

# Ingénierie optique

---

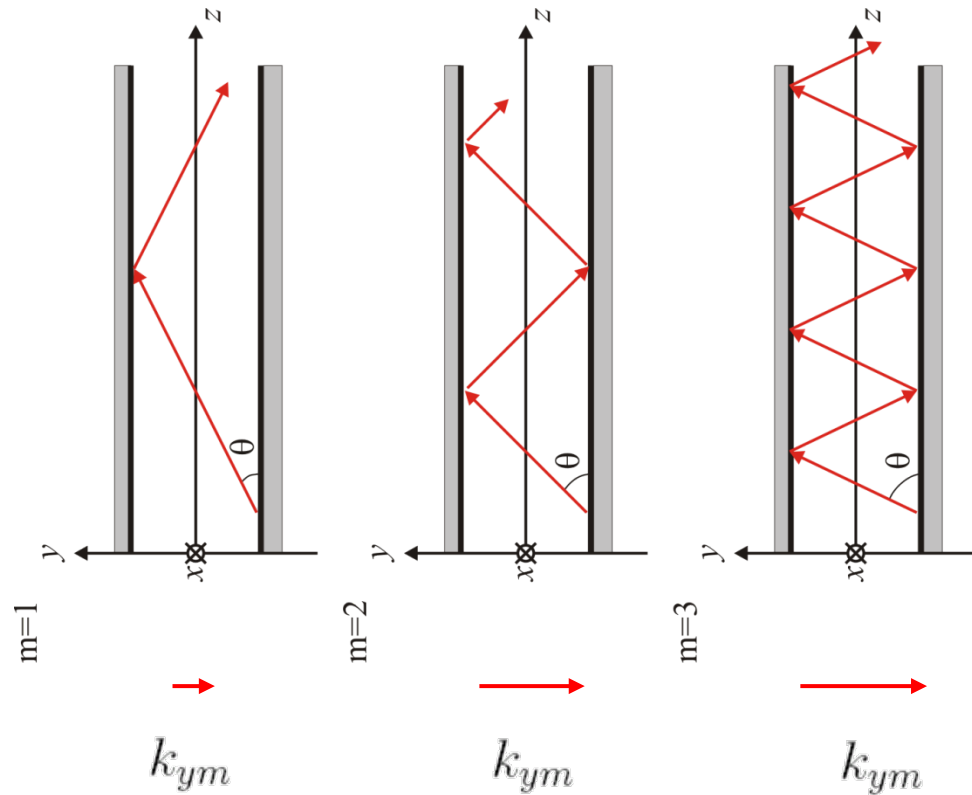
## Semaine 9 – partie 1

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

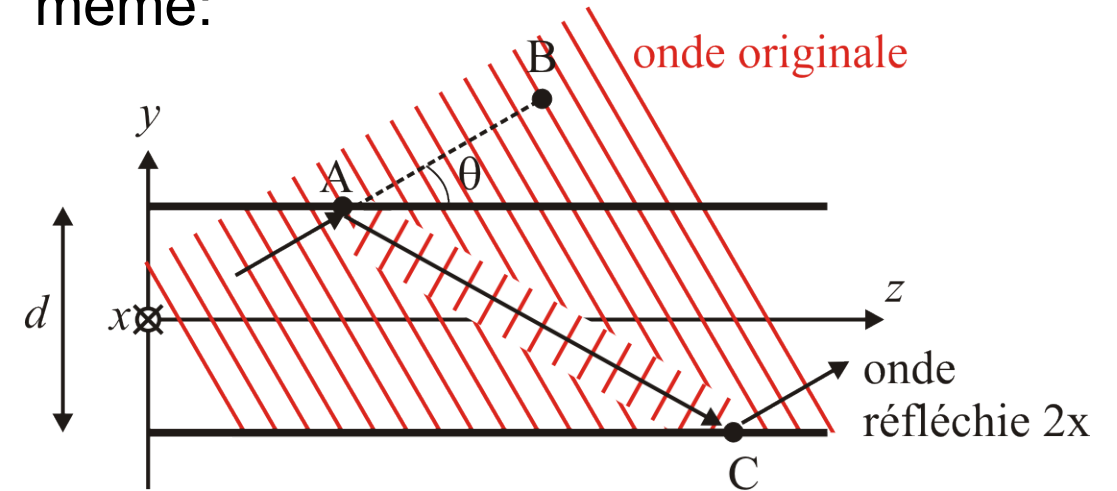


## Modes guidés – Calcul des vecteurs de propagation

- Chaque mode est caractérisé par un vecteur transverse  $k_y = nk_0 \sin \theta$
- Seuls certains angles peuvent se propager à l'infini



- Critère pour avoir un mode: après un zig-zag (deux réflexions) l'onde est la même:



$$k(AC - AB) - 2\pi = 2\pi q$$

$$AC - AB = 2d \sin \theta$$

$$k2d \sin \theta = 2\pi(q + 1) \quad q = 0, 1, 2, \dots$$

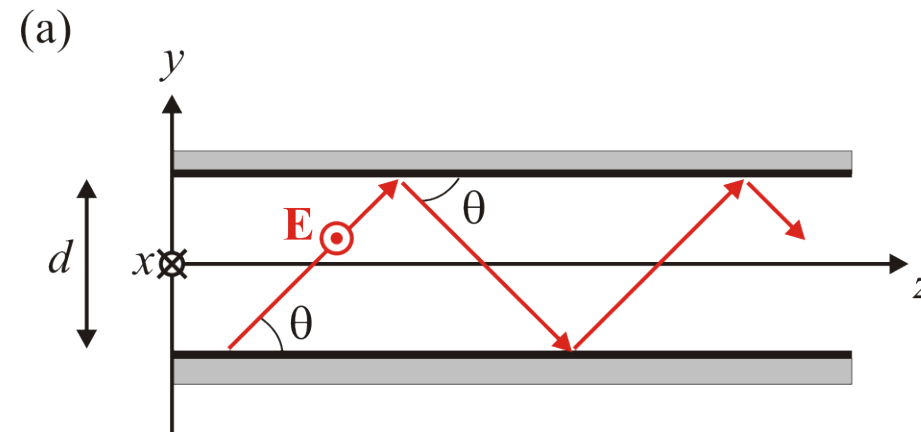
$$k2d \sin \theta = 2\pi m, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

## Modes guidés – Calcul des vecteurs de propagation

- Pour être guidé (i.e. se propager sans changement) un mode doit donc satisfaire:

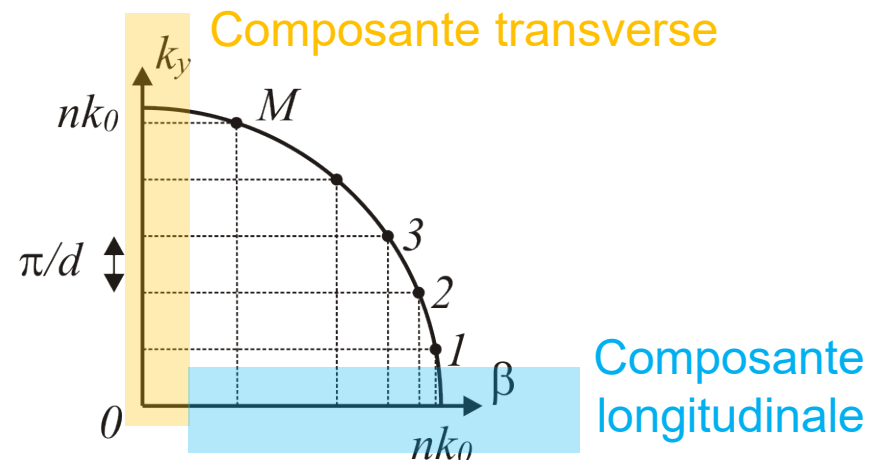
$$\sin\theta_m = m \frac{\lambda}{2d}, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

- Quantification des modes
- Seuls des angles de propagation spécifiques  $\theta_m$  sont possibles
- Pour les autres valeurs de  $\theta$  l'onde ne se propage pas dans le guide

