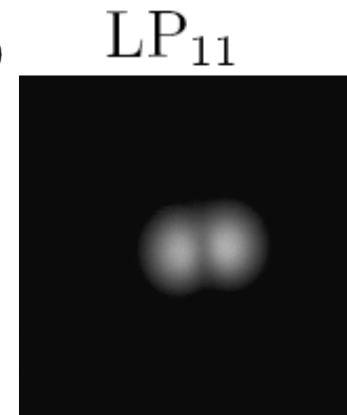
(b)



(c)



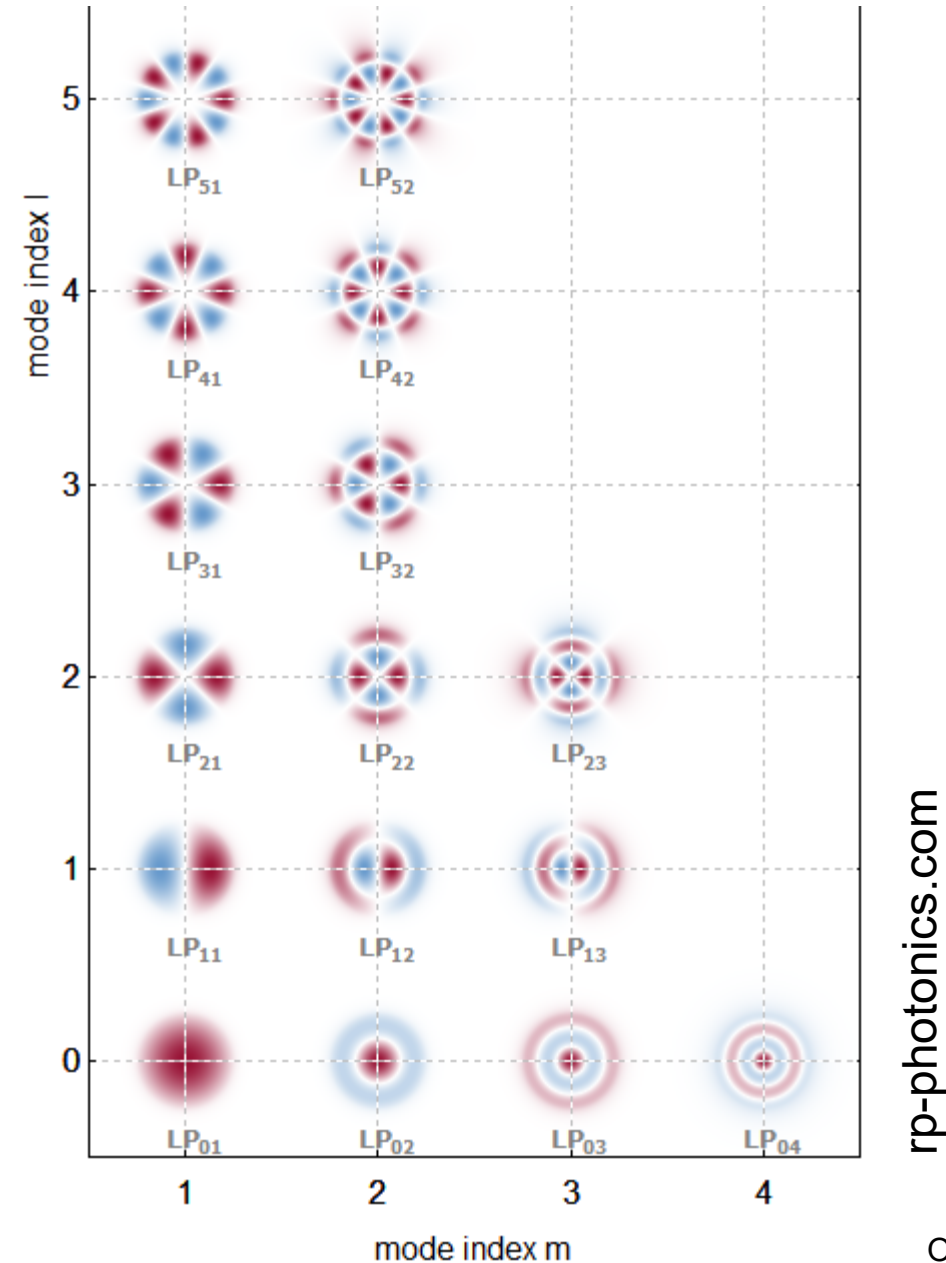
(d)



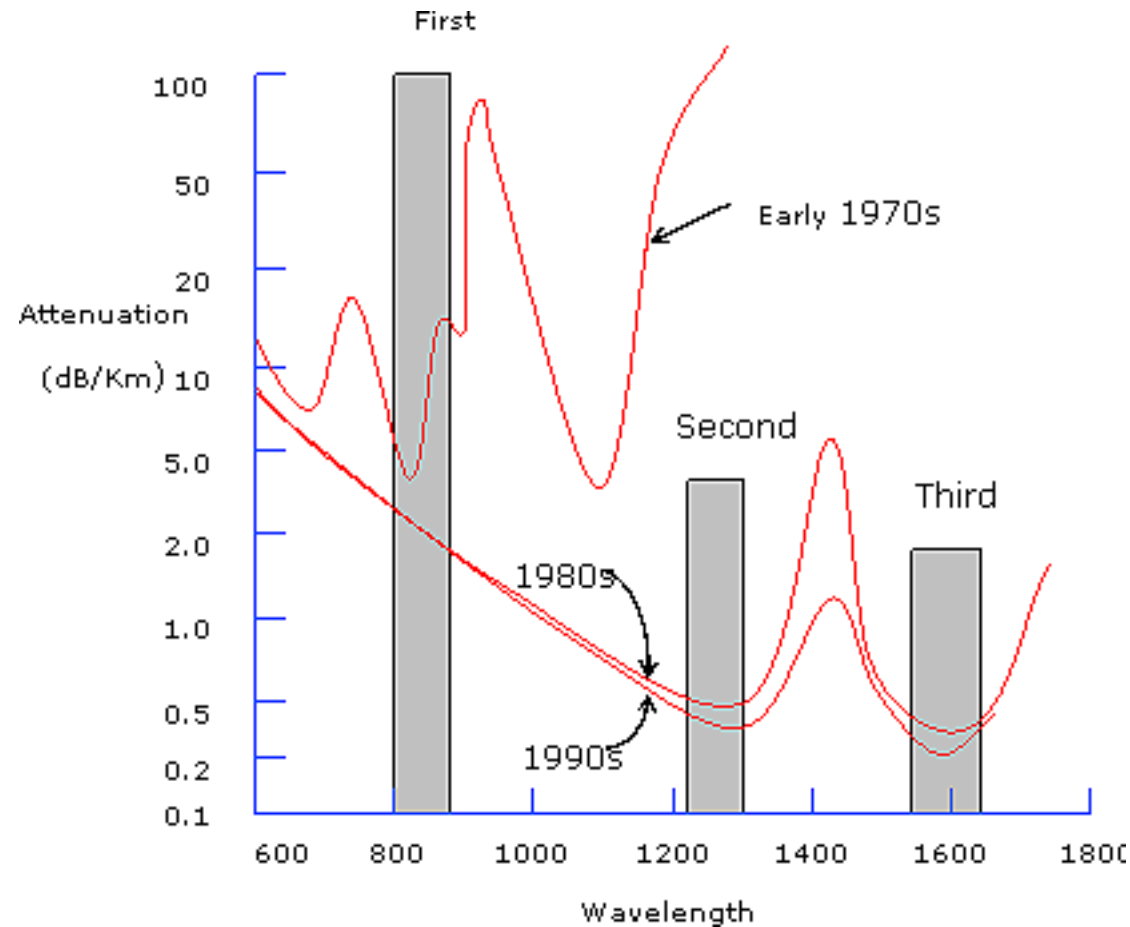
- On fait un calcul en coordonnées cylindriques
- Il n'existe pas de modes purement TE ou TM pour une fibre (→ petite composante longitudinale)
- Il existe des modes avec une dominante de polarisation linéaire (en anglais *linearly polarized*): LP_{lm}
- Paramètre l : ordre de la fonction azimutale
- Paramètre m : ordre de la fonction radiale
- Différentes espèces de fonctions de Bessel sont nécessaires pour la fonction radiale

Fibres optiques – Profile du champ des modes

- Modes LP_{lm}
 - Paramètre l : ordre de la fonction azimutale
 - Paramètre m : ordre de la fonction radiale



Atténuation dans les fibres optiques

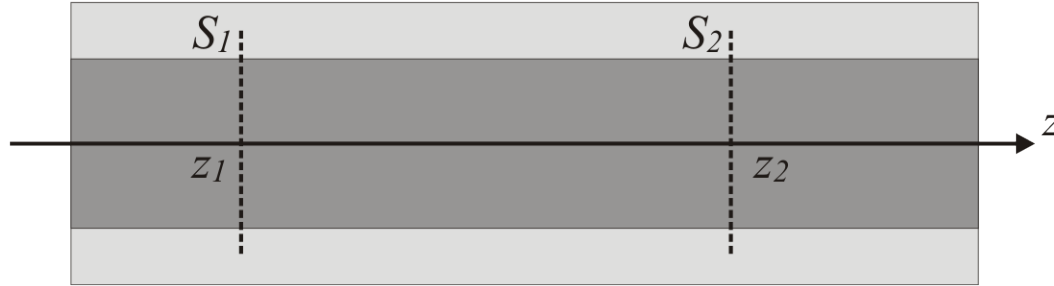


- Trois fenêtres de propagation:

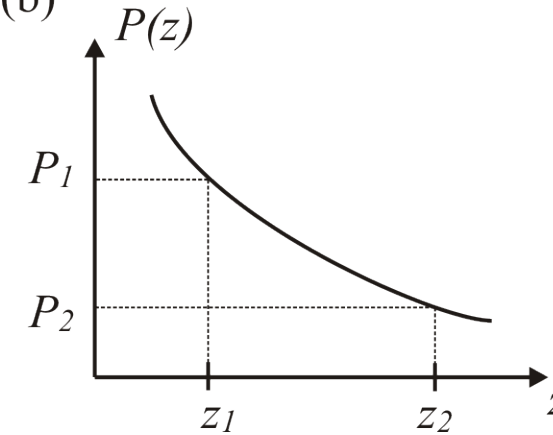
$$\lambda_0 \simeq 850 \text{ nm}, 1.3 \mu\text{m} \text{ et } 1.55 \mu\text{m}.$$

Atténuation dans les fibres optiques

(a)



(b)



- Décroissance exponentielle de la puissance optique avec la distance de propagation:

$$P_2 = P_1 e^{-\alpha(z_2 - z_1)}$$

- Coefficient d'atténuation:
$$\alpha = \frac{\ln(P_1/P_2)}{z_2 - z_1}$$

- En dB:

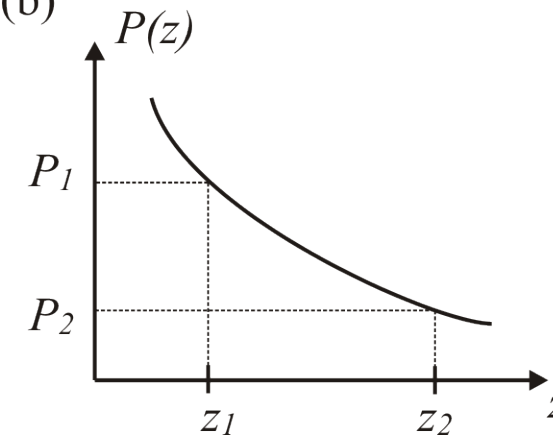
$$\alpha_{\text{dB}} = \frac{10 \log(P_1/P_2)}{z_2 - z_1}; \quad P_2 = P_1 10^{-\alpha_{\text{dB}}(z_2 - z_1)/10}$$

Atténuation dans les fibres optiques

(a)



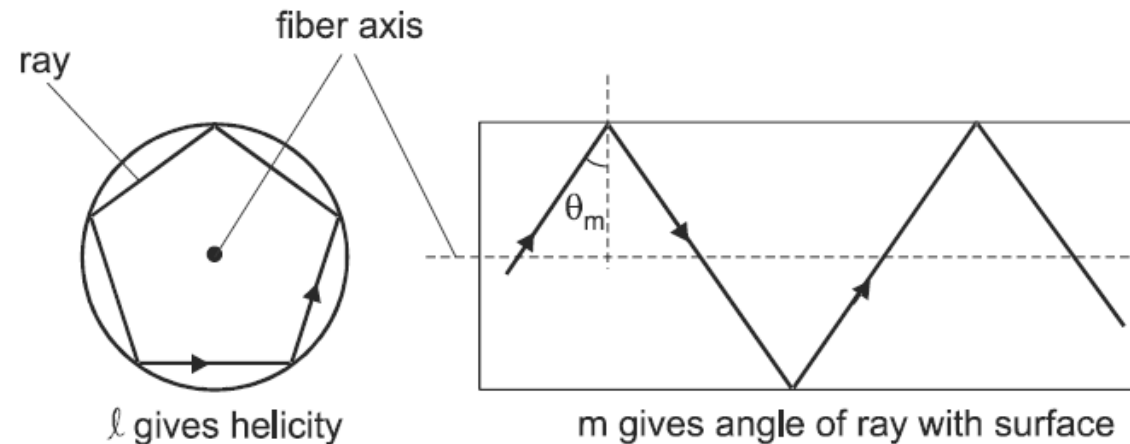
(b)



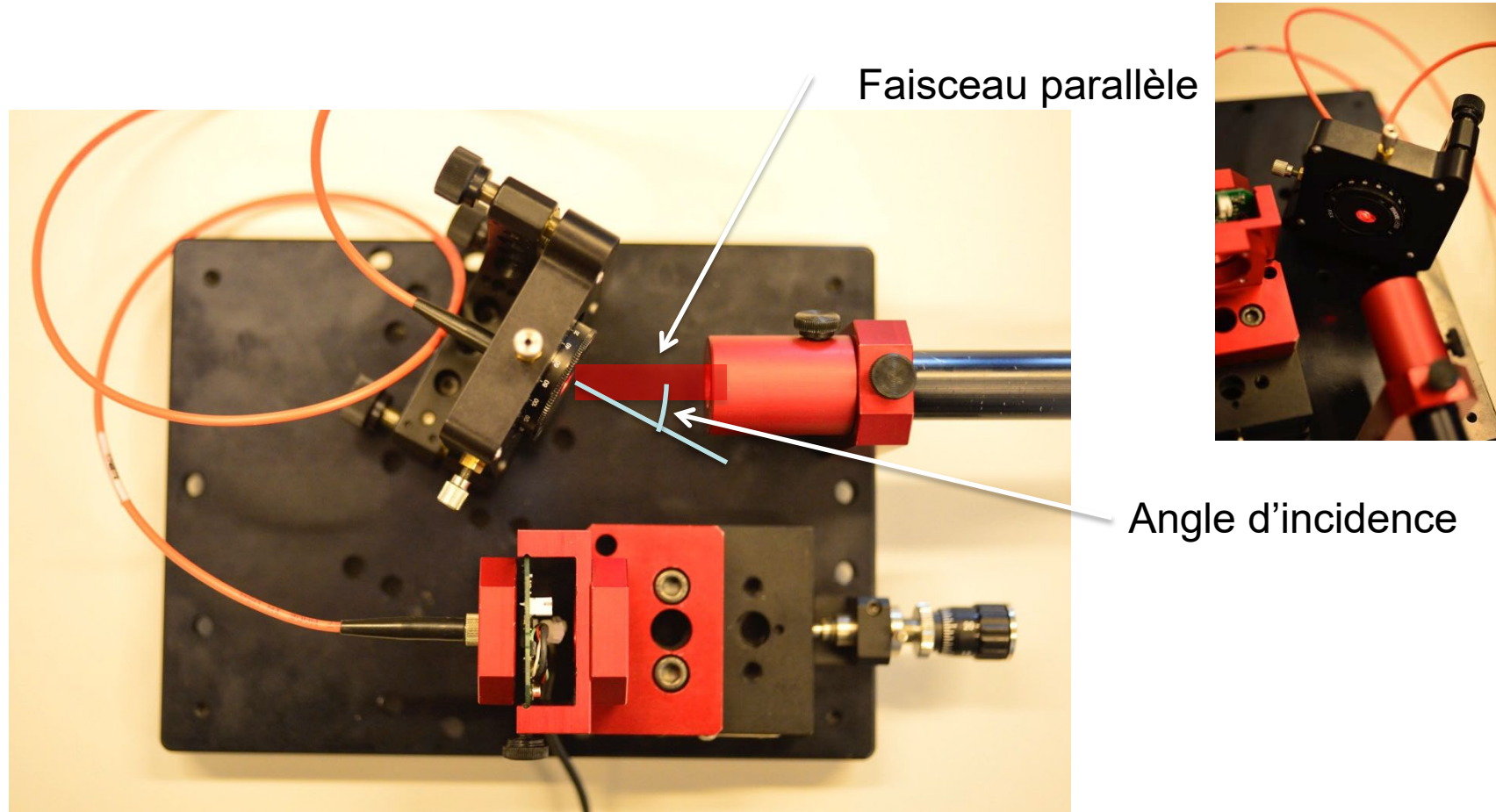
- Origine de l'atténuation:
 - diffusion Rayleigh $\alpha = \frac{A_0}{\lambda_0^4}$
 - Absorption par l'eau (liaisons O-H^- et liaisons entre OH^- et SiO_2)
 - Absorption par les métaux (quelques ppm suffisent!)
- Valeurs typiques de l'atténuation: 0.2-0.4 dB/km