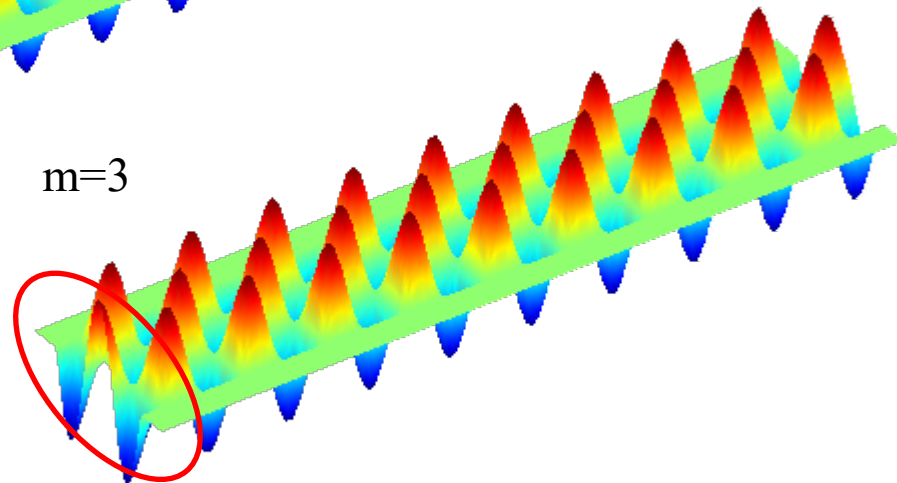
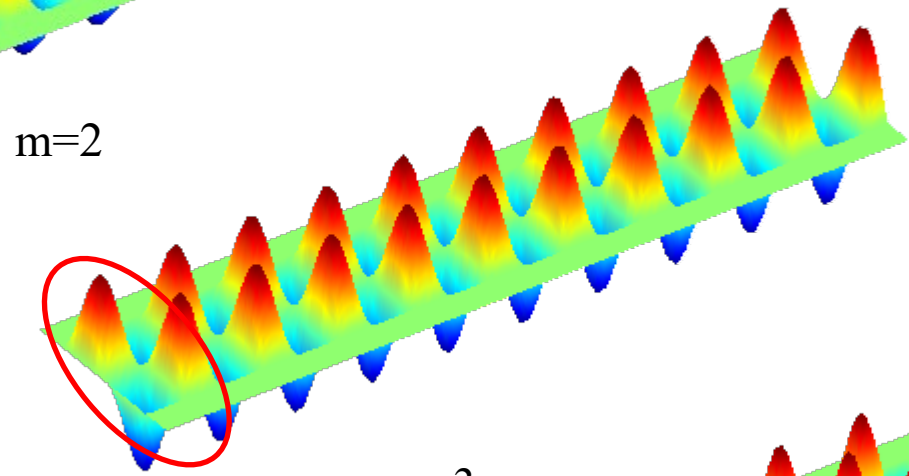
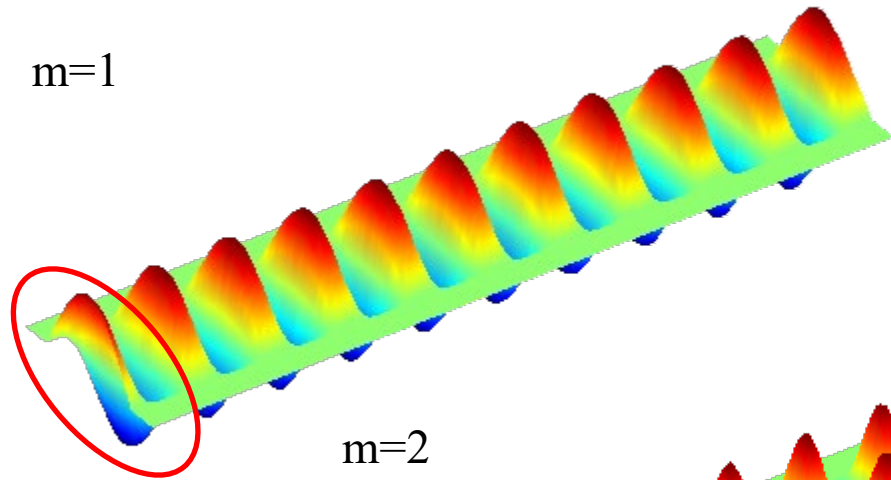
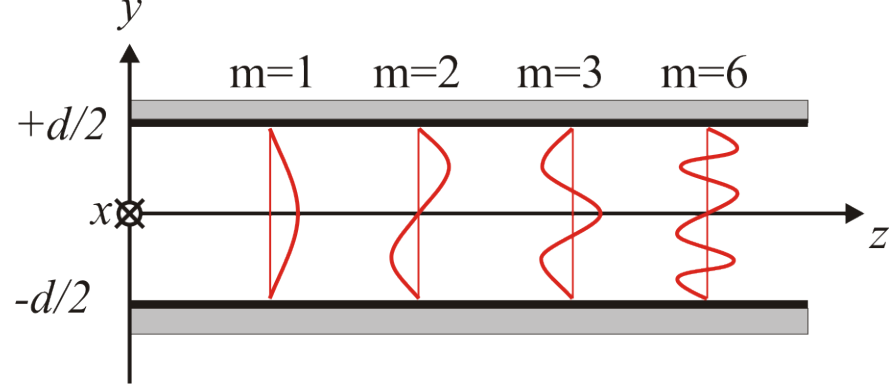


## Modes guidés – Calcul des vecteurs de propagation

- On a:  $k_y = nk_0 \sin \theta$        $k_0 = 2\pi / \lambda_0$        $\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{2d} = m \frac{\lambda_0}{2dn}$
- Composante transverse:  $k_{ym} = m \frac{\pi}{d}$        $m = 1, 2, 3, \dots$
- Composante longitudinale:  $\beta_m = k \cos \theta_m$   
 $k^2 = k_{ym}^2 + \beta_m^2$        $\beta_m^2 = k^2 - \frac{m^2 \pi^2}{d^2}$        $m = 1, 2, 3, \dots$
- Construction géométrique:



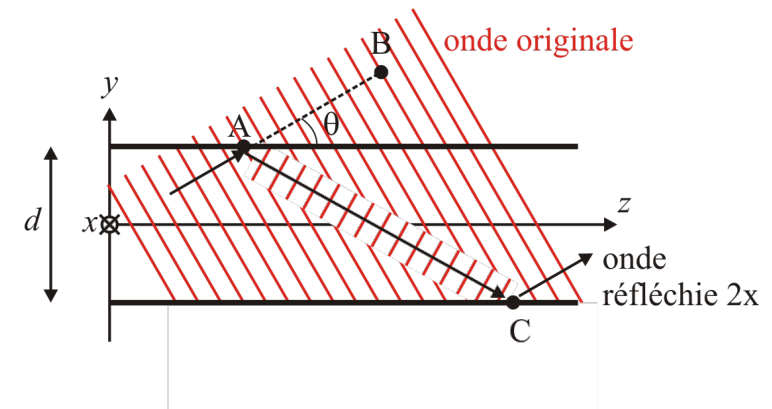
# Modes guidés – Calcul de l'amplitude



## Modes guidés – Calcul de l'amplitude

- Superposition de deux ondes

- up  $k_{\uparrow} = (k_y, k_z) = (k_{ym}, \beta_m)$
- down  $k_{\downarrow} = (k_y, k_z) = (-k_{ym}, \beta_m)$



$$E_{x\uparrow}(y, z) = A_m e^{-jk_{ym}y - j\beta_m z}$$

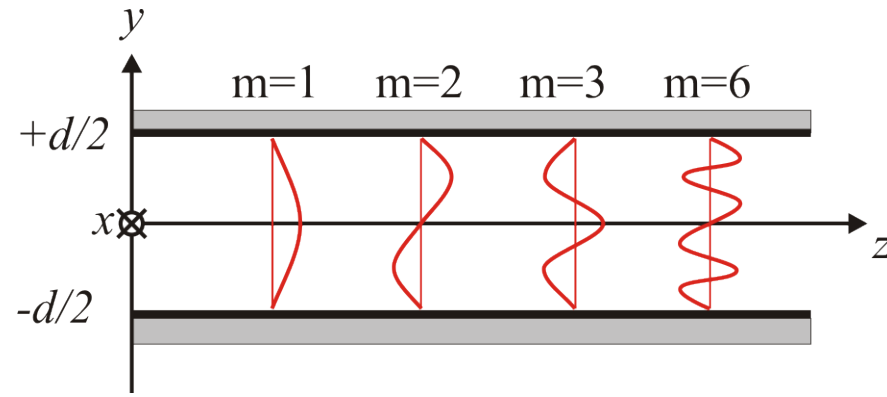
$$E_{x\downarrow}(y, z) = e^{j(m-1)\pi} A_m e^{+jk_{ym}y - j\beta_m z}$$

- En faisant la somme on obtient soit des sinus ou des cosinus:

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

$$u_m(y) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{d}} \cos\left(m\pi \frac{y}{d}\right), & m = 1, 3, 5, \dots \quad a_m = \sqrt{2d} A_m \text{ pour } m \text{ impaire} \\ \sqrt{\frac{2}{d}} \sin\left(m\pi \frac{y}{d}\right), & m = 2, 4, 6, \dots, \quad a_m = j\sqrt{2d} A_m \text{ pour } m \text{ paire} \end{cases}$$

## Modes guidés – Calcul de l'amplitude

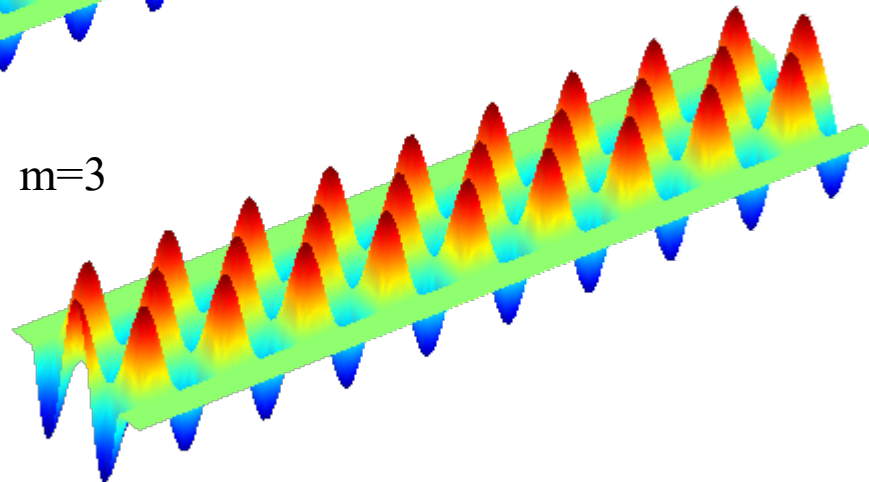
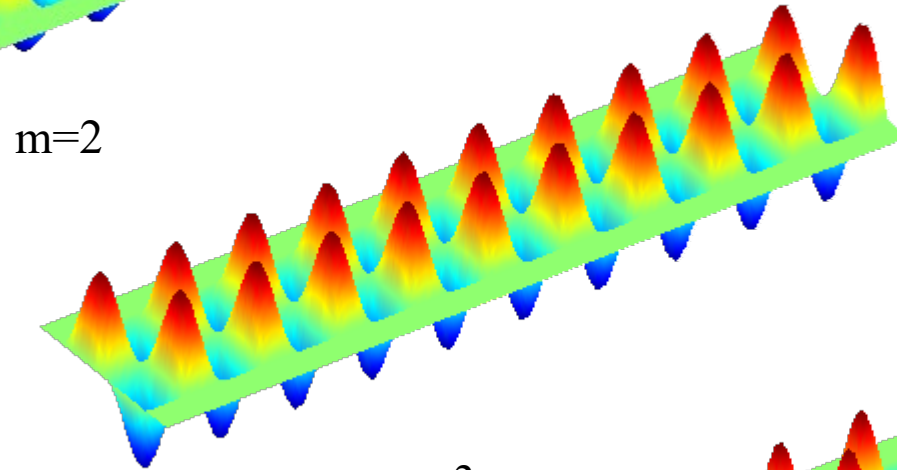
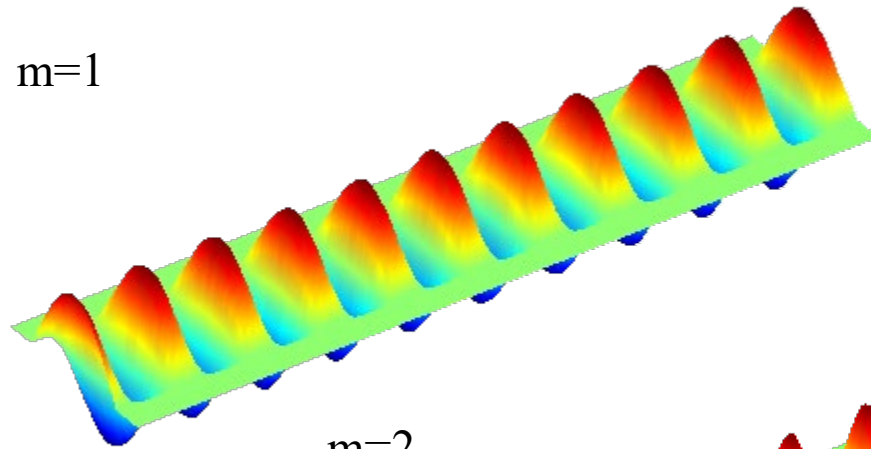
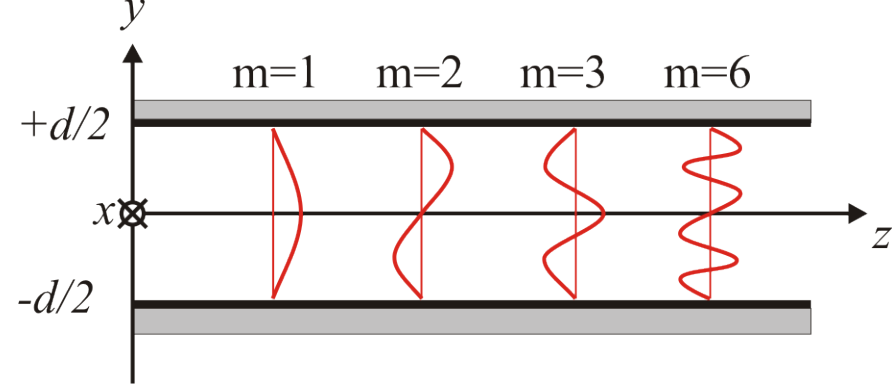


- Séparation des parties longitudinales  $z$  et transverses  $y$ :

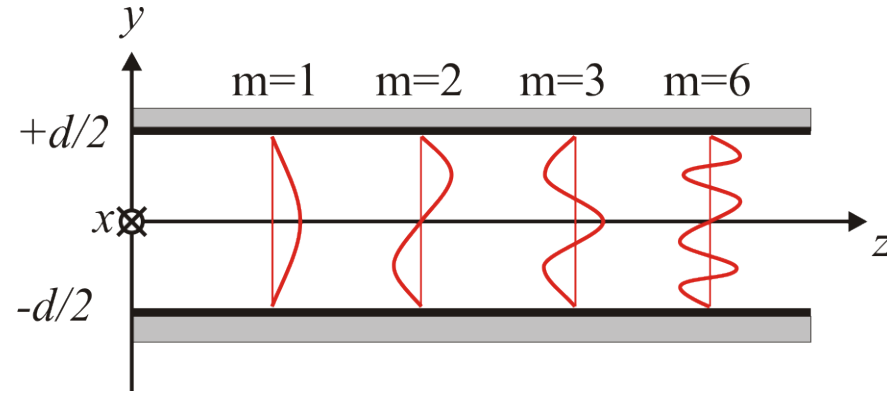
$$E_x(y, z) = a_m u_m(y) e^{-j\beta_m z}$$

- Mode fondamental ( $m=1$ )
- Modes d'ordres plus élevés:
  - L'angle de propagation et la complexité transverse augmentent
  - Symétrie:  $m$  impaire: mode symétrique ( $u_m(y) = u_m(-y)$ )  
 $m$  paire: mode antisymétrique ( $u_m(y) = -u_m(-y)$ )

# Modes guidés – Calcul de l'amplitude



## Modes guidés – Calcul de l'amplitude

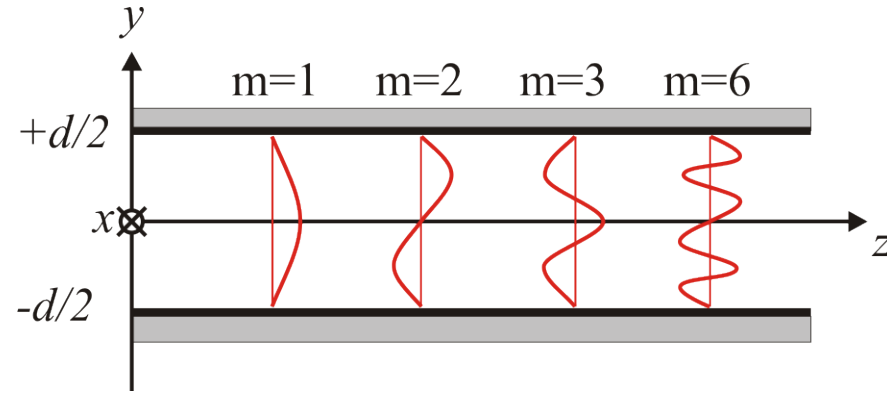


$$E_x(y, z) = a_m u_m(y) e^{-j\beta_m z}$$

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

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

## Fréquence de coupure



- Nombre de modes:  $M = \frac{2d}{\lambda}$
- si  $d \leq \lambda/2$  alors  $M = 0$
- Fréquence de coupure  $\nu_c = \frac{c}{2d}$
- Dépend de l'indice du milieu dont le guide est rempli

## Résumé d'un épisode précédent: Vitesse de groupe

- Comment définir la vitesse d'un pulse?
- Vitesse à laquelle l'information (l'enveloppe ou la modulation) est transmise:

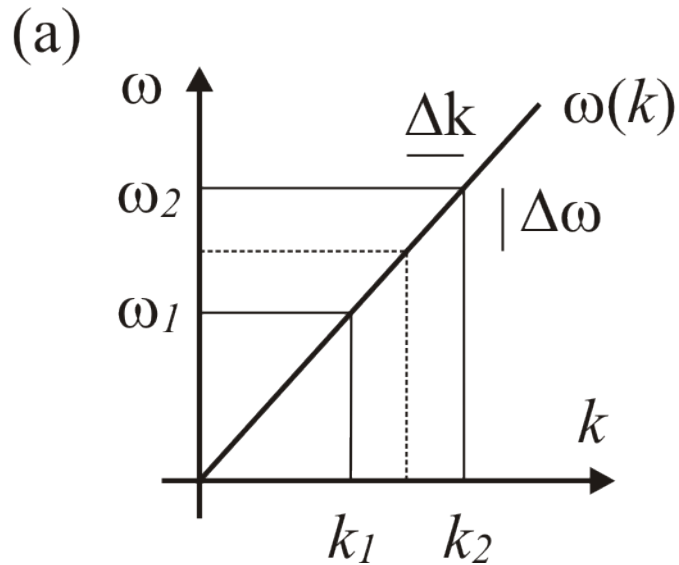
$$v = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