Propagation des rayons dans une fibre multimode

- Si un faisceau collimaté est envoyé de biais dans une fibre multimode, ce faisceau se propage en faisant une «hélice» dans la périphérie de la fibre
- A la sortie de la fibre, on voit un cône de lumière dont le rayon est déterminé par l'angle d'incidence du faisceau
- En variant cet angle d'incidence, on peut mesurer l'ouverture numérique NA de la fibre

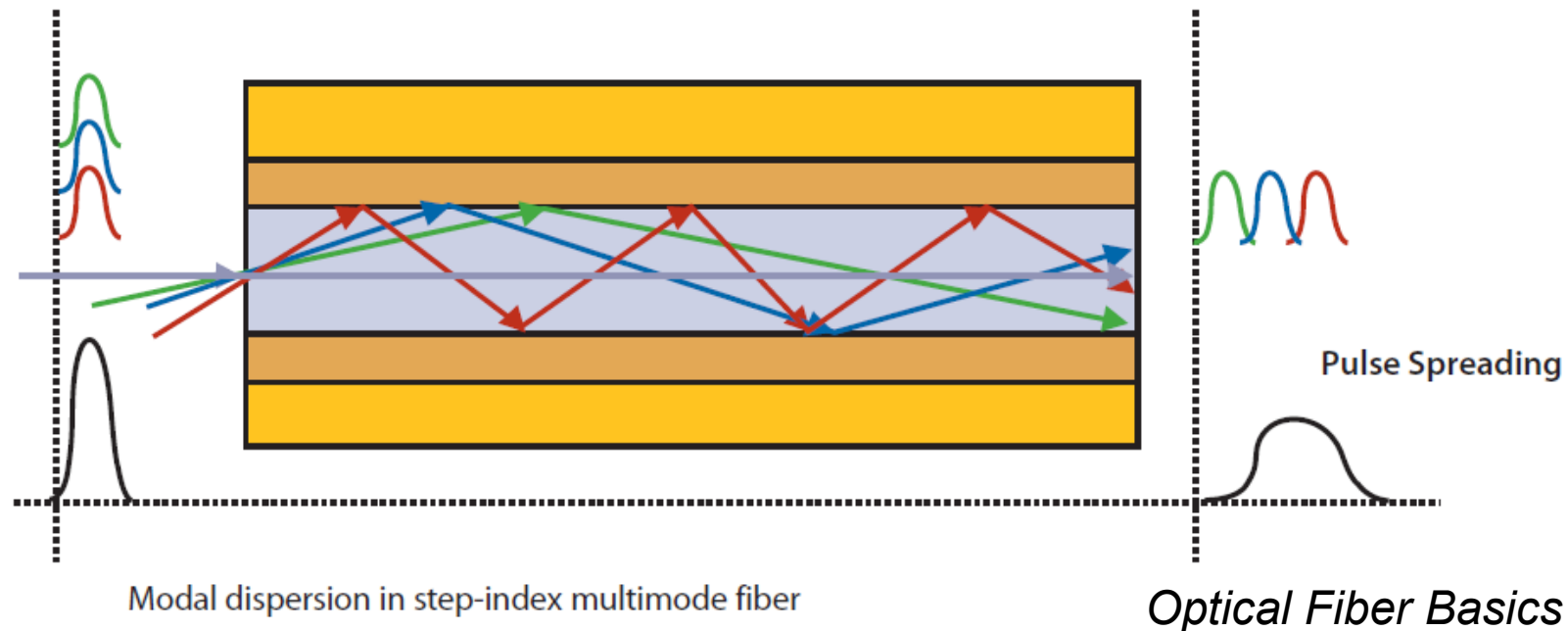


Propagation des rayons dans une fibre multimode

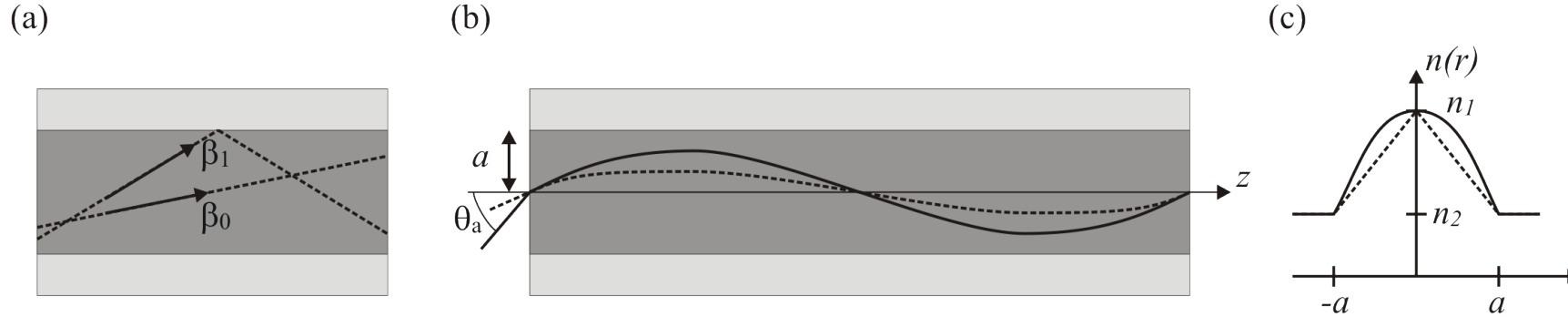


Dispersion

- Le mode fondamental se propage le plus vite dans le guide (zig-zague moins)
- Les modes plus élevés font beaucoup de zig-zags



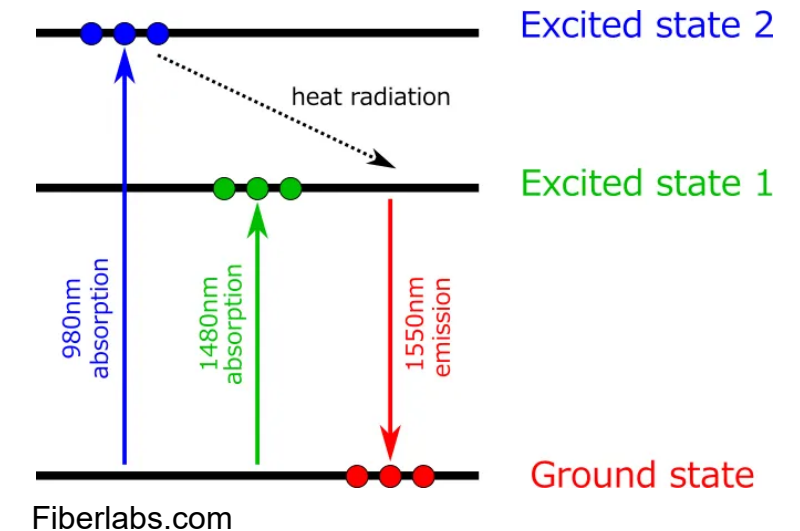
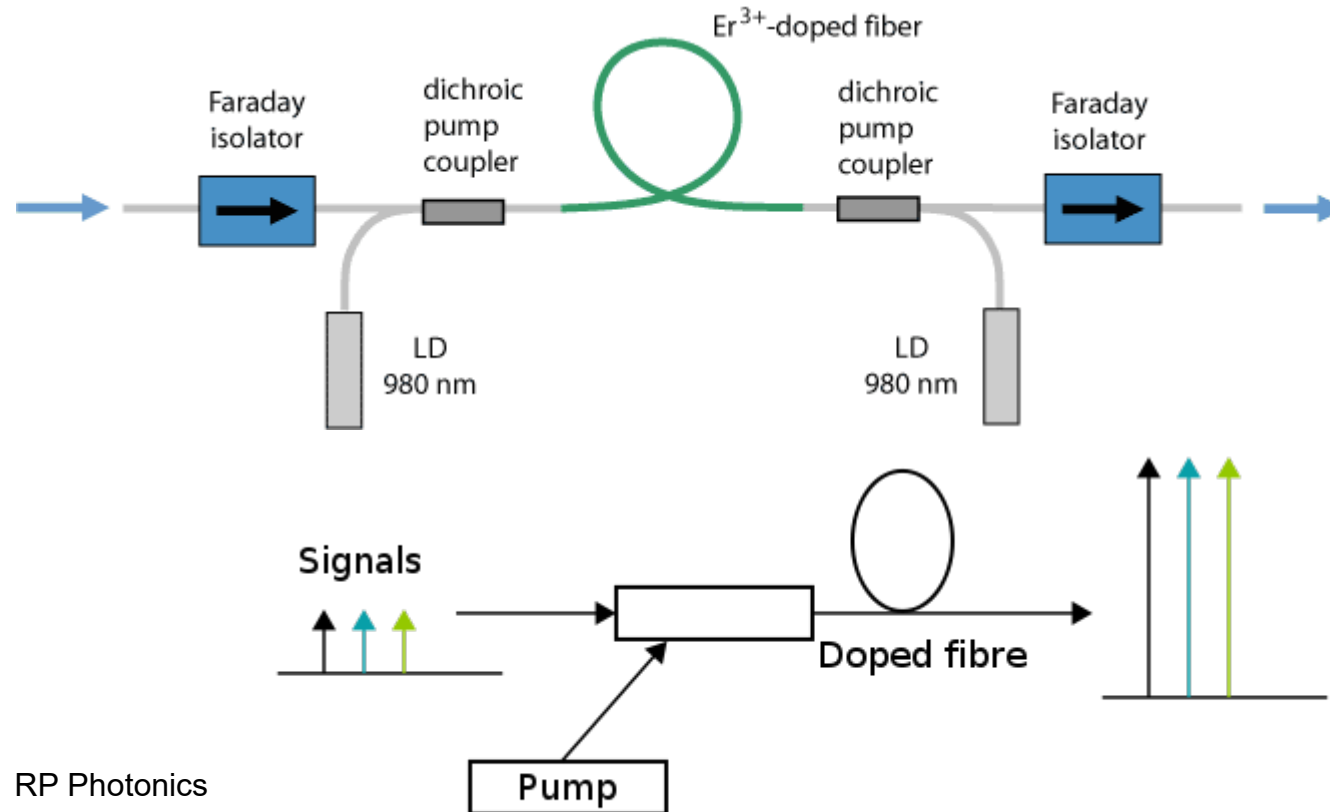
Fibre à profile d'indice



- Dans une fibre à saut d'indice les modes d'ordre élevé prennent plus de temps à se propager car leur chemin est plus long
- Une fibre à profile d'indice permet de compenser cette différence de temps avec une vitesse plus rapide des modes d'ordre élevé (en fait, une vitesse plus lente pour les modes d'ordre bas $c_1 = c_0/n_1$).
- Le rayon ne se propage plus en zig-zag mais en courbe: les modes élevés se propagent vers la périphérie de la fibre, le mode fondamental vers le centre de la fibre
- Différent profiles d'indice existent: triangulaire, parabolique, ...

Compenser absorption et dispersion

- Comme on ne peut pas éliminer l'absorption et la dispersion, il faut les compenser
- On utilise un amplificateur avec des fibres optiques dopées à Er^{3+} et pompées avec un laser ($\lambda=980\text{ nm}$) qui a plus d'énergie que le signal optique ($\lambda=1'550\text{ nm}$)
- On place un tel amplificateur tous les $\sim 80\text{ km}$ sur un réseau optique



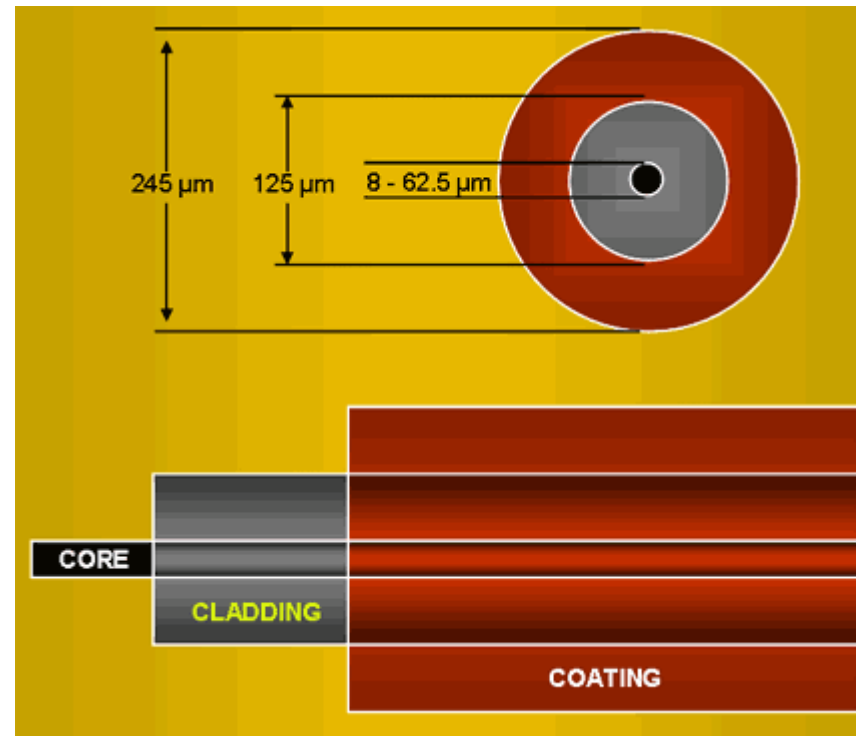
Ingénierie optique

Semaine 9 – partie 3

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Fibres optiques – Fabrication



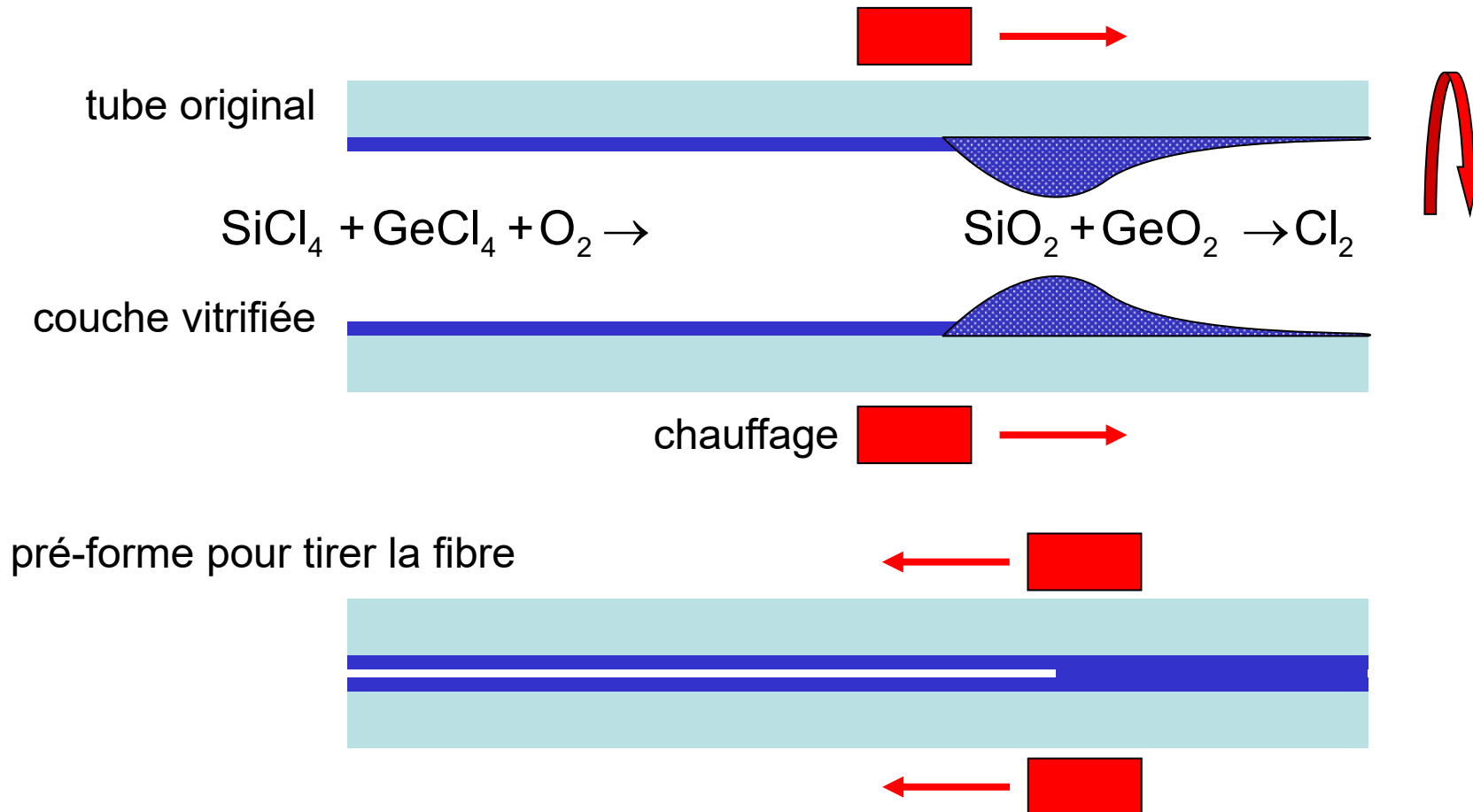
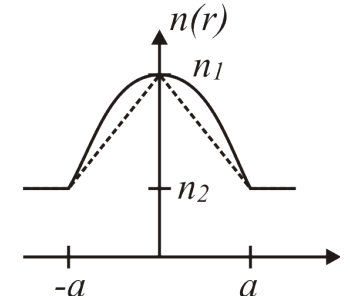
Fibres optiques – Fabrication

Matériau: silica SiO_2

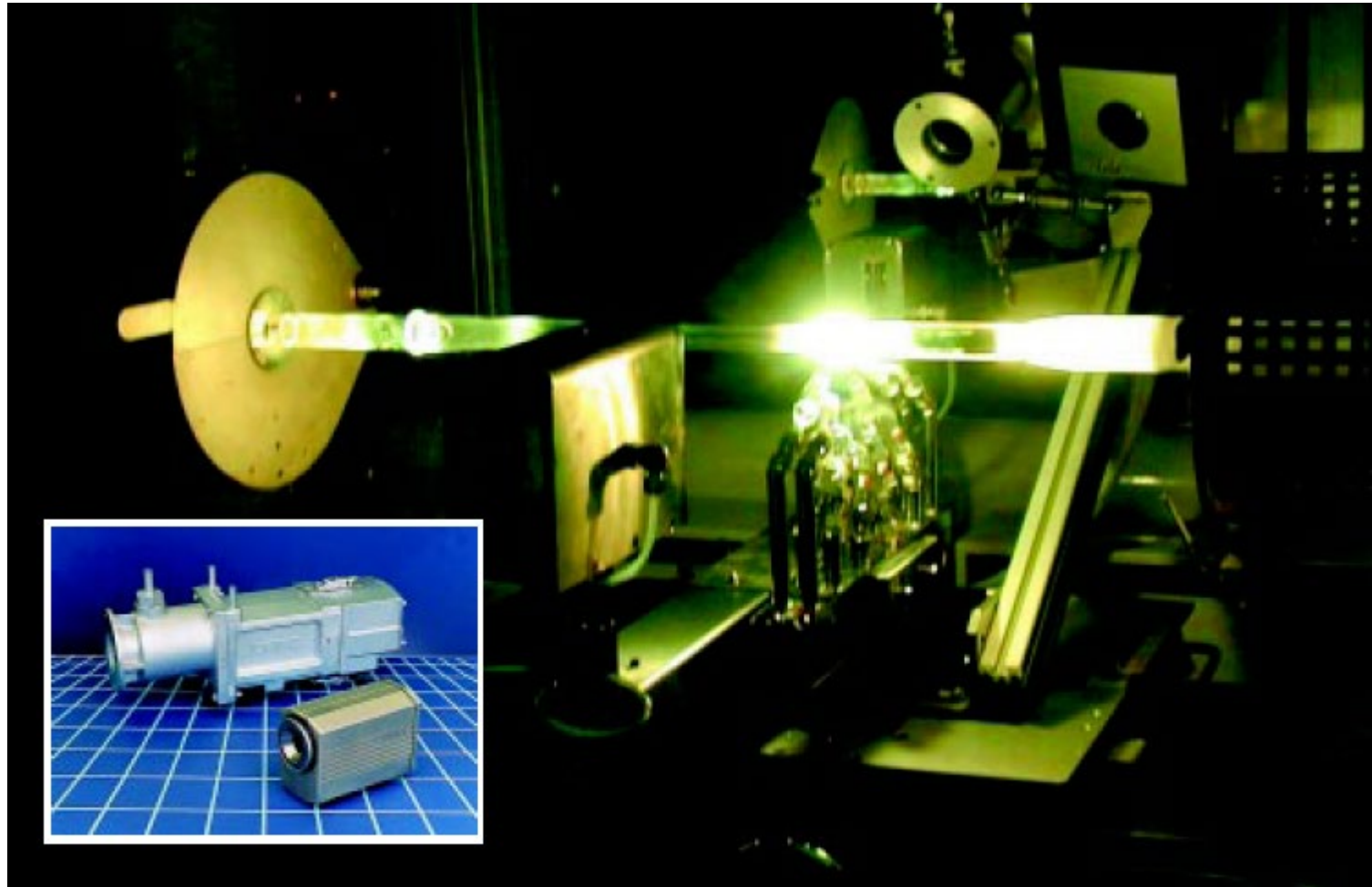
Synthèse: $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2$

- pour augmenter l'indice, dopage GeCl_4

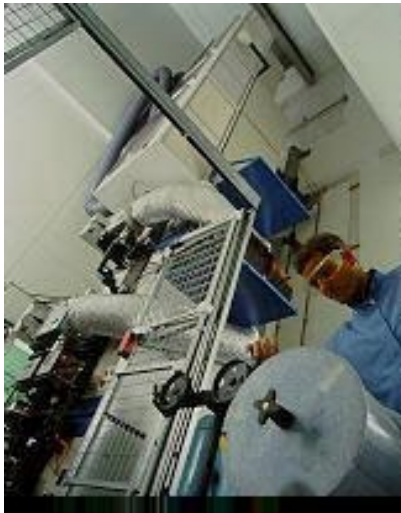
- pour diminuer l'indice, dopage SiF_4



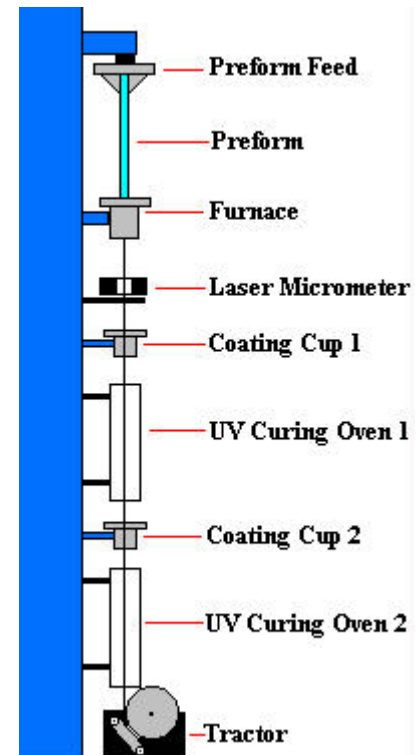
Fibres optiques – Fabrication



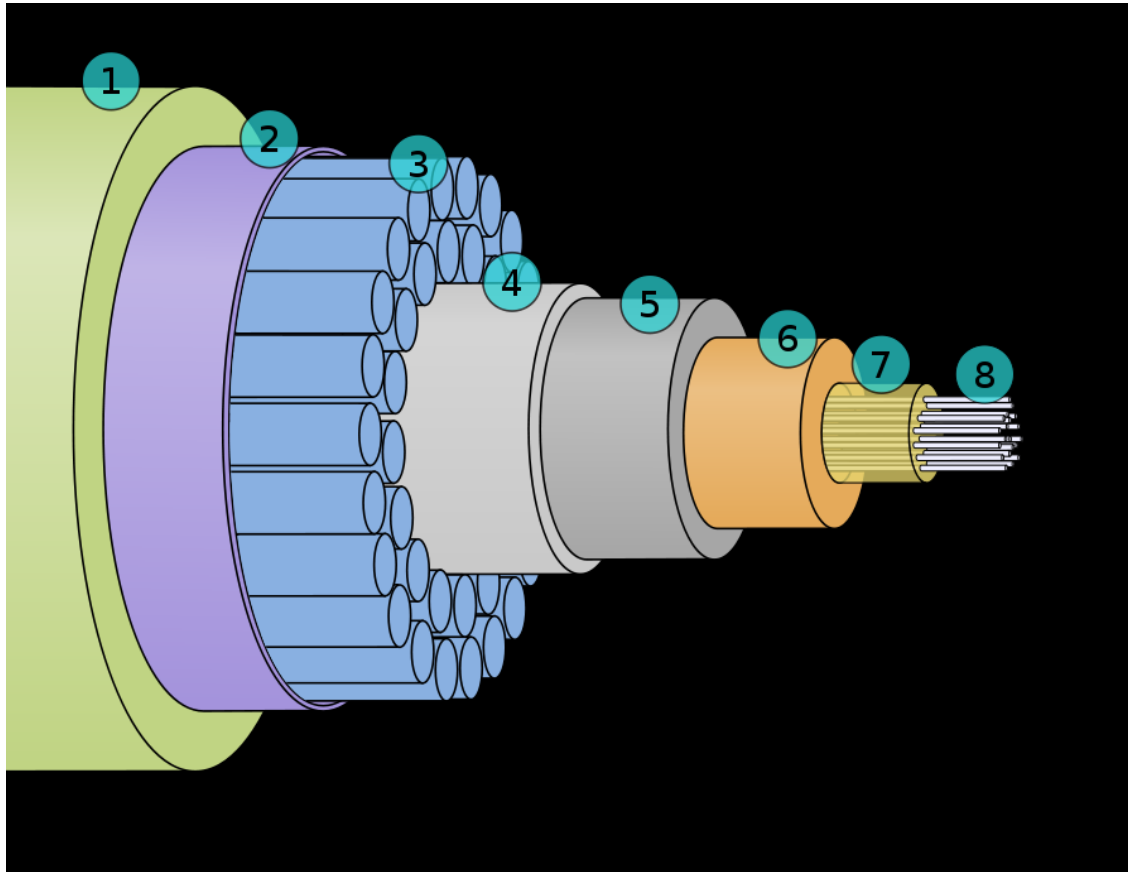
Fibres optiques – Fabrication



Drawing tower:



Câbles optiques



- 1 – Polyethylene
- 2 – Mylar tape
- 3 – Stranded steel wires
- 4 – Aluminium water barrier
- 5 – Polycarbonate
- 6 – Copper or aluminium tube
- 7 – Petroleum jelly
- 8 – Optical fibers

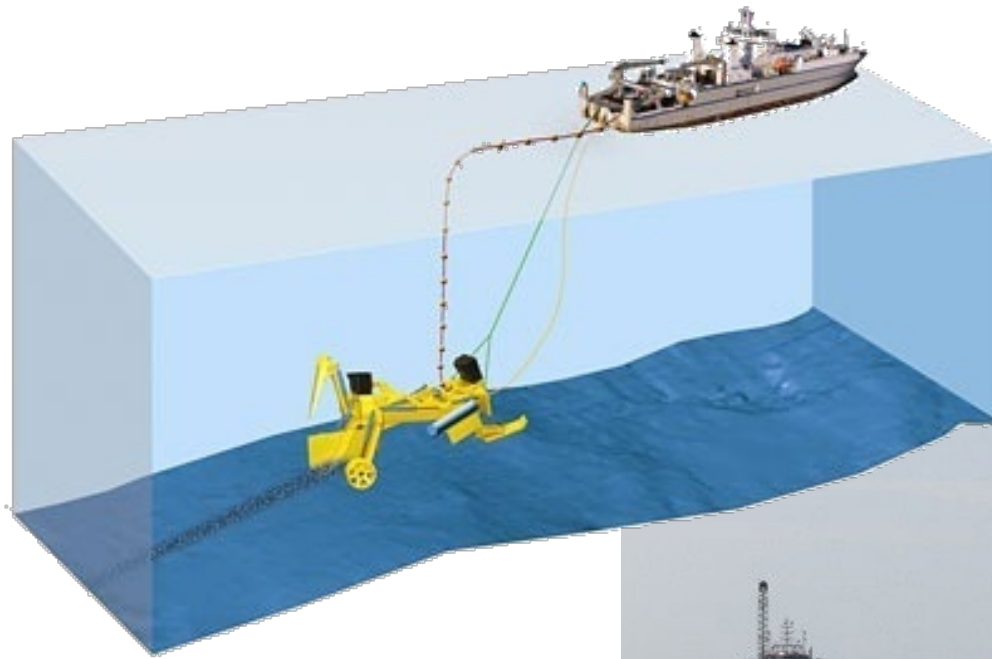


Navire câblier

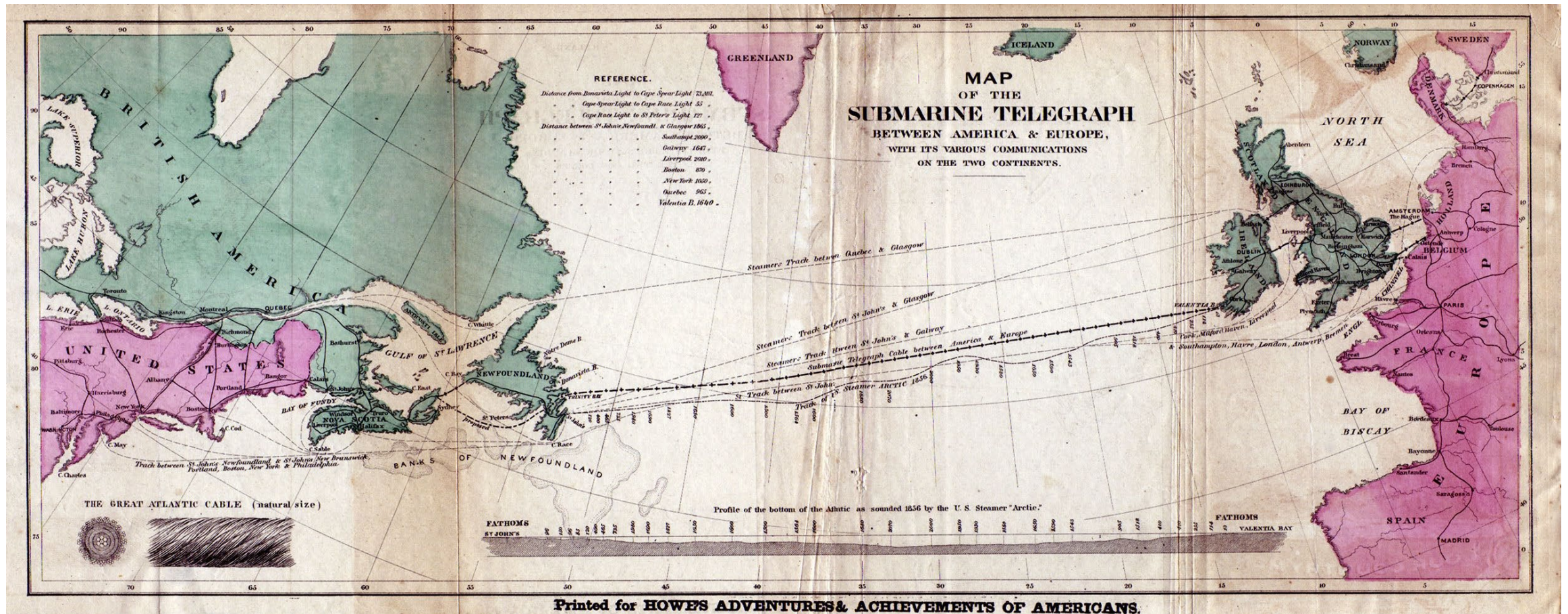


Pose d'un câble sur le fond marin

- Le câble est enterré avec une “charrue”



Câbles optiques



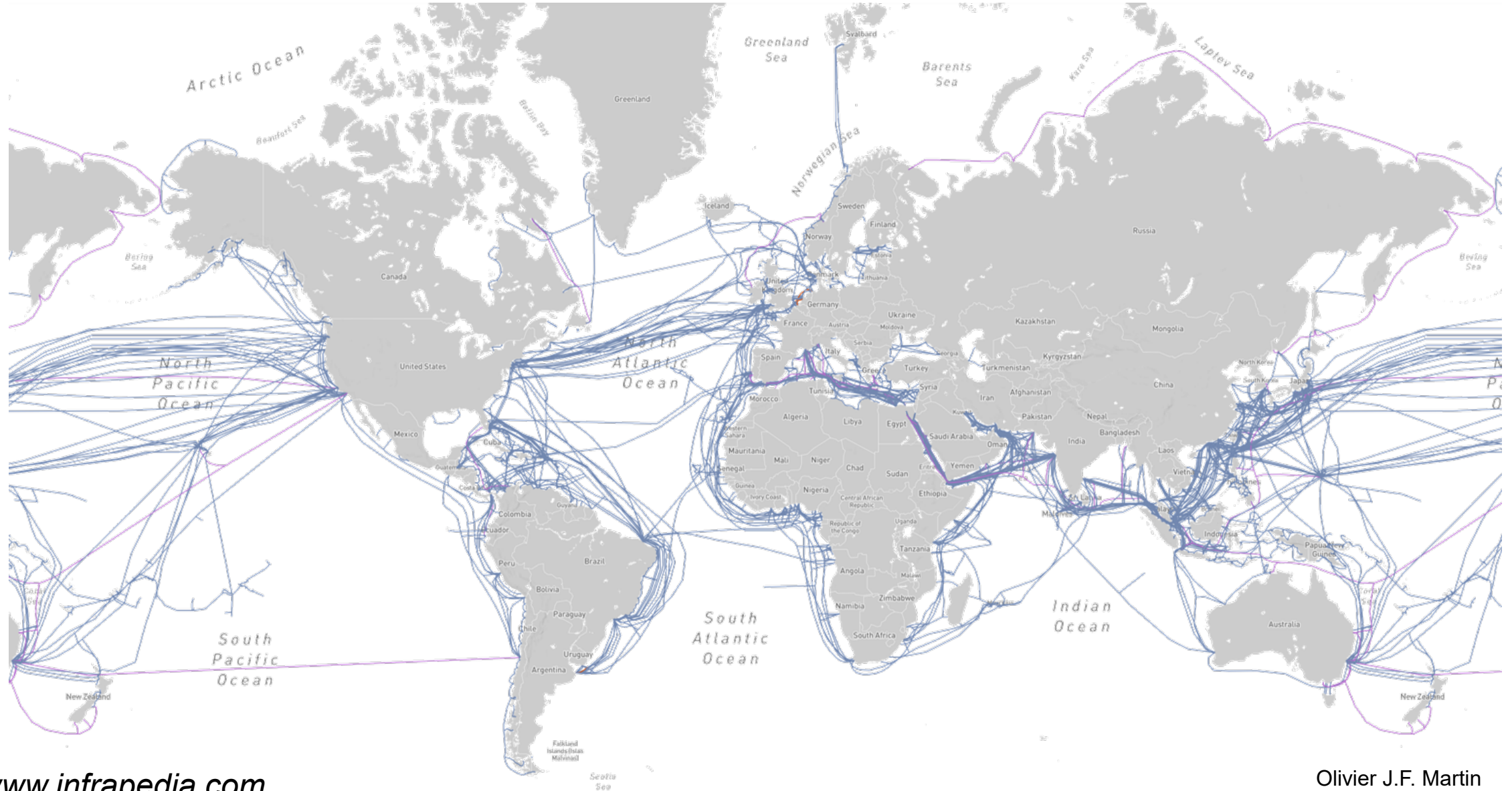
1858

wikipedia

Olivier J.F. Martin

Câbles optiques

- Seul 1% des télécommunications intercontinentales sont fournies par les satellites, le reste par des câbles sous-marins