Vitesse  
de groupe

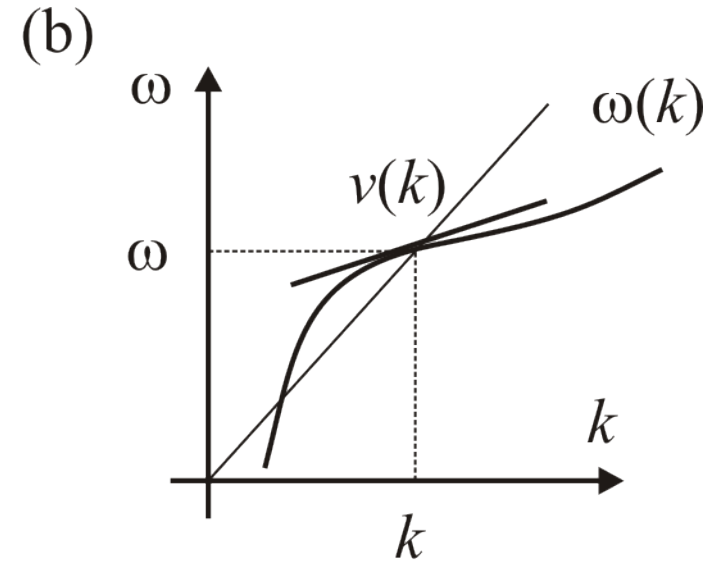
$$c = \frac{\omega}{k}$$

Vitesse  
de phase

**Milieu non dispersif:**

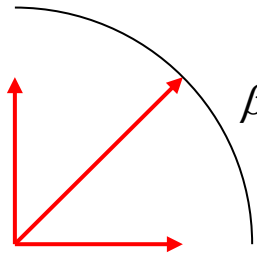
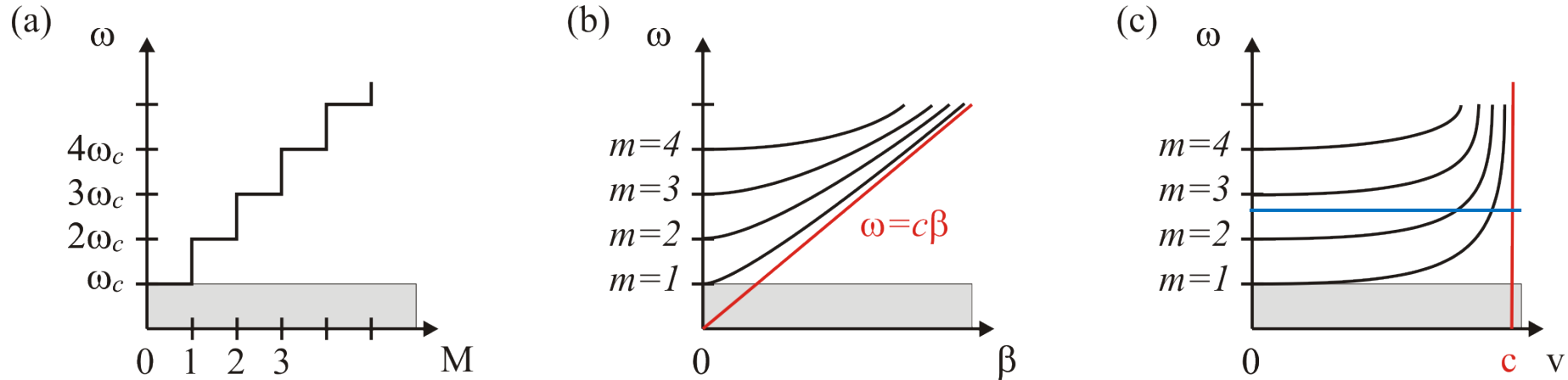


**Milieu dispersif:**



- Dans les milieux dispersifs, la vitesse de groupe est différente de la vitesse de phase, c'est aussi le cas pour les modes guidés!

# Nombre de modes, relation de dispersion, vitesse de groupe



$$\beta_m^2 + k_{ym}^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$$

$$\beta_m^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2 \pi^2}{d^2}$$

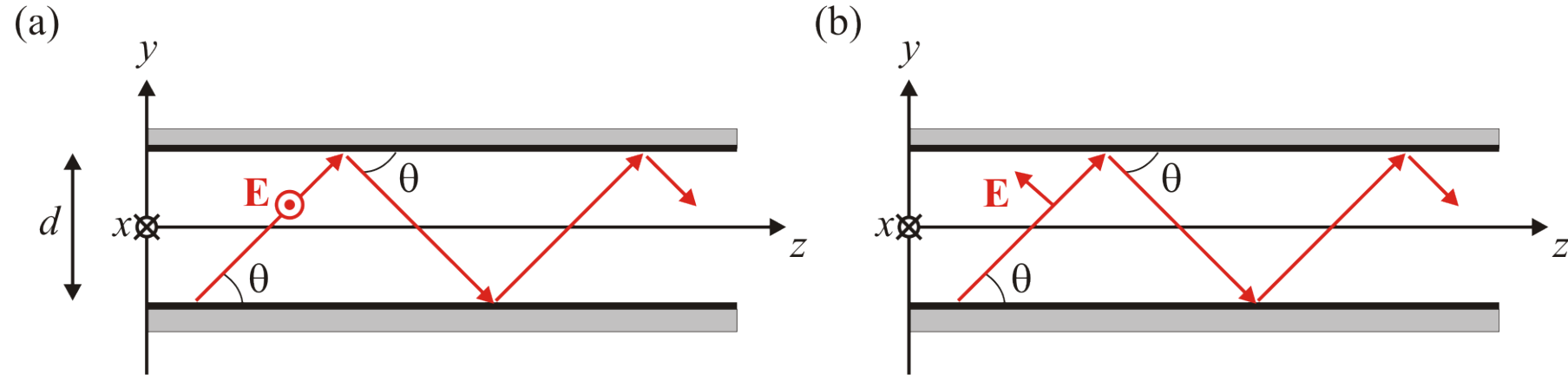
$$\beta_m = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - m^2 \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}$$

- La vitesse de groupe est différente pour chaque mode:

$$v_m = d\omega/d\beta_m \quad v_m = \frac{c^2 \beta_m}{\omega} = c \sqrt{1 - m^2 \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}$$

- $v_m$  diminue lorsque le numéro du mode augmente (à fréquence fixe)
- Limitation de la bande passante d'un guide multimode!

## Modes TM



- En composantes:

$$E_z(y, z) = \begin{cases} a_m \sqrt{\frac{2}{d}} \cos\left(m\pi \frac{y}{d}\right) e^{-j\beta_m z}, & m = 1, 3, 5, \dots \\ a_m \sqrt{\frac{2}{d}} \sin\left(m\pi \frac{y}{d}\right) e^{-j\beta_m z}, & m = 2, 4, 6, \dots, \end{cases}$$

$$E_y(y, z) = \begin{cases} a_m \sqrt{\frac{2}{d}} \cot \theta_m \cos\left(m\pi \frac{y}{d}\right) e^{-j\beta_m z}, & m = 1, 3, 5, \dots \\ a_m \sqrt{\frac{2}{d}} \cot \theta_m \sin\left(m\pi \frac{y}{d}\right) e^{-j\beta_m z}, & m = 2, 4, 6, \dots, \end{cases}$$

avec  $a_m = \sqrt{2d}A_m$  pour  $m$  impaire et  $a_m = j\sqrt{2d}A_m$  pour  $m$  paire.