Câbles optiques

- Septembre 2017 Microsoft & Facebook ont terminé de poser le câble Marea: 6'600 km, 160 Tbit/sec (Virginia beach/Bilbao)



- Septembre 2022 Google a inauguré le câble Grace Hopper: 6'000 km, 352 Tbit/s (New-York/UK & Spain)
- Octobre 2023, Facebook, Microsoft, Vodaphone, câble Amitié: 6'600 km, 320 Tbit/s (Lynn USA/Bude UK/Le Porge France)

Couplage dans une fibre

- En plus de l'angle d'incidence, l'alignement est très important



Leybold

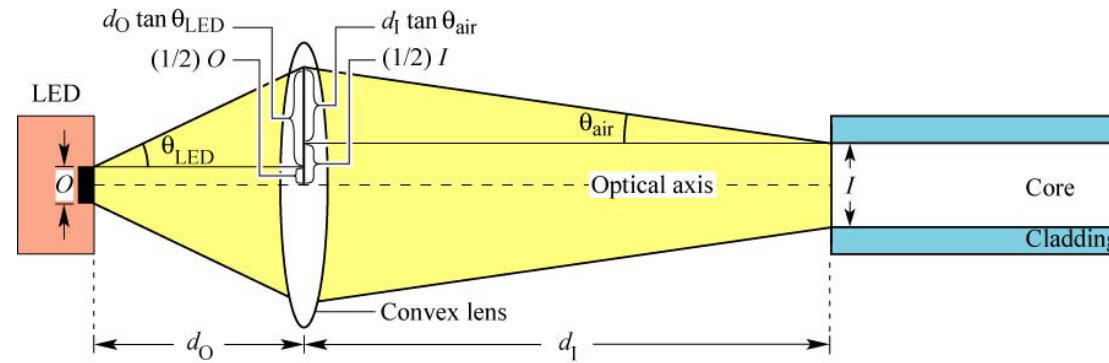
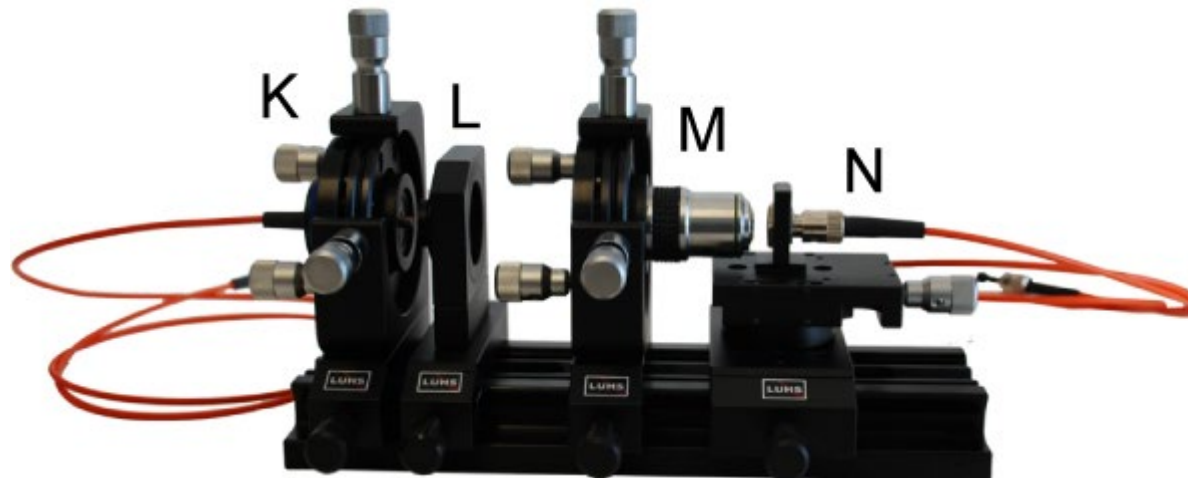


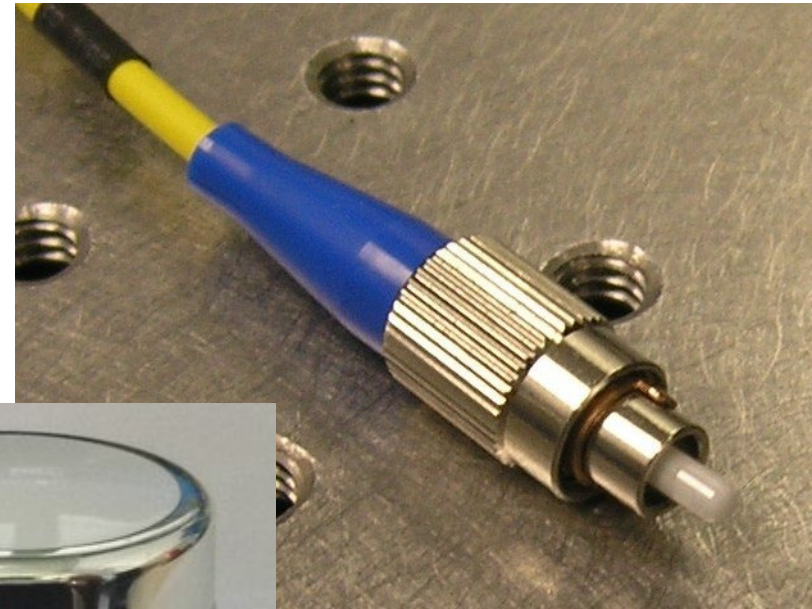
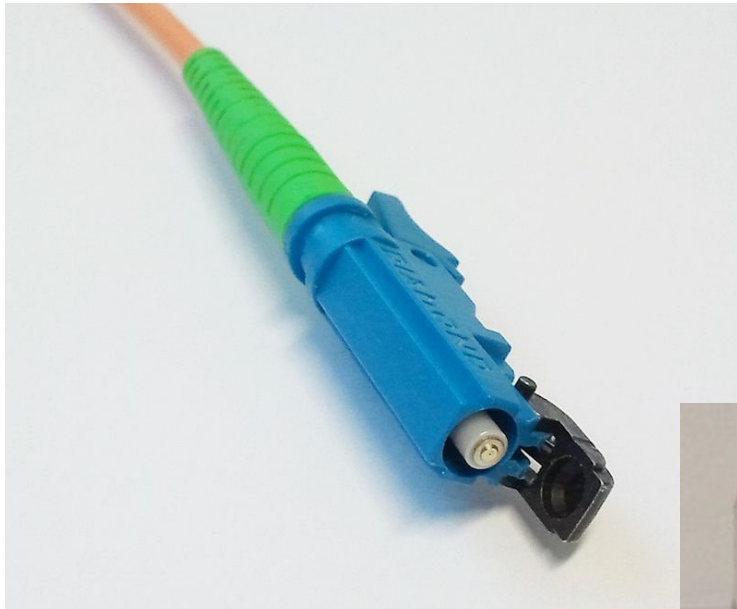
Fig. 22.7. Schematic illustration of coupling with a lens by imaging the light-emitting region of an LED onto the core of an optical fiber. The LED has a circular emission region with diameter O (Object). The emission region is imaged onto the fiber core with diameter I (Image) using a convex lens with focal length f .

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org



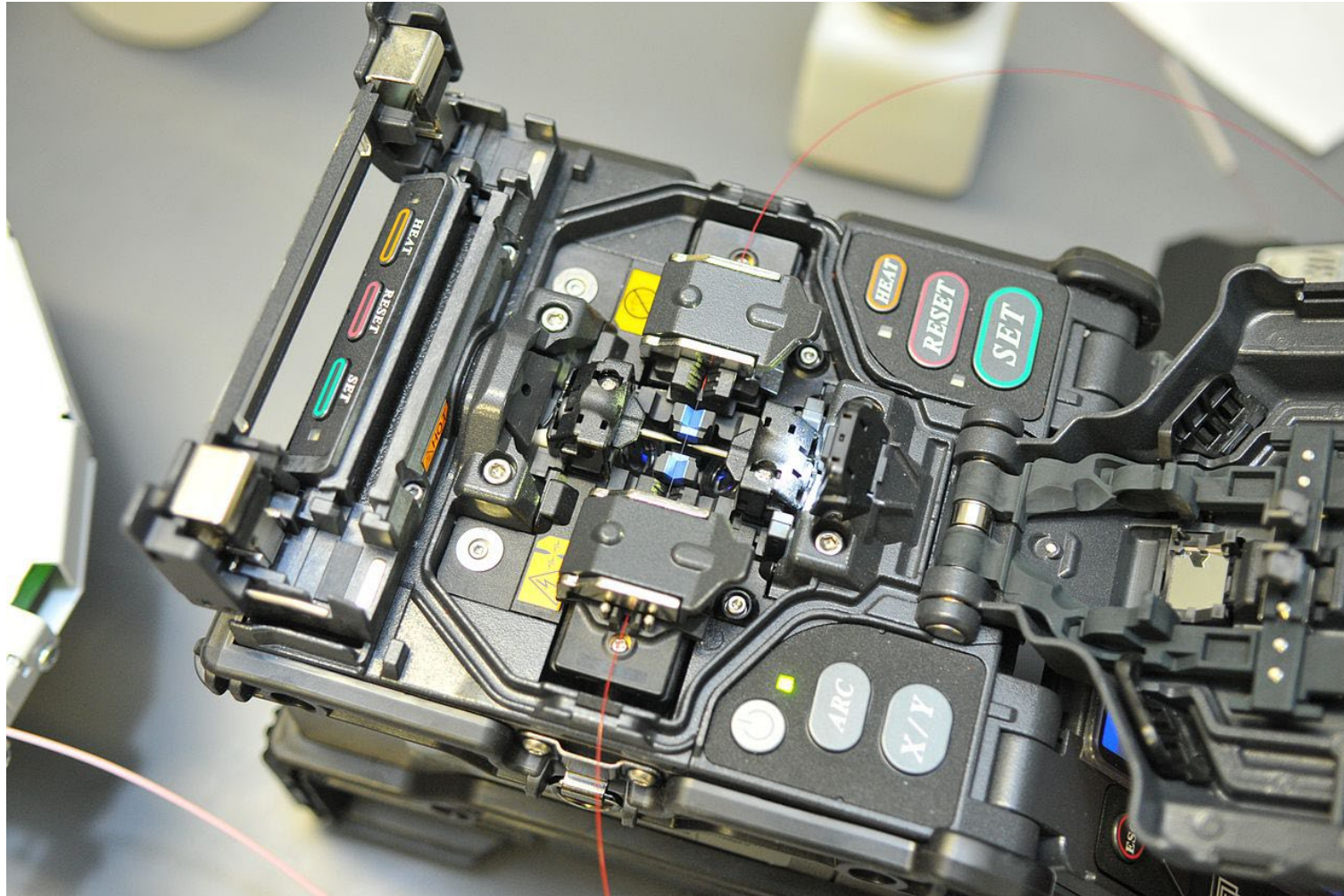
Couplage dans une fibre

- Un bon “contact” optique est bien plus difficile à obtenir qu’un contact électrique
- Différents types de connecteurs existent
- En général 0.3 dB de perte/connecteur



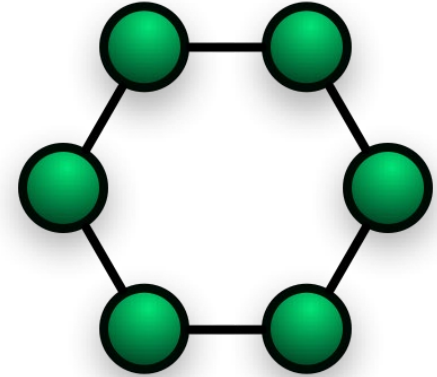
Fibre splicing

- La meilleure connexion est obtenue en fondant les deux fibres que l'on souhaite relier entre-elles en faisant une épissure (splicing en anglais)



Plastic optical fibres (POF)

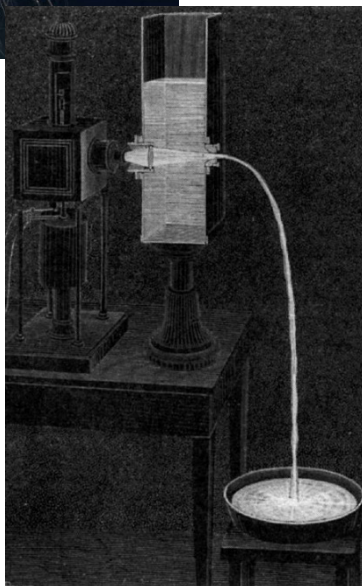
- Utilisées dans l'industrie automobile dès la fin des années 1990
- Fibre à saut d'indice, généralement en polyméthylmethacrylate (PMMA), avec un coeur de 1mm et NA=0.5
- Pertes: 180 dB/km ($\lambda_0=650$ nm), 110 dB/km ($\lambda_0=520$ nm) (~0.3 dB/km pour une fibre en verre monomode!)
- Le très grand nombre de modes (plusieurs millions!) limite la bande passante à 400 MHz pour une distance de propagation de ~100 m
- MOST (Media Oriented Systems Transport), ring bus utilisé dans la plupart des automobiles
- Très bonne compatibilité électromagnétique



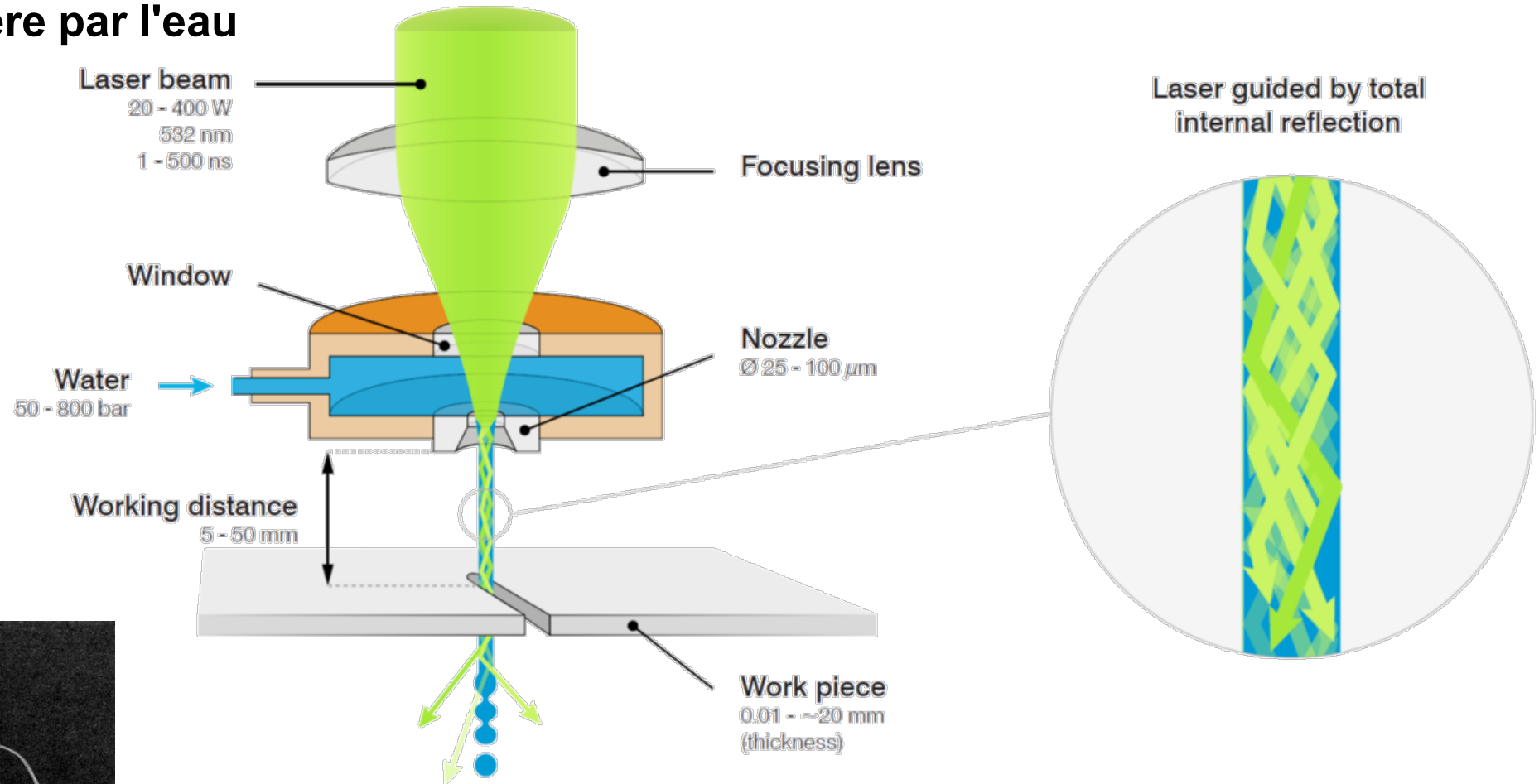
Guidage de la lumière par l'eau



Laser microjet
www.synova.ch



Jean-Daniel Colladon (1802-1893)
www.wikipedia.org



Ingénierie optique

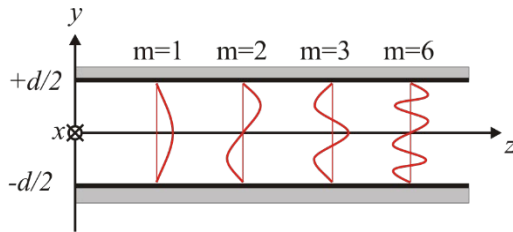
Semaine 9 – partie 4

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

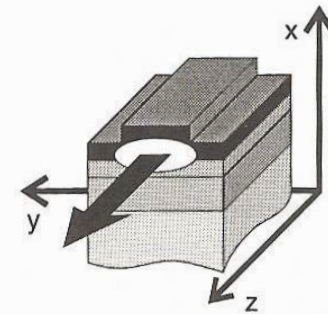


Guides diélectriques 2D

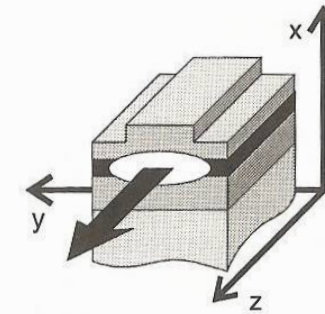
- Jusqu'à présent, nous avons considéré des guides qui ne confinent la lumière que dans une seule direction (guide 1D):