# Ingénierie optique

---

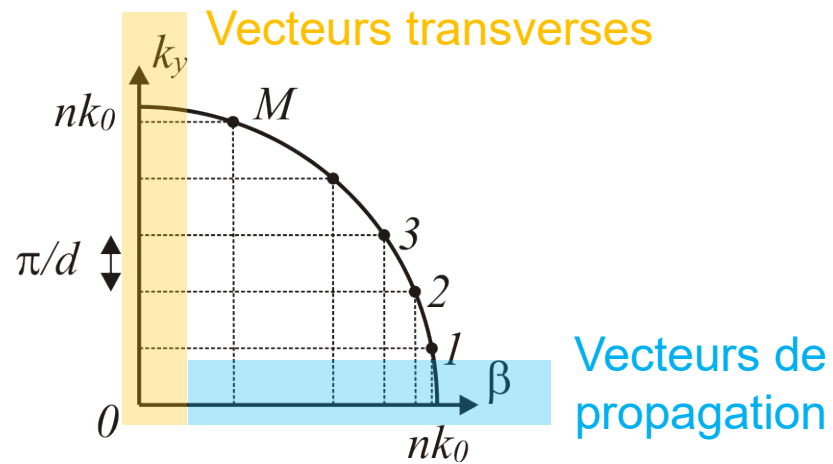
## Semaine 9 – partie 2

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



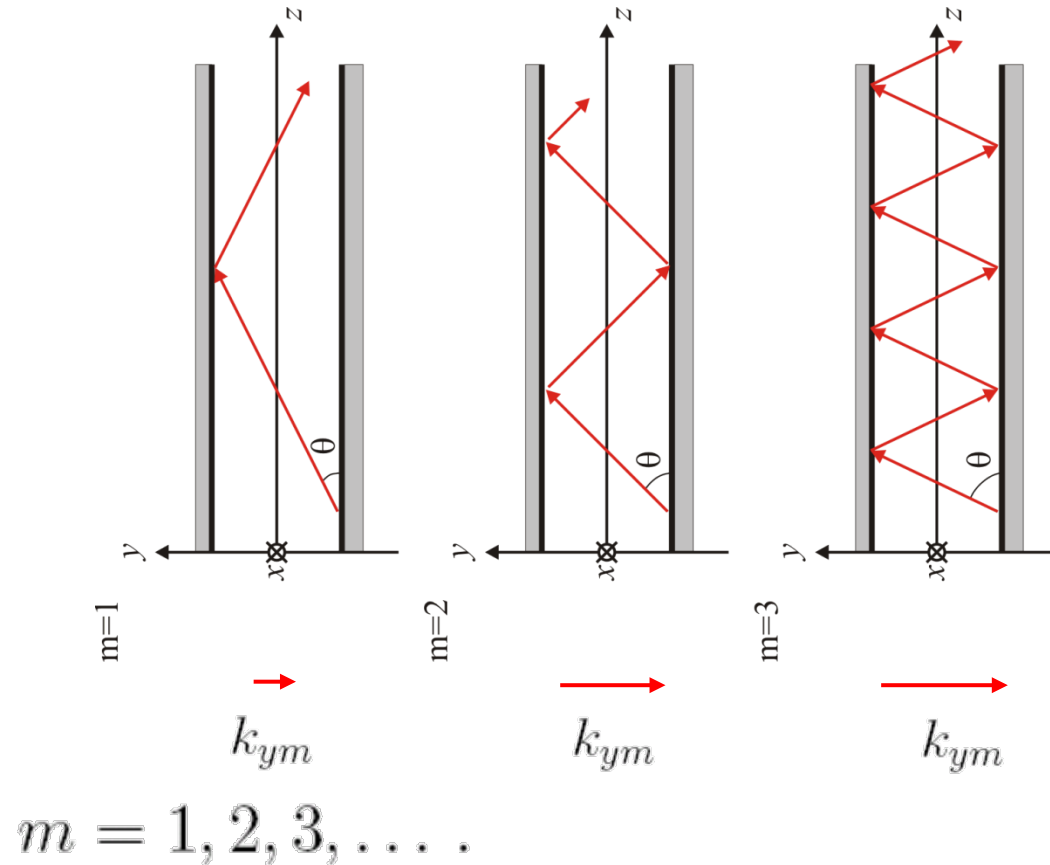
# Guide d'onde miroir (guide 1D)

- Les modes zig-zagent dans le plan  $y - z$  :



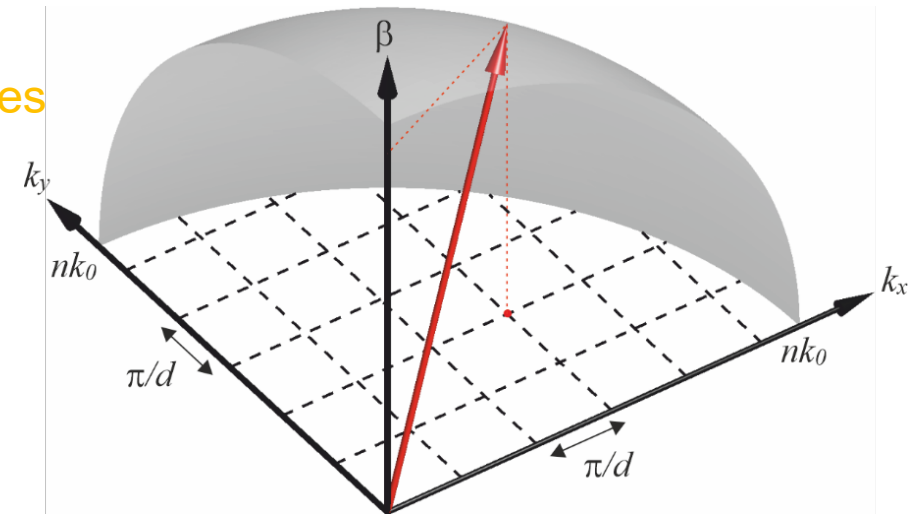
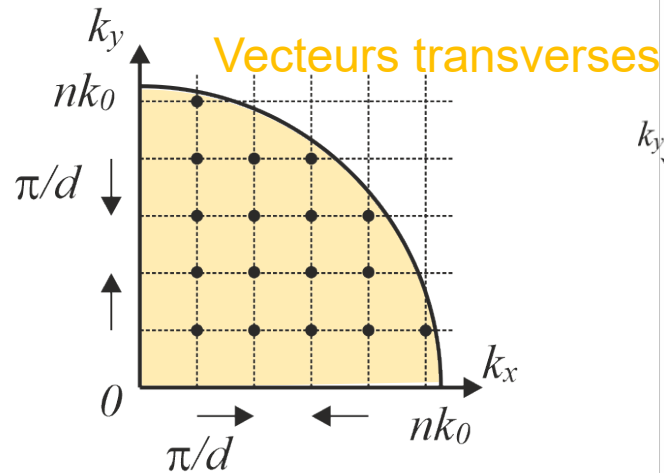
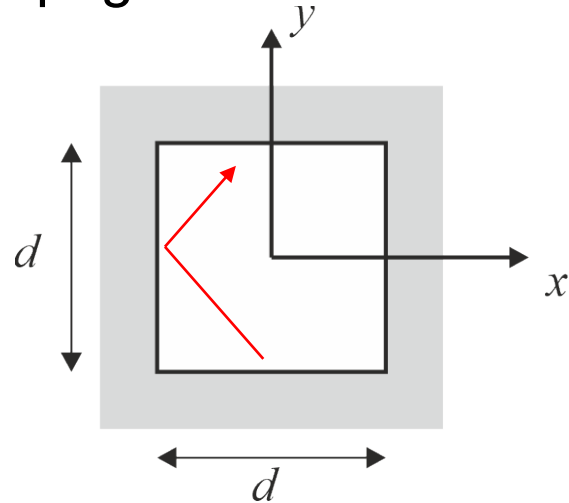
$$\beta_m^2 = k^2 - \frac{m^2 \pi^2}{d^2},$$

$$n^2 k_0^2 = \frac{n^2 \omega^2}{c_0^2}$$



## Guide d'onde miroir carré (guide 2D)

- Les modes zig-zaguent dans les deux dimensions transverses  $x - y$ , tout en se propageant dans la direction  $z$



- La démarche est la même, mais avec deux composantes transverses:

$$\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z) = (k_x, k_y, \beta)$$

$$k_x^2 + k_y^2 + \beta^2 = n^2 k_0^2 = \frac{n^2 \omega^2}{c_0^2}$$

$$2k_x d = 2\pi m_x,$$

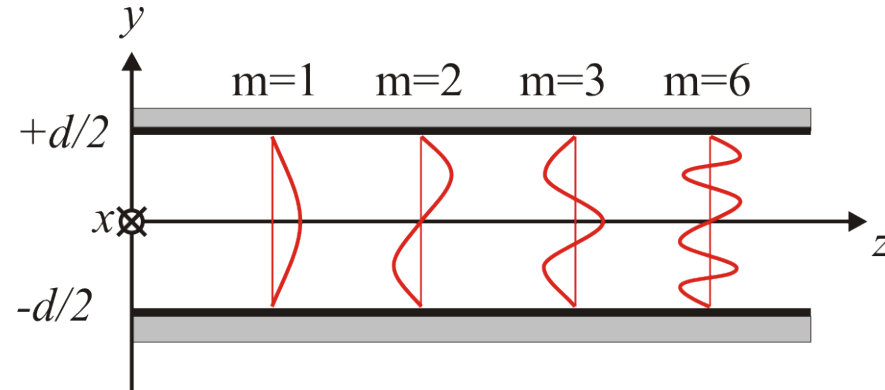
$$m_x = 1, 2, 3, \dots$$

$$2k_y d = 2\pi m_y,$$

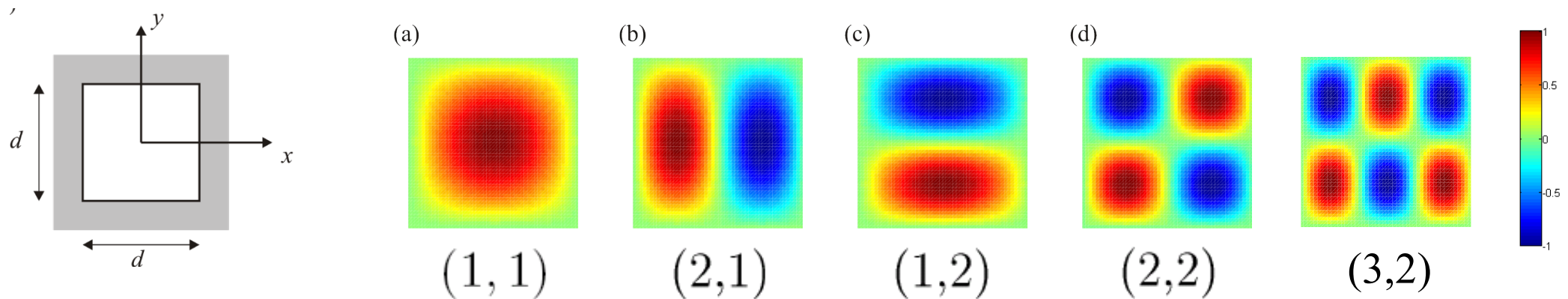
$$m_y = 1, 2, 3, \dots$$

## Guide d'onde miroir carré (guide 2D)

- On peut voir les modes 2D comme le produit de deux modes 1D:

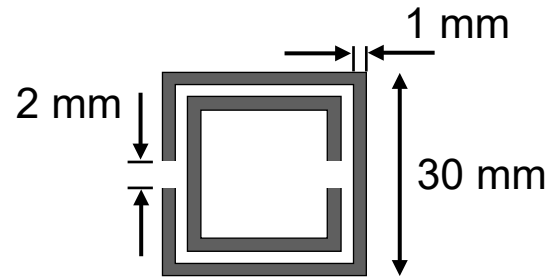


- Les modes 2D sont caractérisés par les indices  $(l, m)$

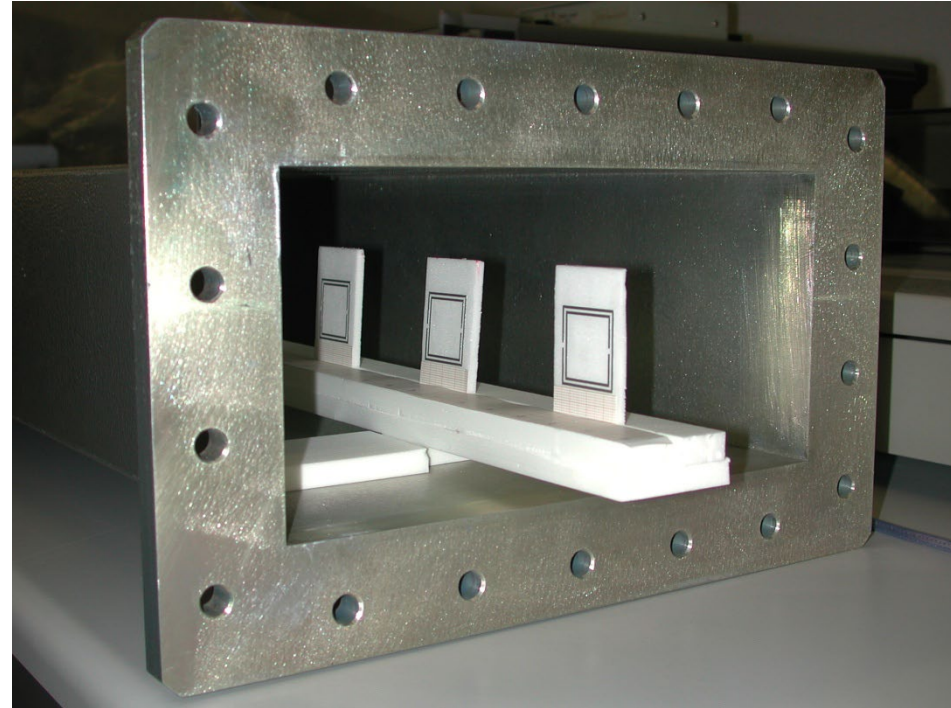
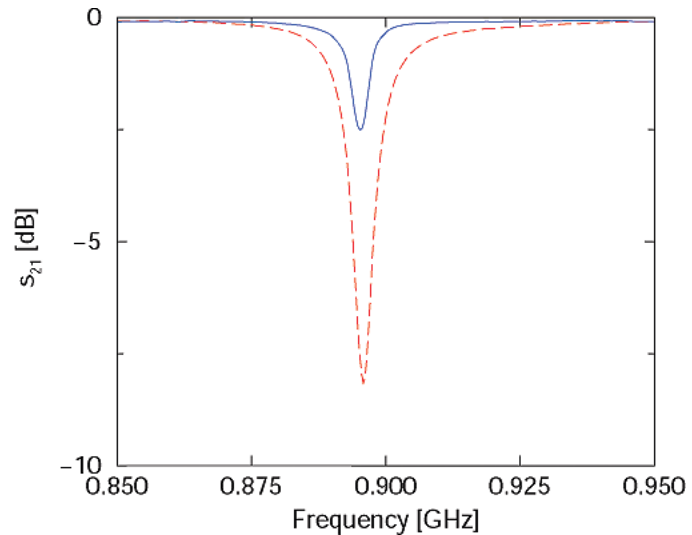


## Guide d'onde miroir rectangulaire (guide 2D)

- Très utilisé pour les fréquences micro-onde:



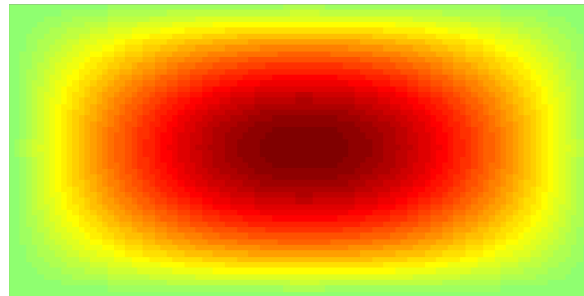
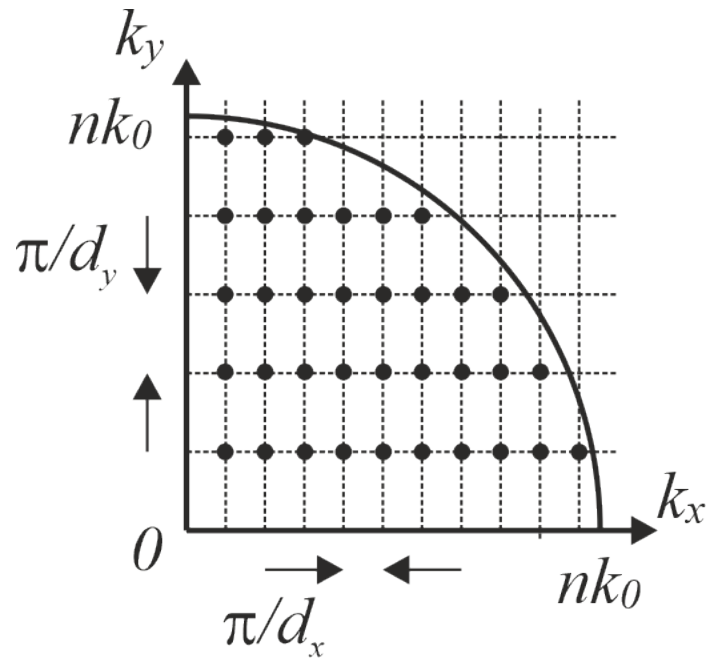
- 5  $\mu\text{m}$  thick Al foil
- Rohacell substrate ( $\epsilon=1.07$ )



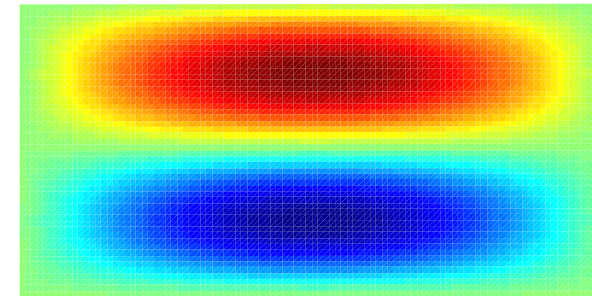
- SRRs in R9 waveguide,  $\text{TE}_{10}$  excitation:

## Guide d'onde miroir rectangulaire (guide 2D)

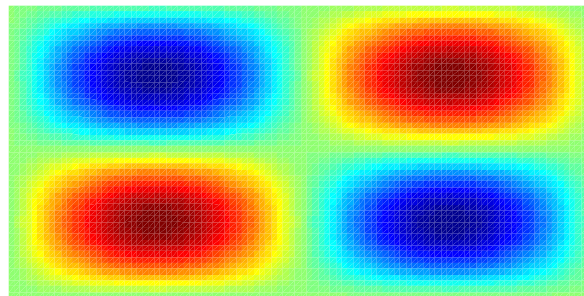
- Le principe reste le même avec les produits de modes 1D différents, selon les largeurs différentes du guide dans chaque direction:



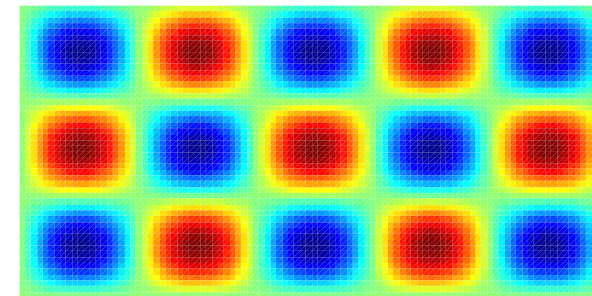
(1,1)



(1,2)



(2,2)



(5,3)

# Ingénierie optique

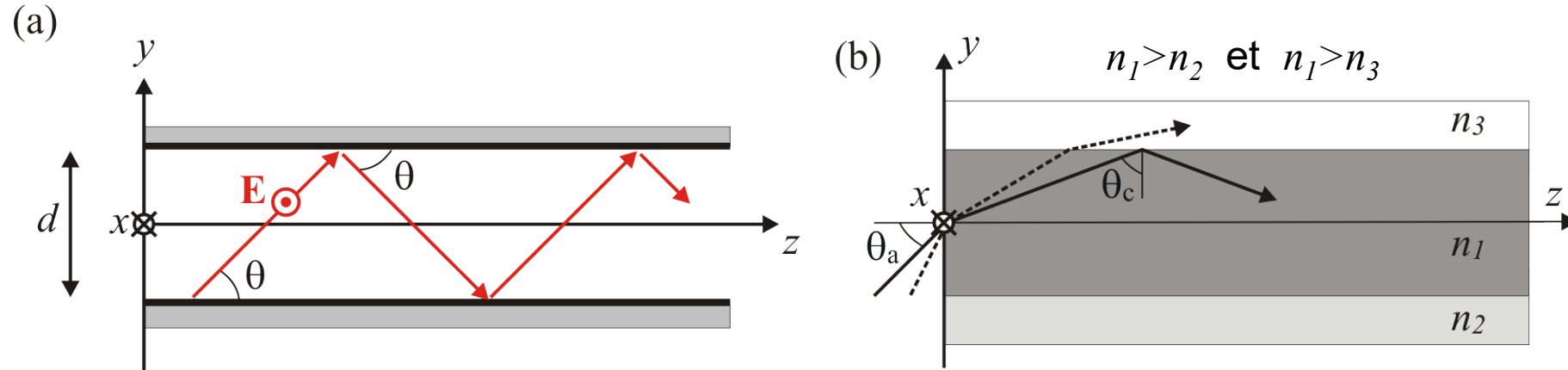
---

## Semaine 9 – partie 3

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



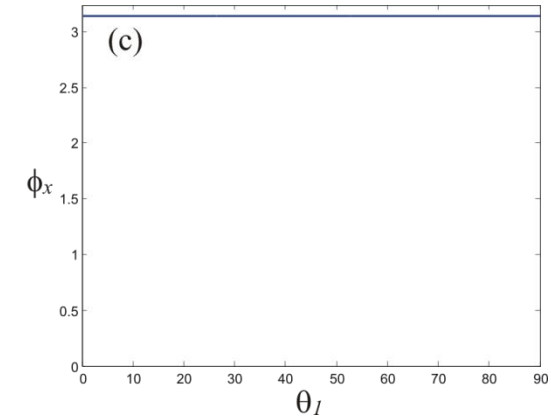
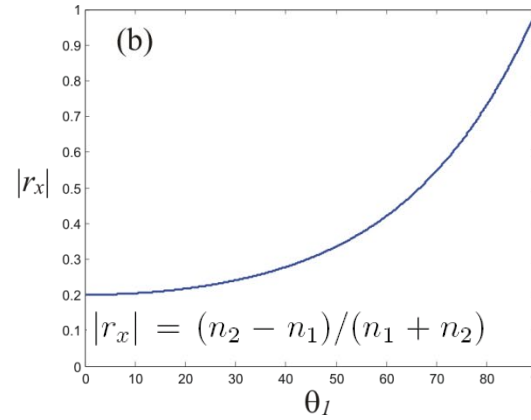
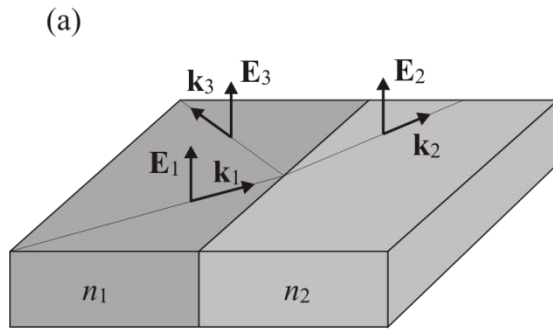
## Guides miroirs → guides diélectriques



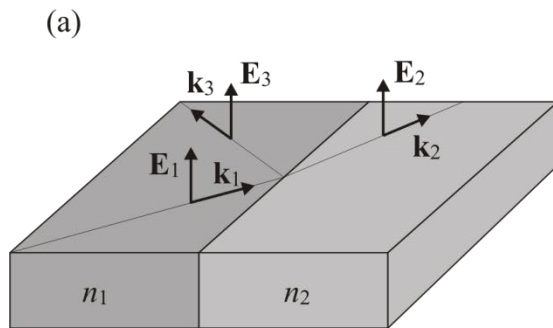
- Un miroir parfait est très difficile à réaliser à large échelle aux fréquences optiques
- Il est par contre possible de déposer des couches diélectriques avec une précision quasi-atomique → guide diélectrique
- Le guidage se fait alors par réflexion interne totale
- Il existe des configurations symétriques ( $n_2 = n_3$ ) ou asymétriques ( $n_2 \neq n_3$ )
- Il existe un angle limite d'entrée dans le guide  $\theta_a$  au-delà duquel les rayons ne se propagent pas (on parle aussi ici d'ouverture numérique, NA en anglais)

# Coefficients de Fresnel – Champ TE

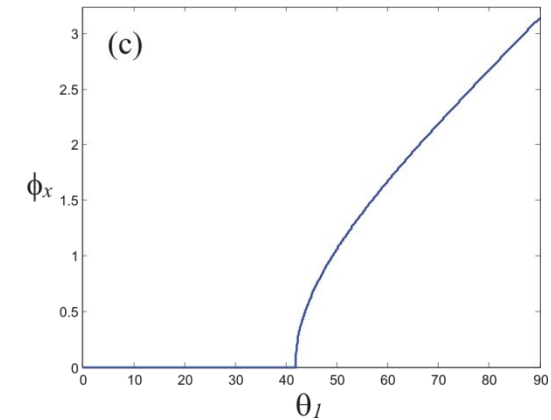
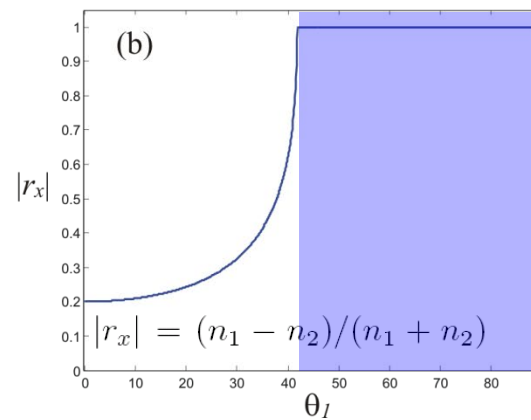
- Réflexion externe ( $n_1 < n_2$ )



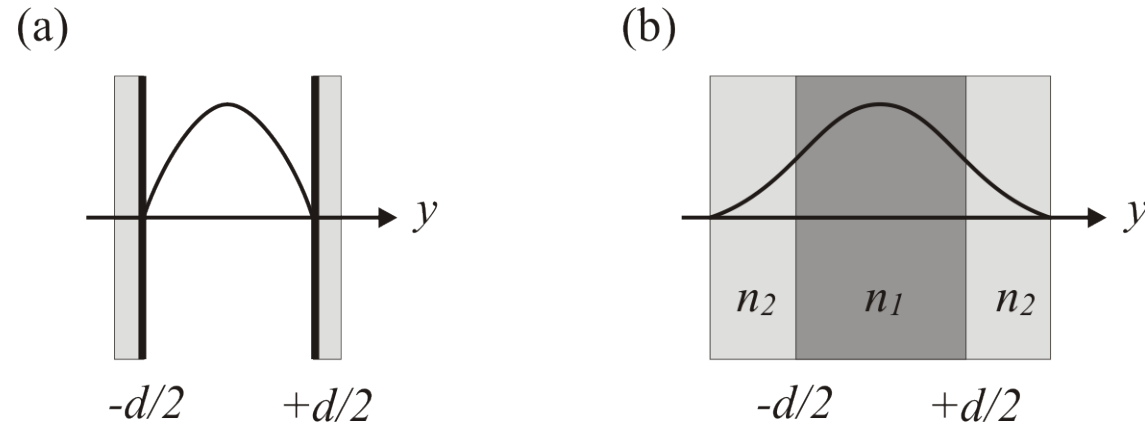
- Réflexion interne ( $n_1 > n_2$ )