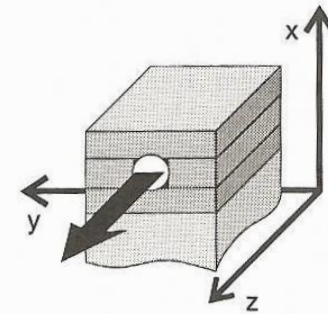
- Pour un guide 2D, le principe est toujours le même: on crée une région d'indice élevé, dans laquelle la lumière est guidée
- Des géométries variées existent qui permettent un confinement de la lumière dans les deux directions transverses et sa propagation dans la troisième direction



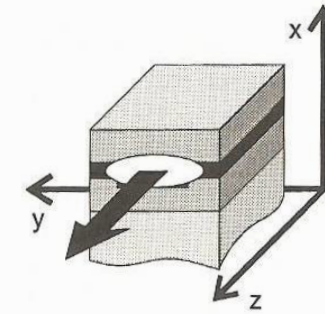
Rib waveguide



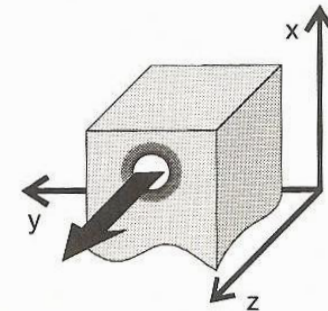
Strip-loaded waveguide



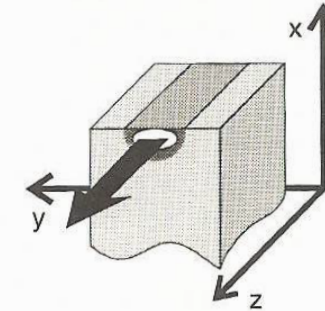
Buried-strip waveguide



Buried-rib waveguide



Buried diffused waveguide



Diffused waveguide

Guides diélectriques 2D

- En variant la trajectoire de guides diélectriques 2D on peut réaliser les différents composants requis pour l'optique intégrée

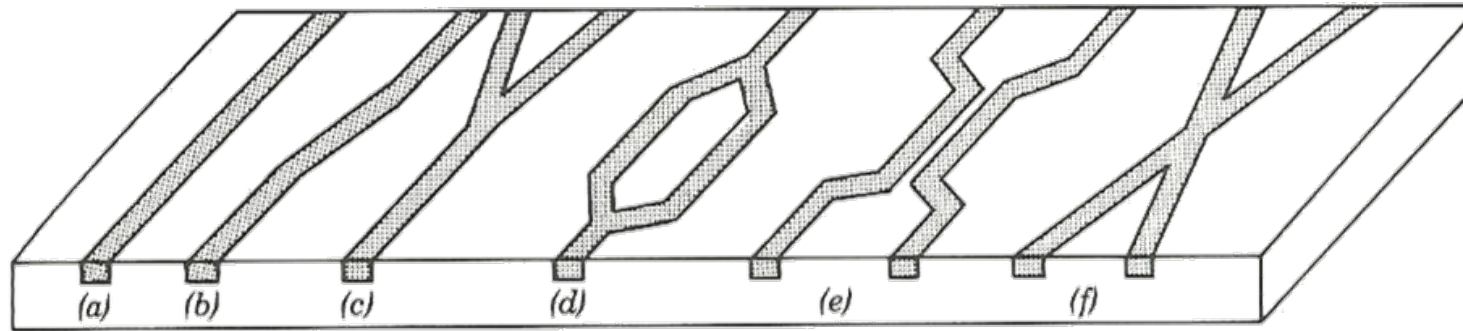
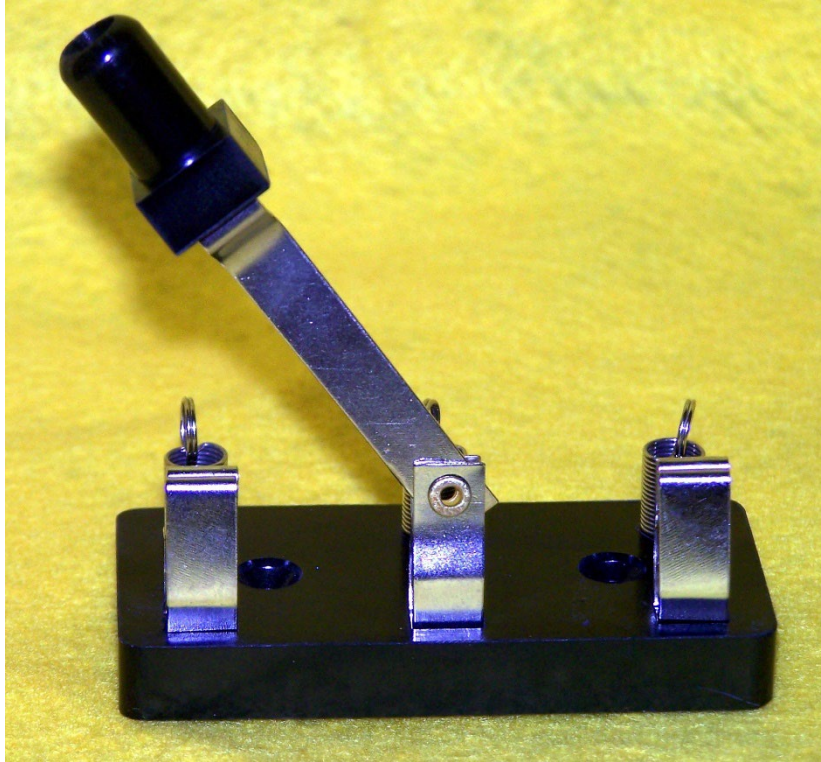


Figure 7.3-4 Different configurations for waveguides: (a) straight; (b) S bend; (c) Y branch; (d) Mach–Zehnder; (e) directional coupler; (f) intersection.

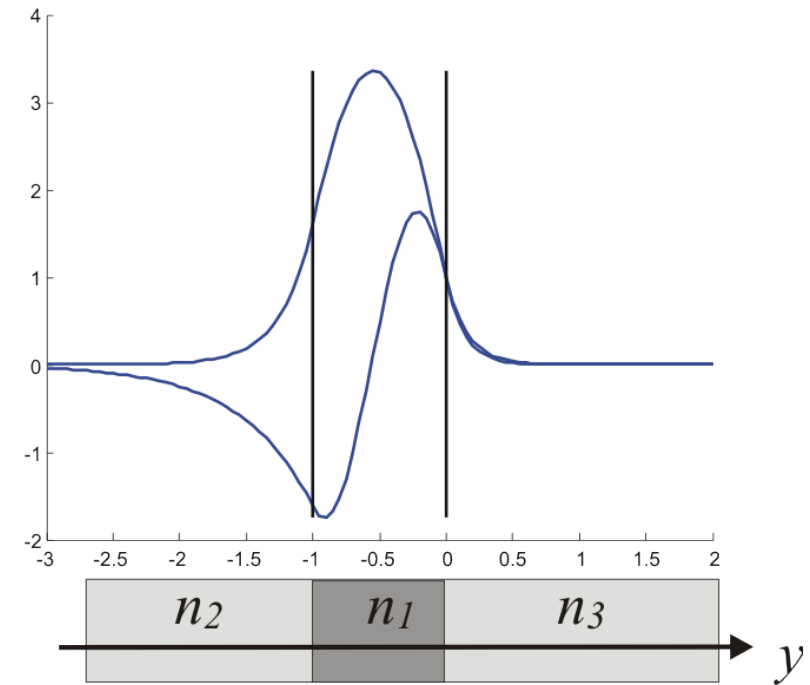
R.G. Hunsperger, Integrated optics: theory and technology (3rd Ed. Springer, 1991)

Interrupteur optique

- Contrairement au courant électrique, il n'existe pas d'interrupteur permettant de rediriger la lumière d'un guide d'onde à l'autre



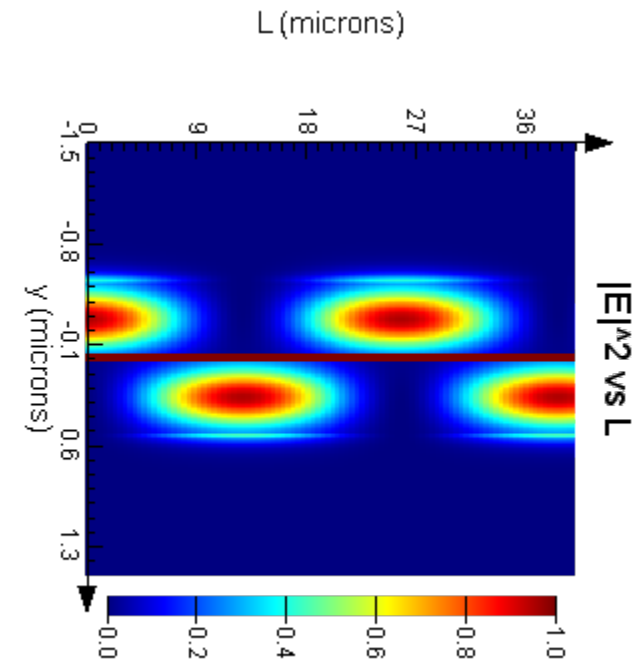
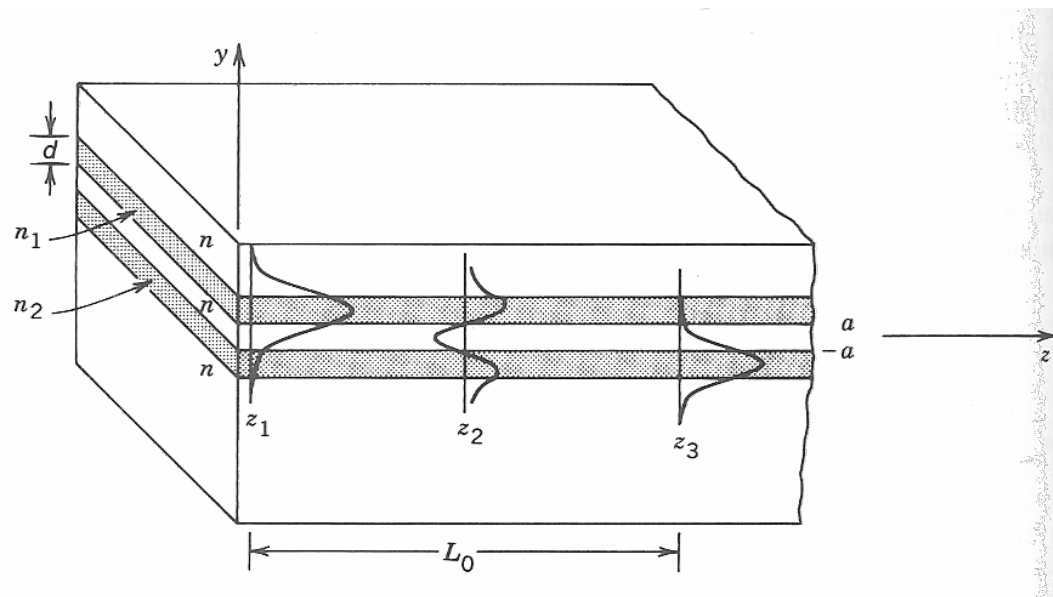
(b)



- Comme le champ électrique déborde du guide, deux guides placés à proximité l'un de l'autre se couplent → phénomène de battement

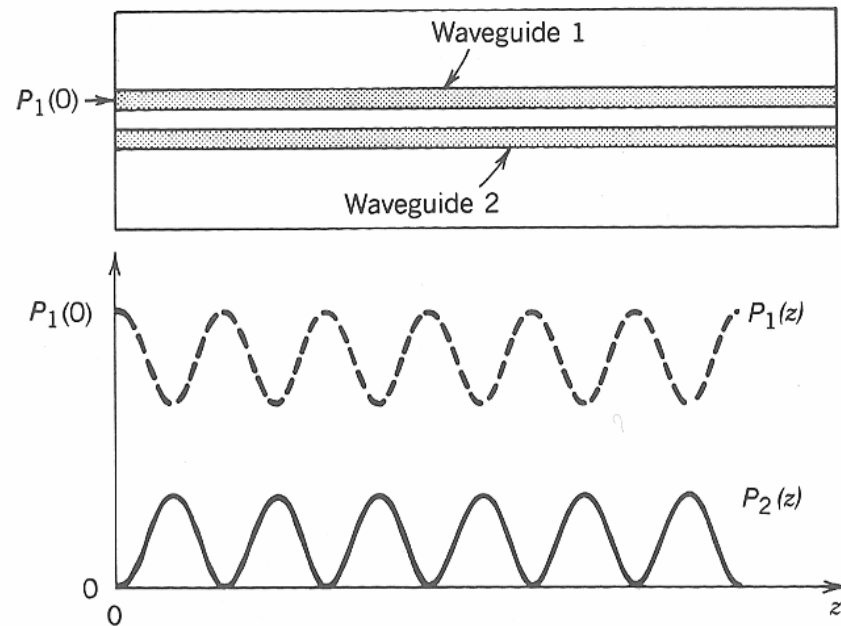
Couplage entre des guides parallèles

- Comme les modes s'étendent au-delà du cœur du guide, le mode peut se coupler dans un guide voisin
- L'énergie est transférée peu à peu d'un guide à l'autre et vice-versa; la longueur du transfert peut être de quelques dizaines de λ et dépend du couplage entre les guides

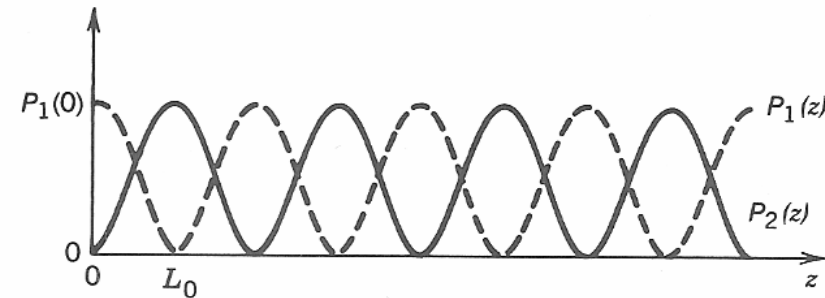


Couplage entre des guides parallèles

- Cette technique est utilisée pour créer des diviseurs de puissance, ou pour commuter la lumière d'un guide à l'autre



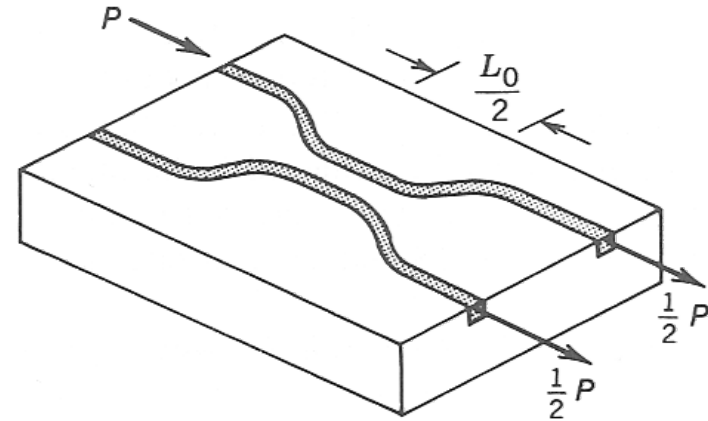
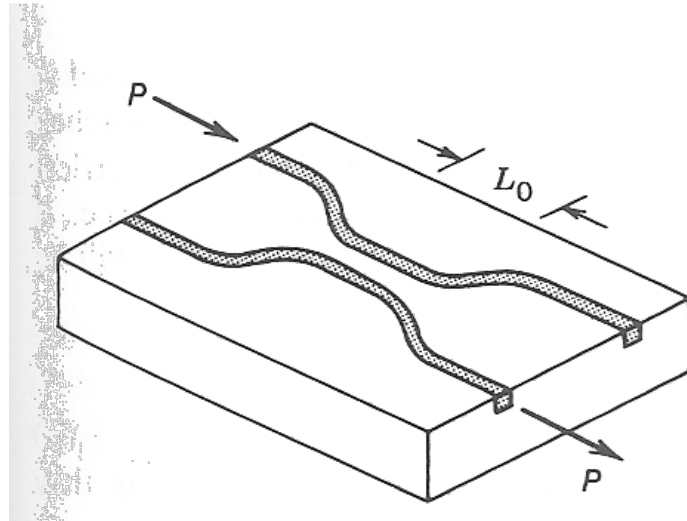
Couplage partiel



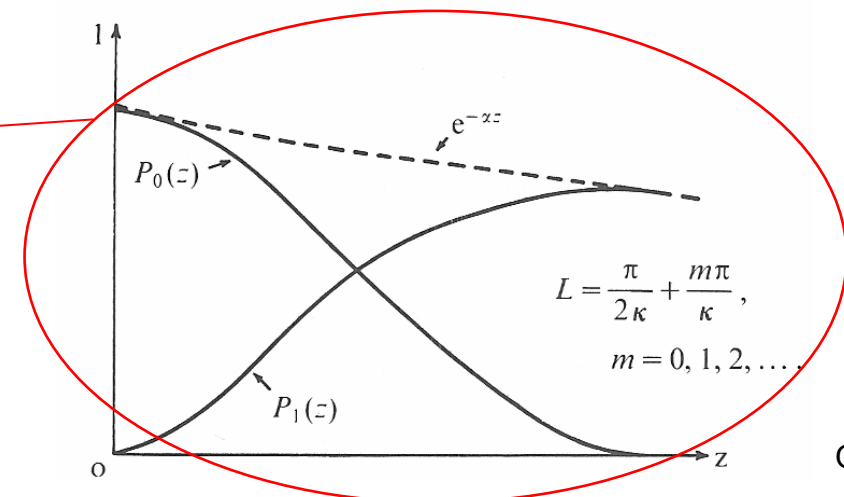
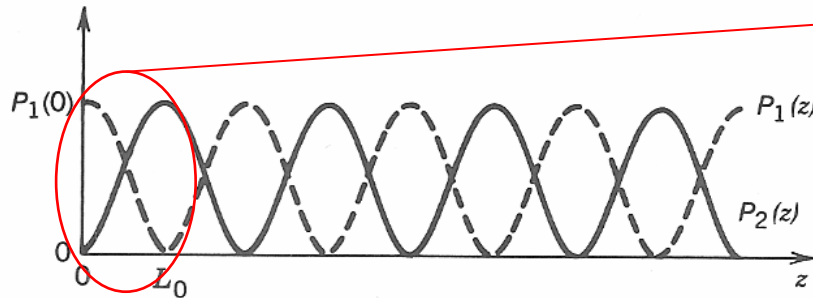
Couplage total

Couplage entre des guides parallèles

- En ajustant la longueur d'interaction, on peut coupler tout ou partie de l'énergie d'un guide dans l'autre

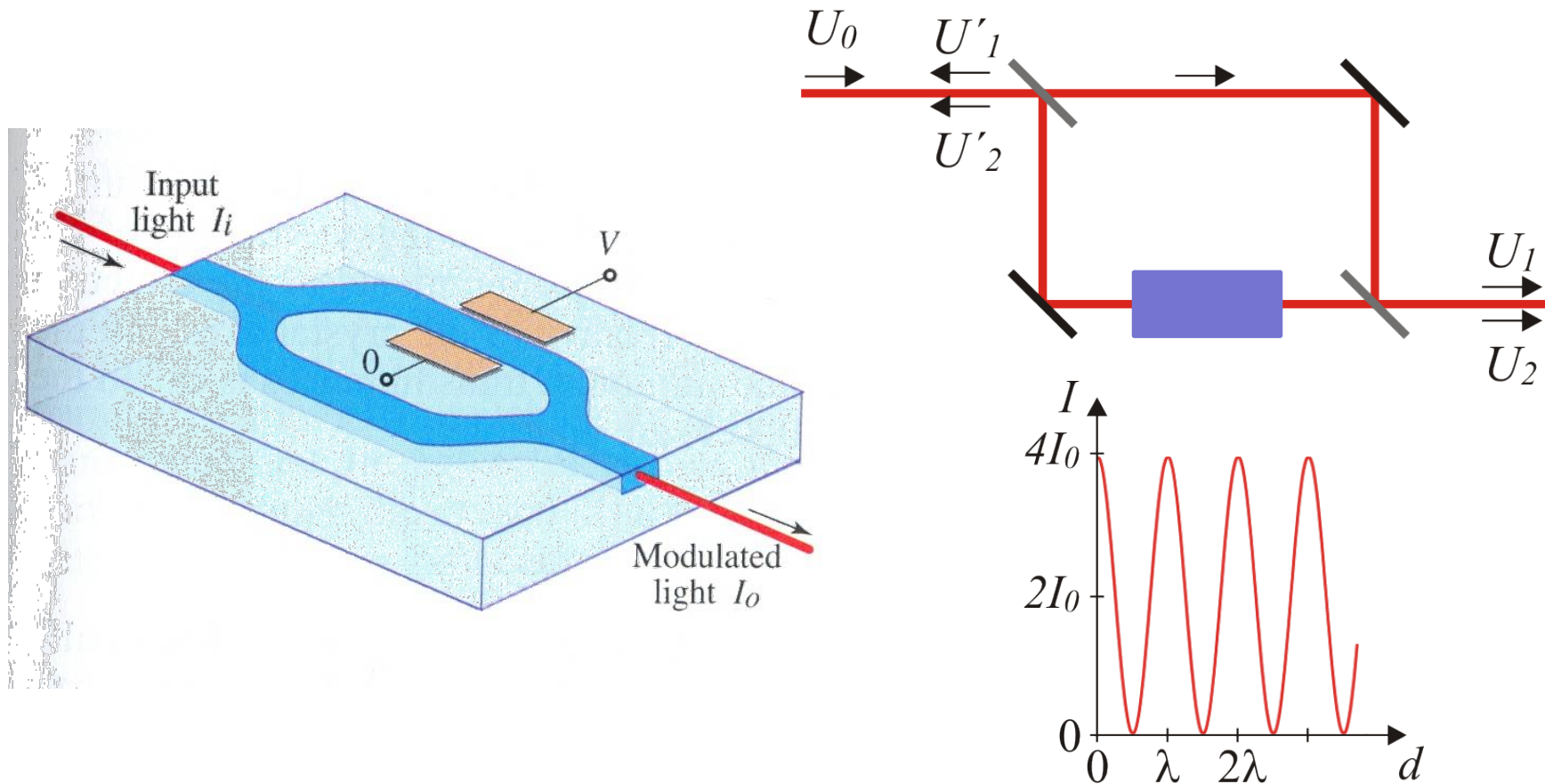


En tenant compte des pertes:



Modulateur électro-optique

- En injectant des charges dans un semiconducteur, on change son indice de réfraction $\rightarrow$ on change la vitesse de propagation $\rightarrow$ on module l'interférence à la sortie du guide (constructive/destructive)



Les pertes radiatives limitent le rayon de courbure des guides

- Un grand contraste diminue les pertes radiatives

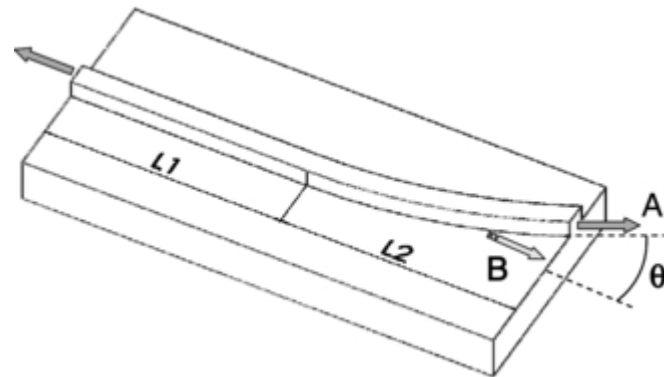
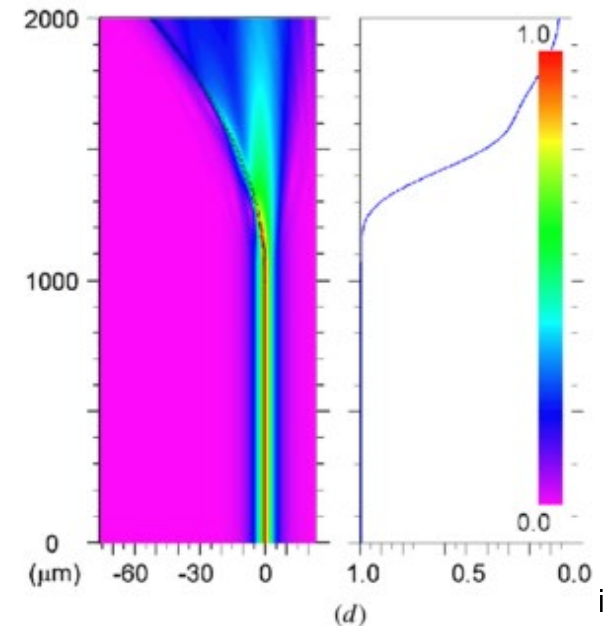
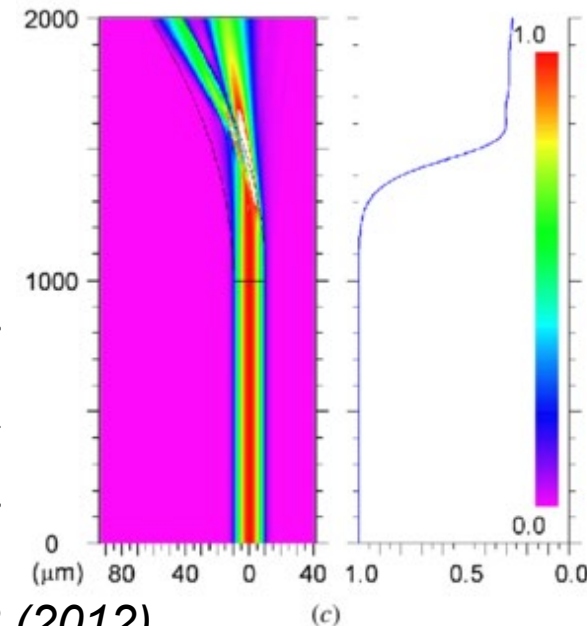
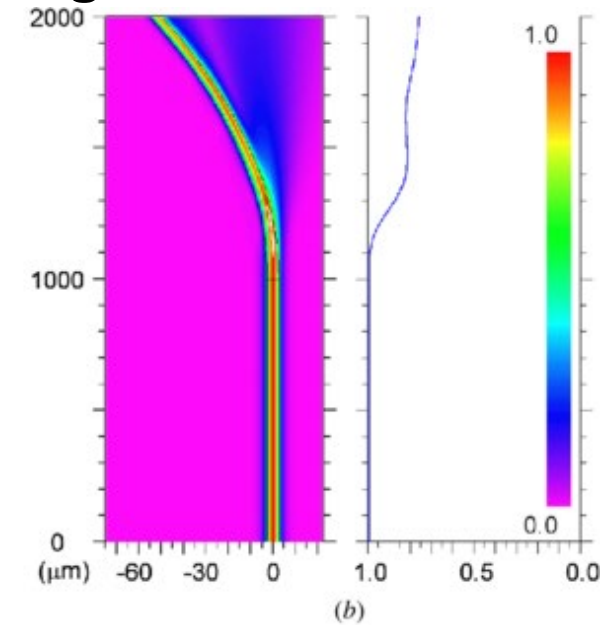
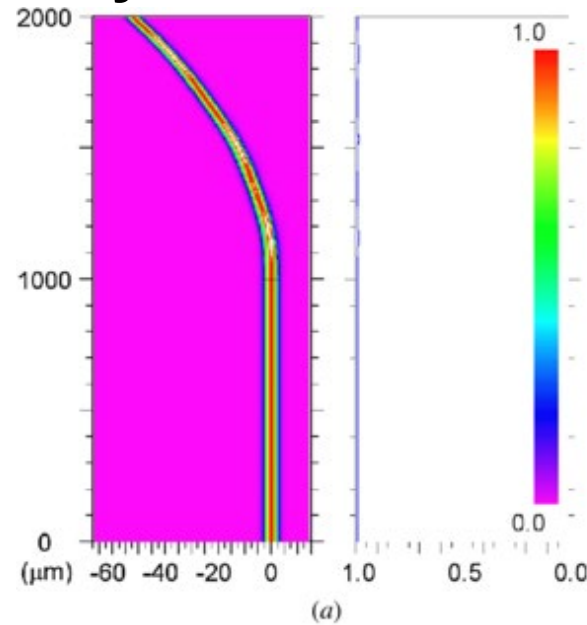


Table 2. The structural parameters of figure 2.

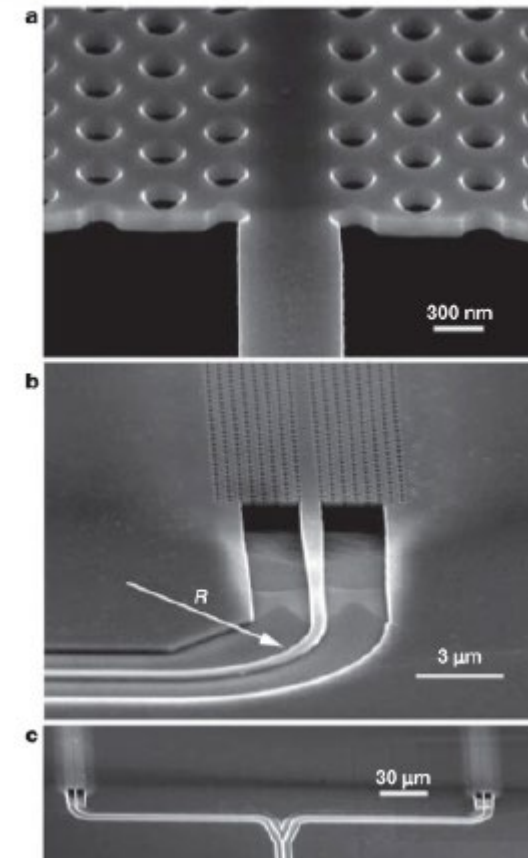
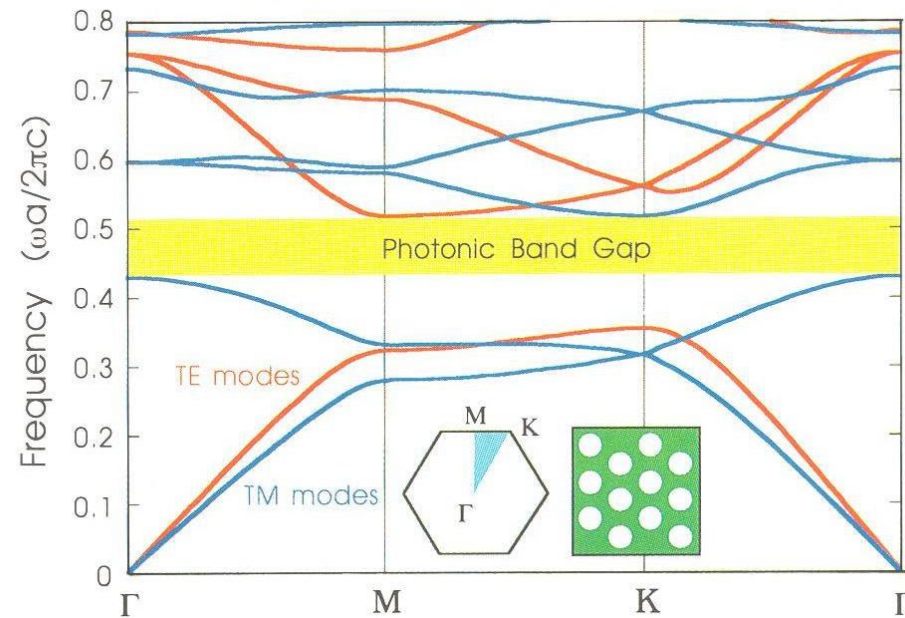
$L_1 = 1 \text{ mm}$, $L_2 = 1 \text{ mm}$, $R = 0.9567 \text{ cm}$ ($\theta = 6^\circ$)

(a)	(b)	(c)	(d)
$w_R = 5 \text{ } \mu\text{m}$	$w_R = 5 \text{ } \mu\text{m}$	$w_R = 20 \text{ } \mu\text{m}$	$w_R = 1 \text{ } \mu\text{m}$
$\Delta n = 0.01^1$	$\Delta n = 0.003^2$	$\Delta n = 0.003$	$\Delta n = 0.003$



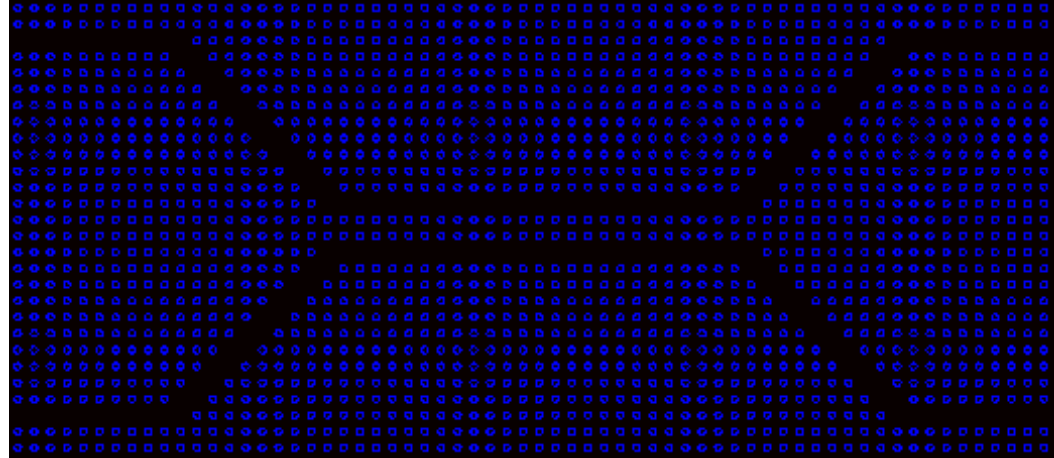
Cristaux photoniques

- Les cristaux photoniques sont l'équivalent pour les photons des semiconducteurs pour les électrons: il y existe un bandgap, une gamme de fréquences dans laquelle la lumière ne peut pas se propager



Cristaux photoniques

- La lumière est obligée de suivre le chemin tracé dans le cristal photonique et on peut lui faire prendre des chemins abruptes



Ingénierie optique

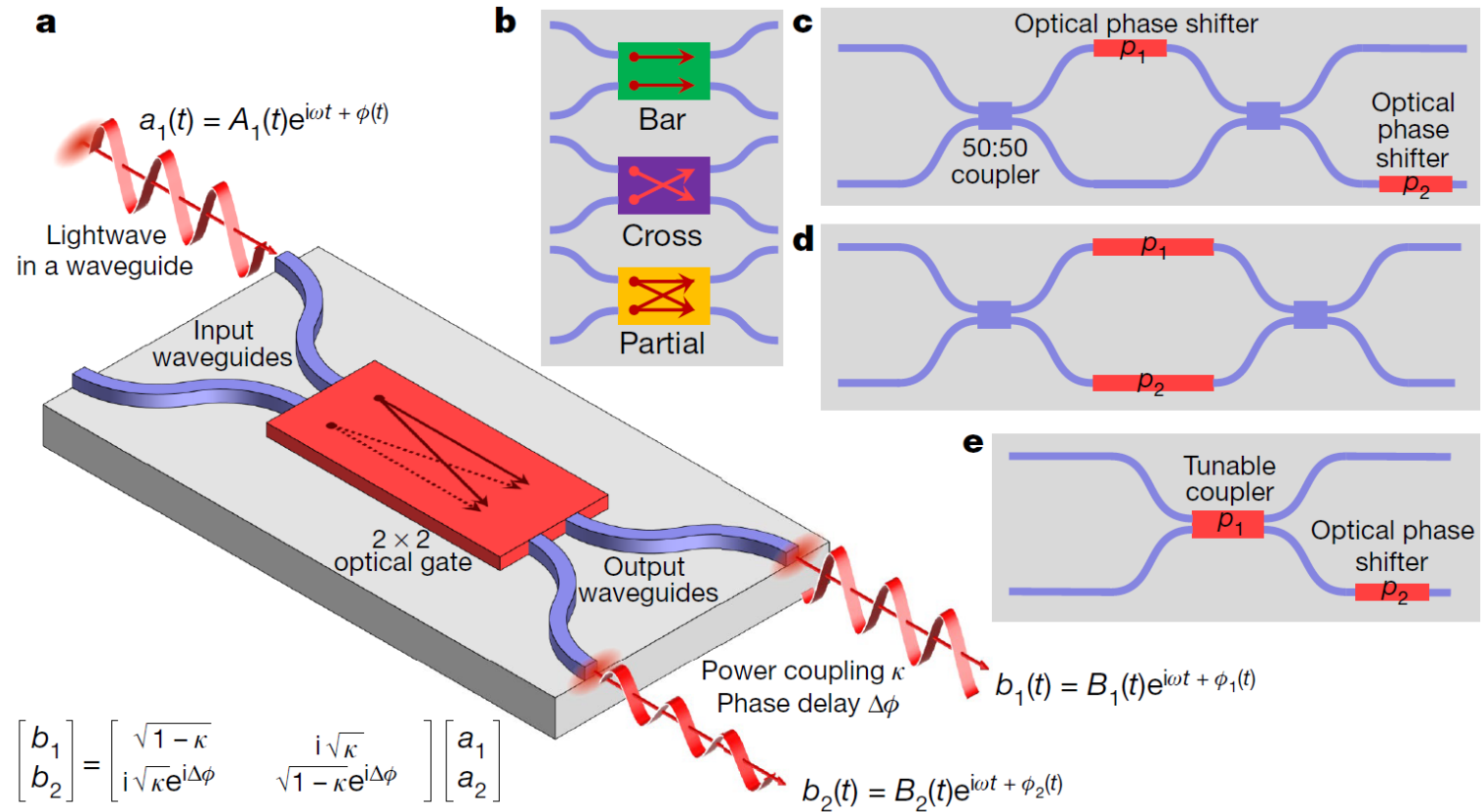
Semaine 9 – partie 5

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



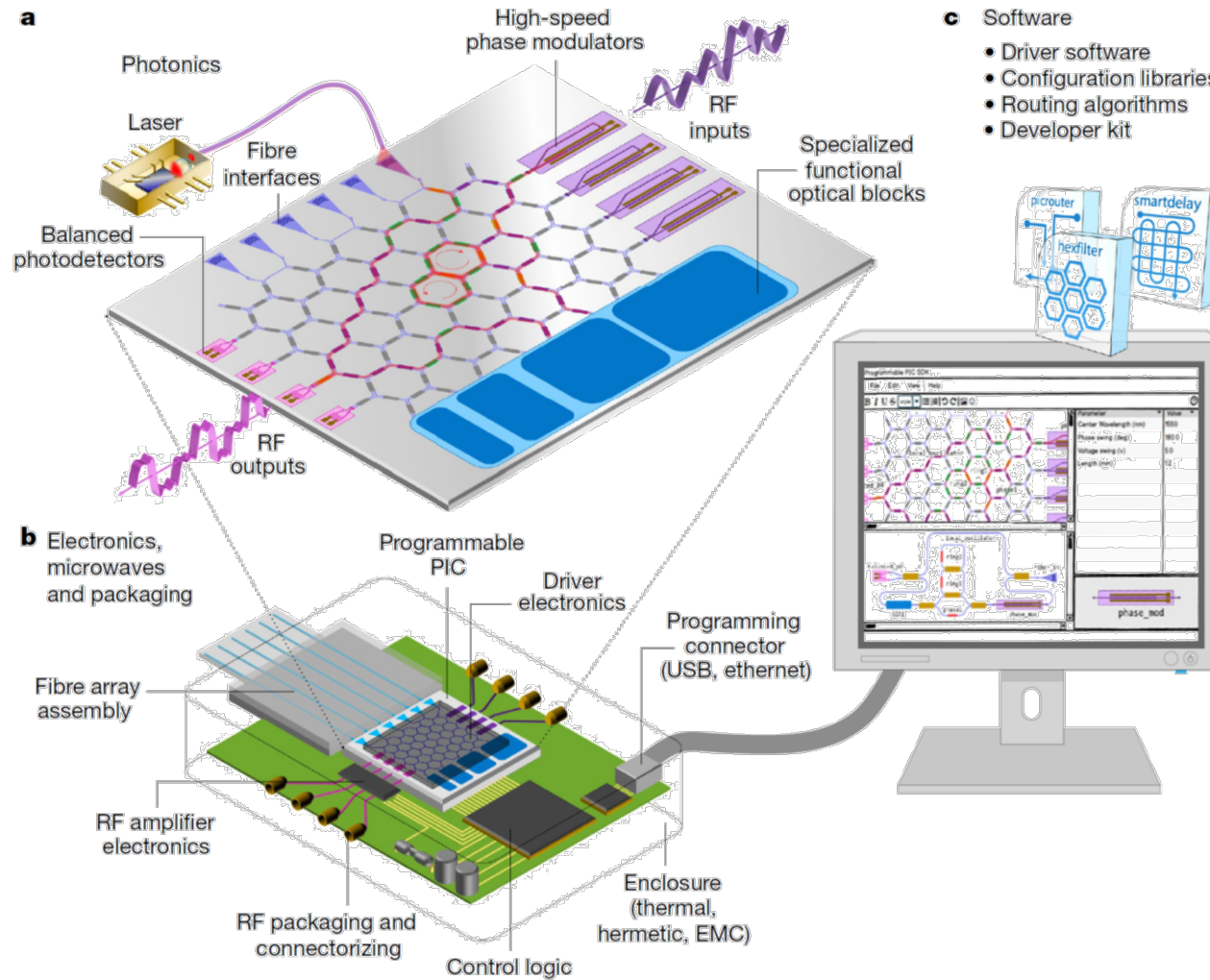
Optique intégrée

- Du traitement du signal basic peut être effectué au niveau optique



Intégration avec CMOS

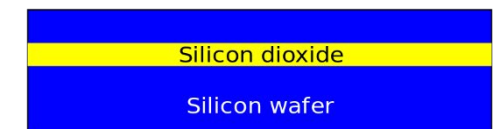
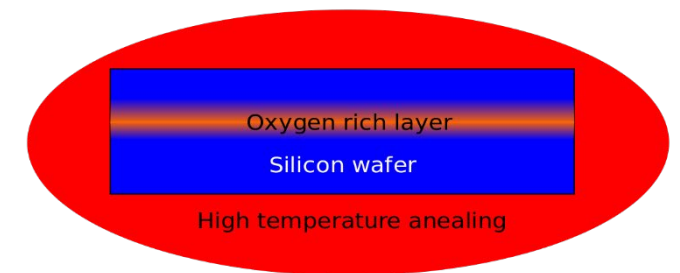
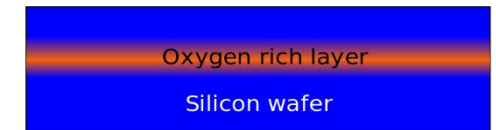
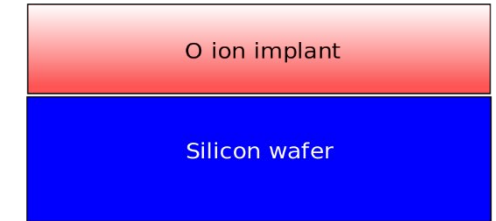
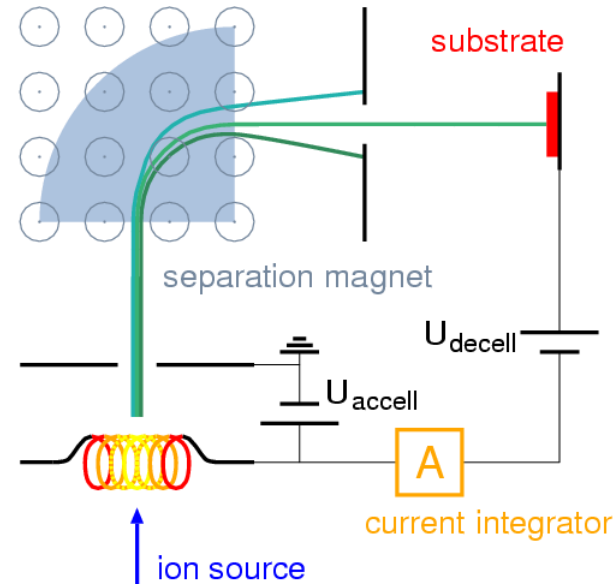
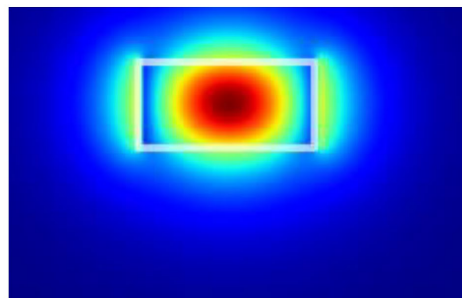
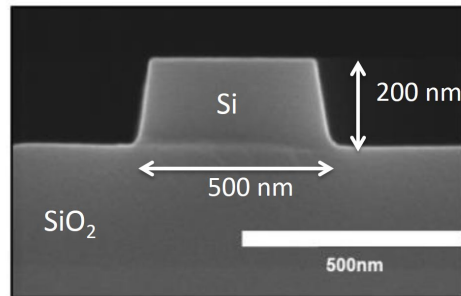
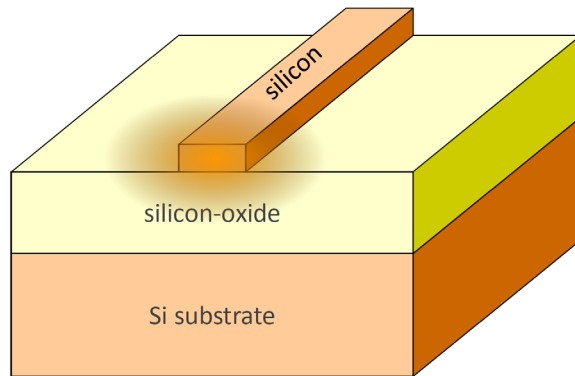
- Il faut cependant toujours une couche électronique – Intégration hybride



W. Bogaerts, *Nature* vol. 586, p. 207 (2020)

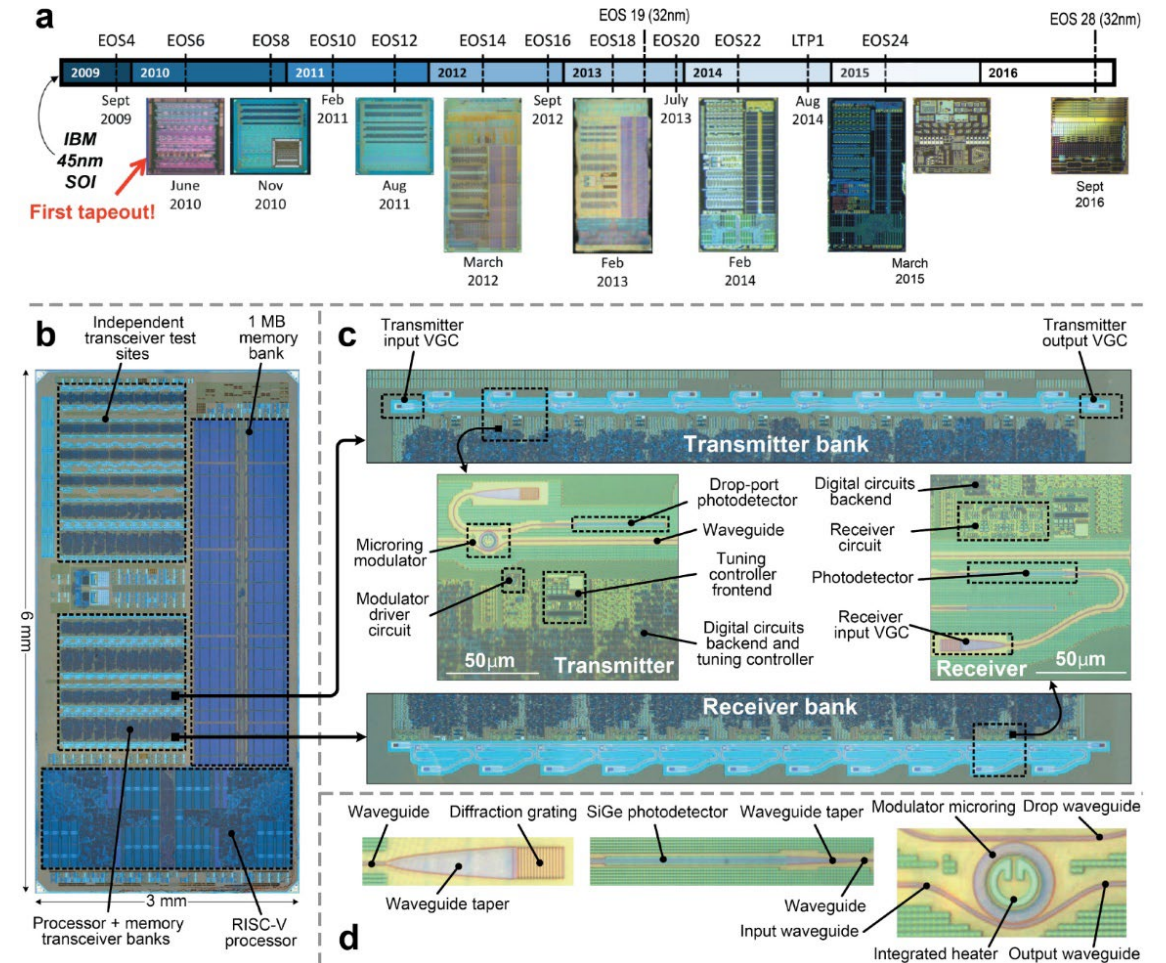
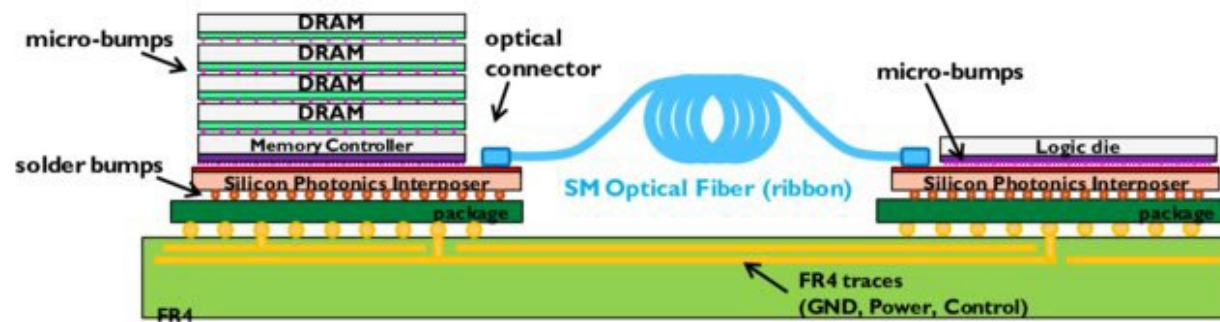
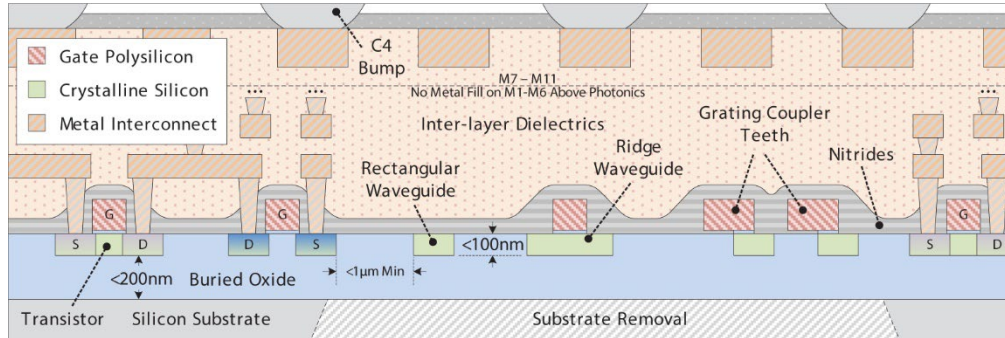
Silicon on Insulator (SOI)

- Une couche de Si pour guider la lumière sur une couche de verre (SiO_2) pour augmenter le contraste d'indice et donc le confinement de la lumière



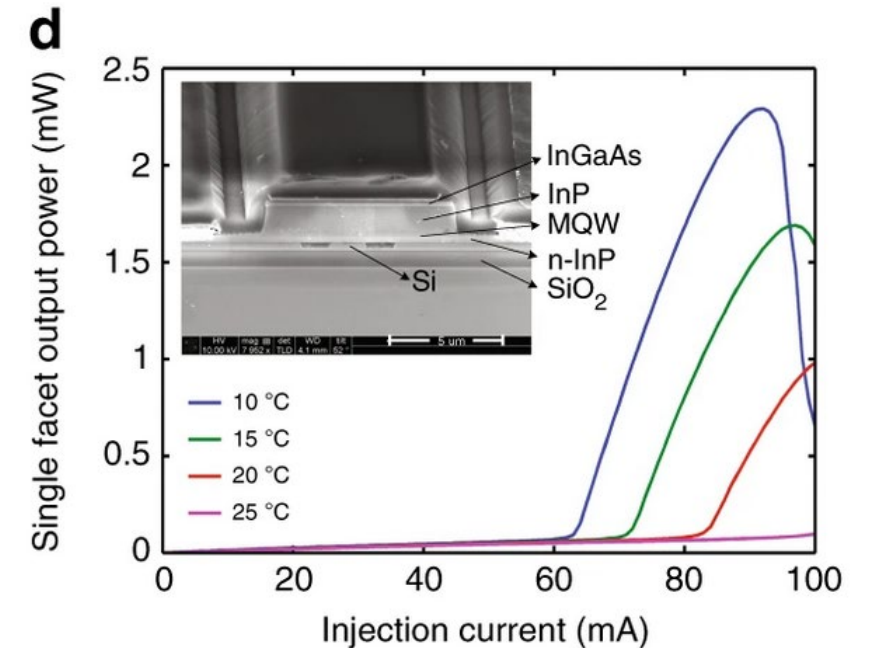
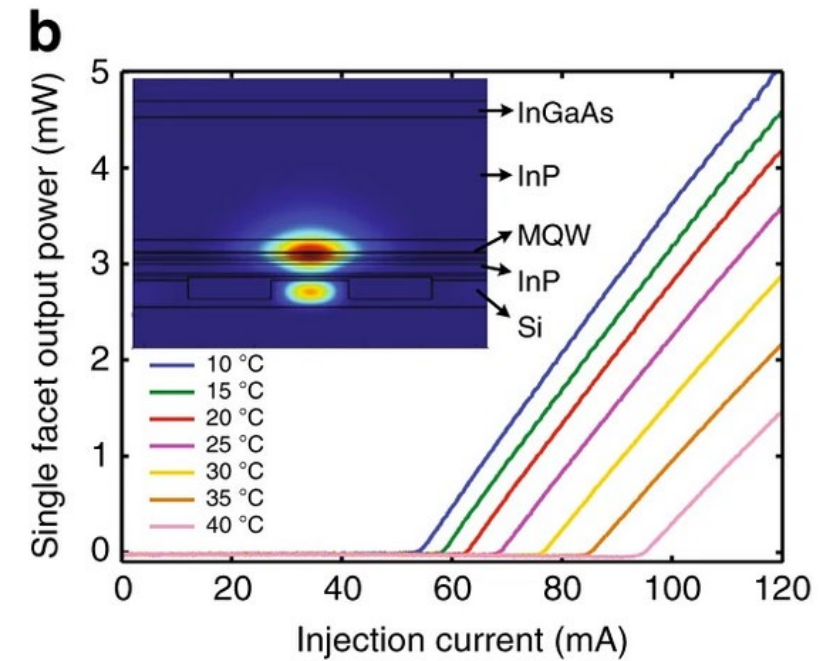
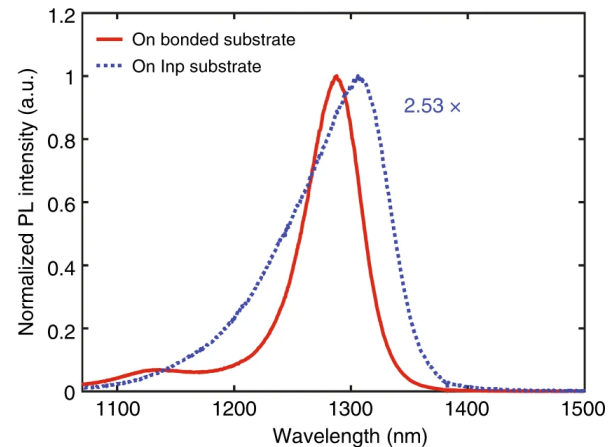
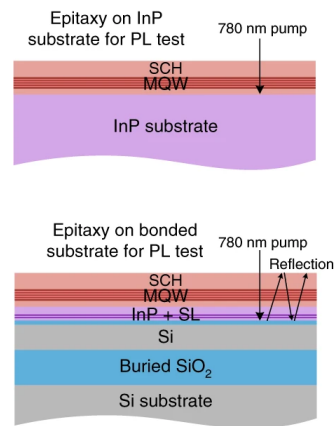
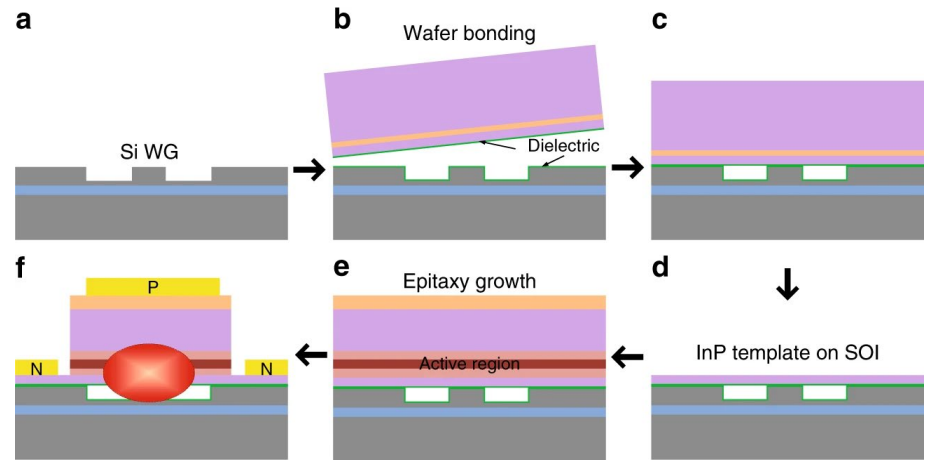
Silicon on Insulator (SOI)

- Intégration avec CMOS

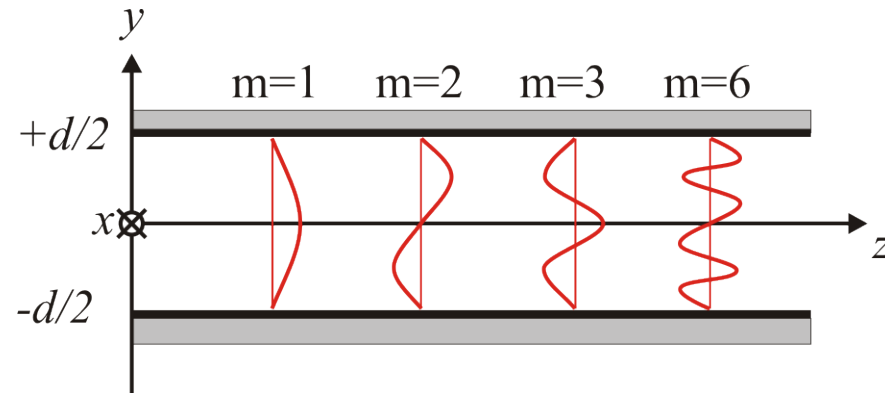


Silicon on Insulator (SOI)

- Intégration avec CMOS... et des matériaux III/V pour la réalisation de lasers



Modes guidés – Distribution du champ



$$E_x(y, z) = a_m u_m(y) e^{-j\beta_m z}$$

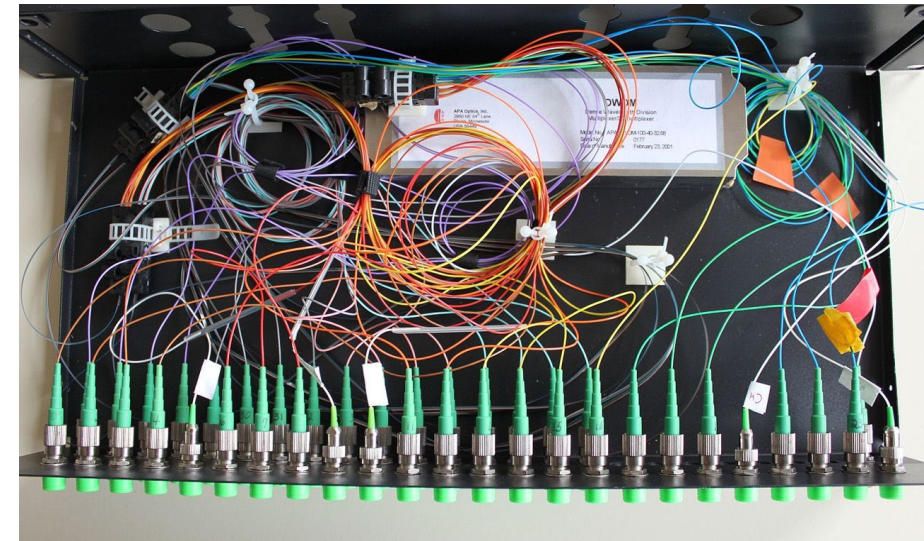
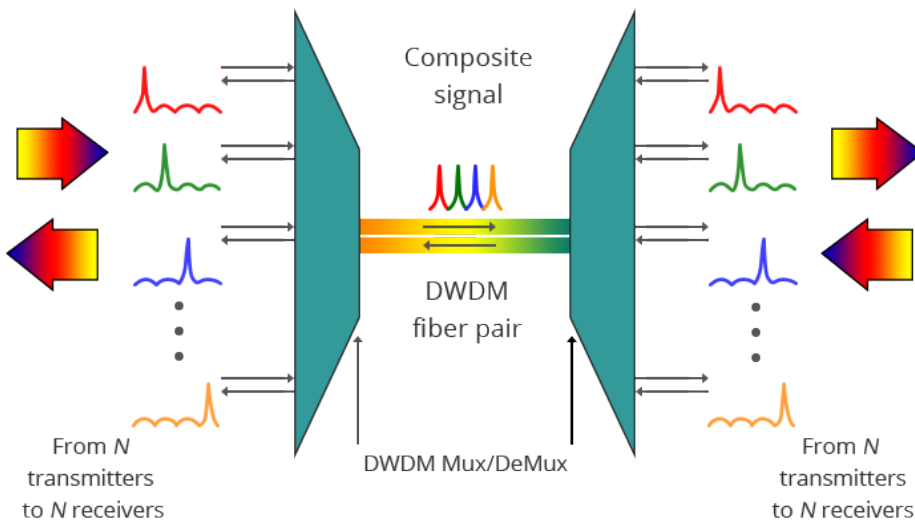
- Normalisation $\int_{-d/2}^{d/2} u_m^2(y) dy = 1$

- Propriété d'orthogonalité

$$\int_{-d/2}^{d/2} u_l(y) u_m(y) dy = 0, \quad \text{si } l \neq m.$$

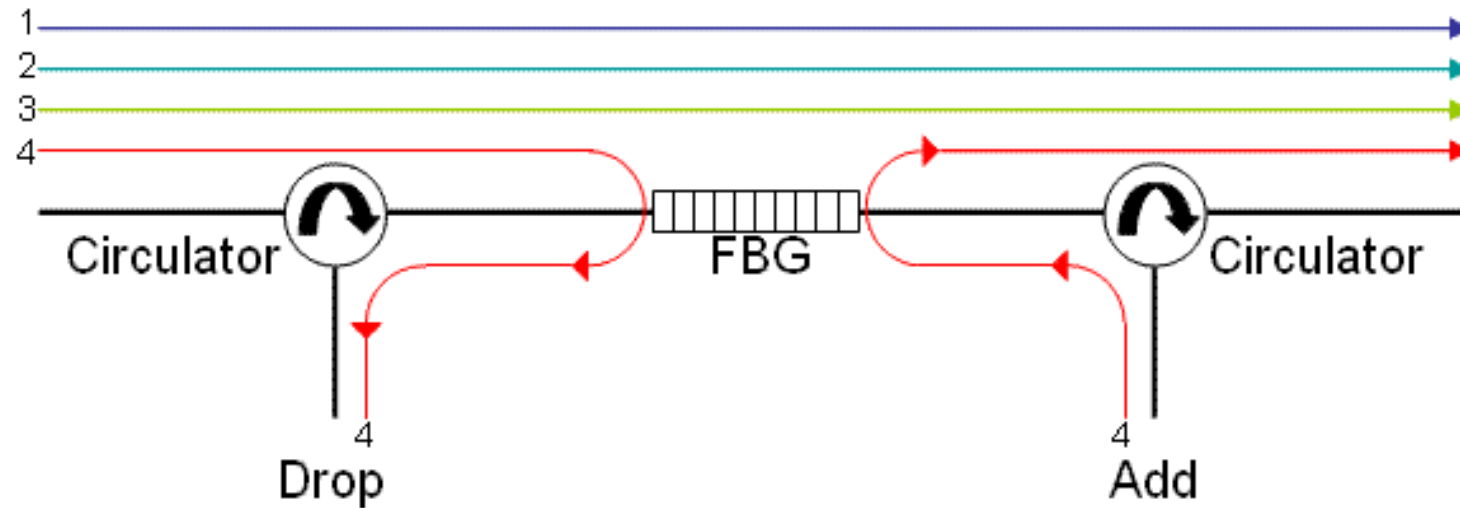
Dense wavelength division multiplexing (DWDM)

- Un attrait important de la fibre optique est que plusieurs longueurs d'onde très proches peuvent se propager dans la même fibre sans interagir
- Jusque 160 canaux entre $\lambda=1530$ nm et 1560 nm



Dense wavelength division multiplexing (DWDM)

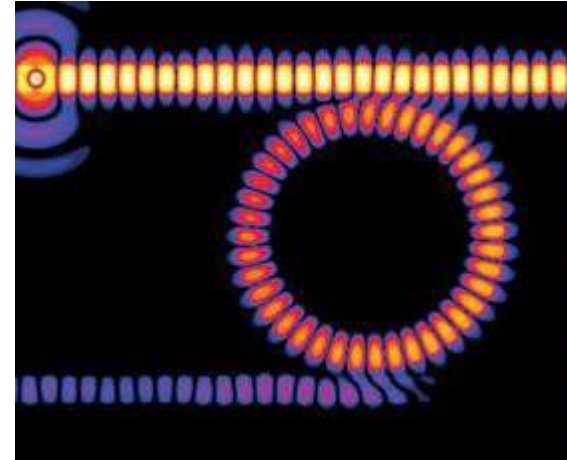
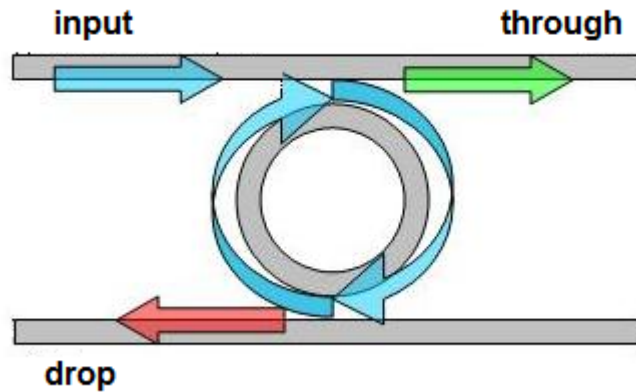
- Des systèmes de filtres interférentiels (réseau de Bragg) permettent d'extraire une seule longueur d'onde de la fibre optique



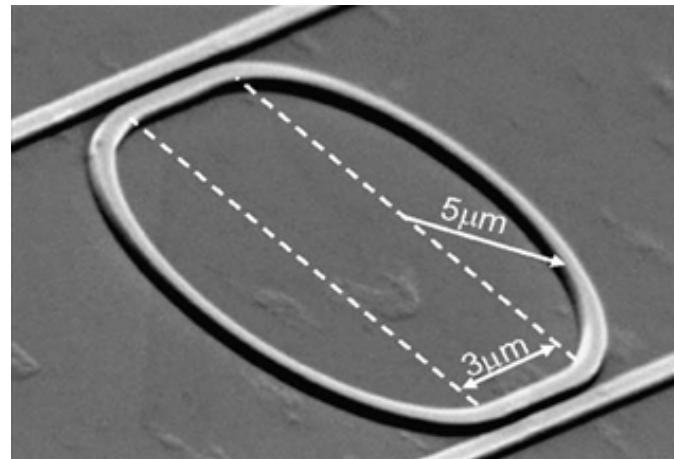
wikimedia

Couplage par cavité résonante

- Une cavité résonante placée entre deux guides d'onde permet aussi d'extraire une longueur d'onde spécifique



Schmid & Partners



IMEC