angles possibles



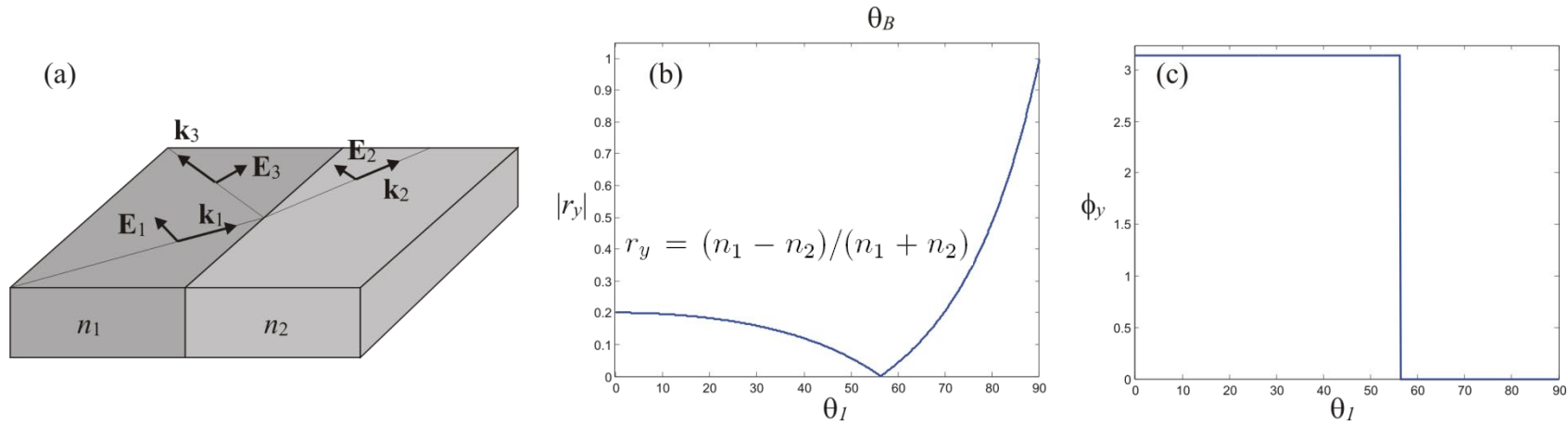
## Guides miroirs – guides diélectriques



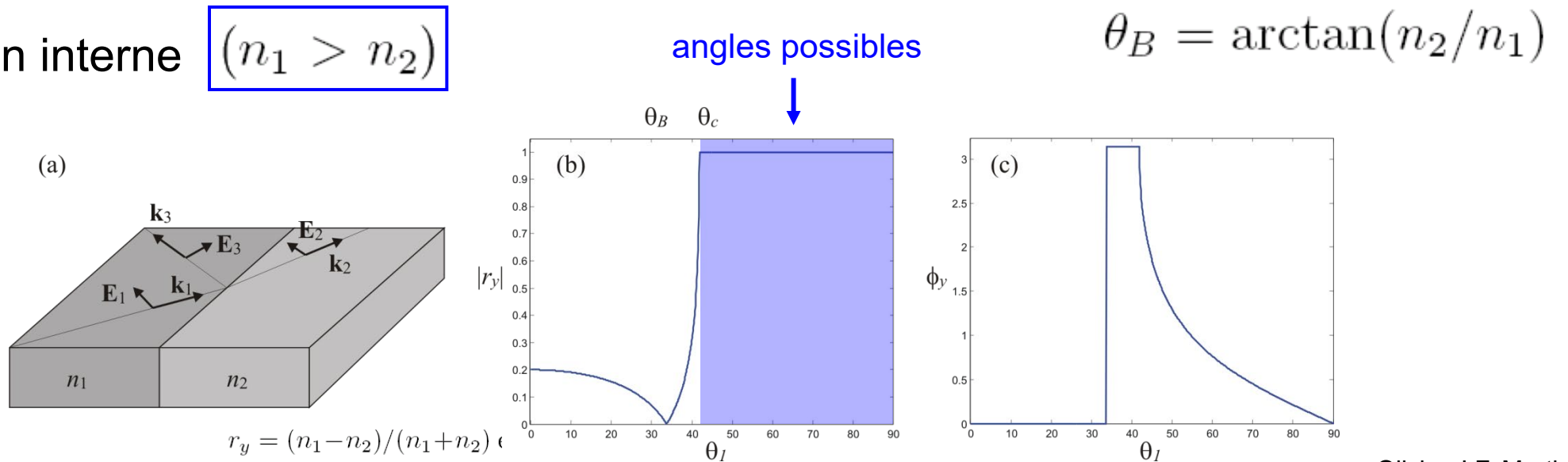
- Comme pour le guide miroir les conditions d'interfaces déterminent les modes
- Dans le cas du guide miroir:
  - le champ s'annule au bord du guide
- Dans le cas du guide diélectrique:
  - le champ s'annule à l'infini
  - continuité de certaines composantes du champ électromagnétique:
    - $E$  parallèle aux interfaces et  $D$  perpendiculaire aux interfaces

# Coefficients de Fresnel – Champ TM

- Réflexion externe ( $n_1 < n_2$ )



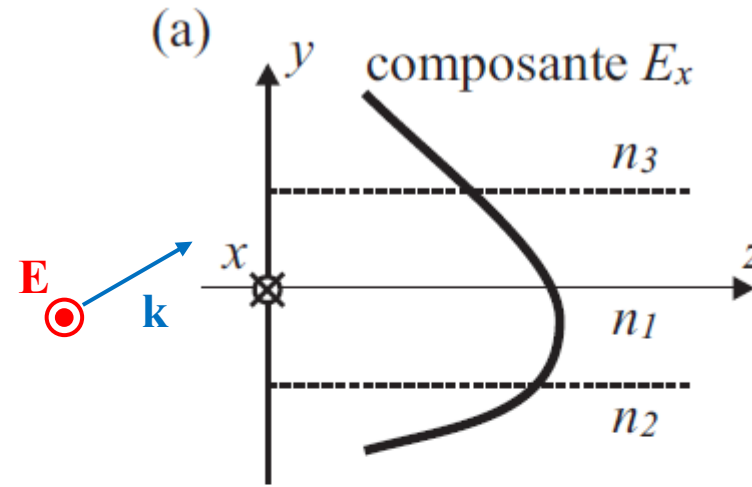
- Réflexion interne ( $n_1 > n_2$ )



# Guides diélectriques

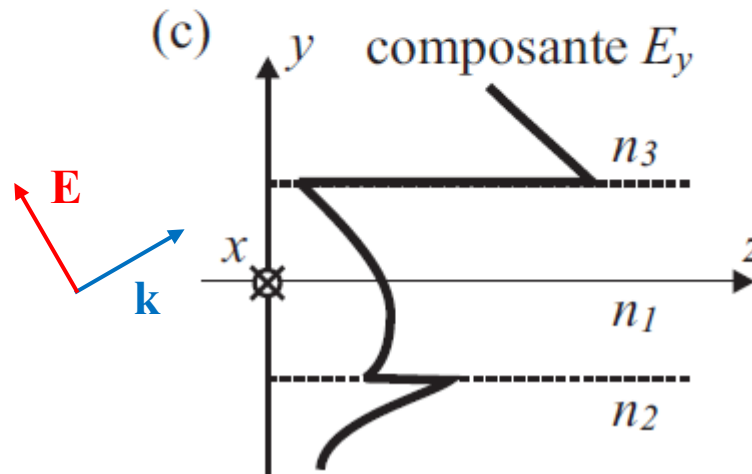
- Conditions d'interface imposées par les équations de Maxwell:

- Modes TE:
  - seulement composante  $E_x$



La composante  $E_x$  est continue

- Modes TM:
  - composante  $E_y$  dominante
  - petite composante  $E_z$

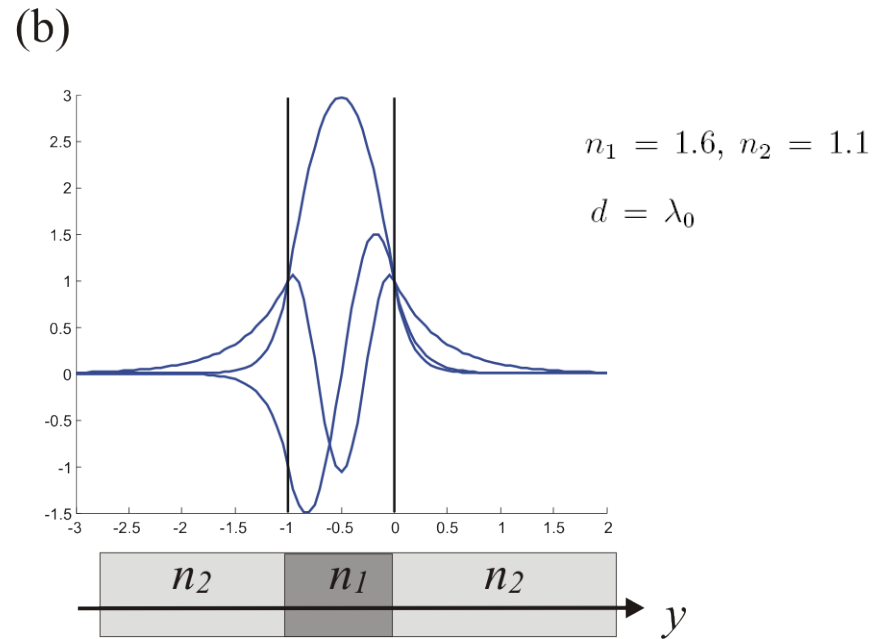
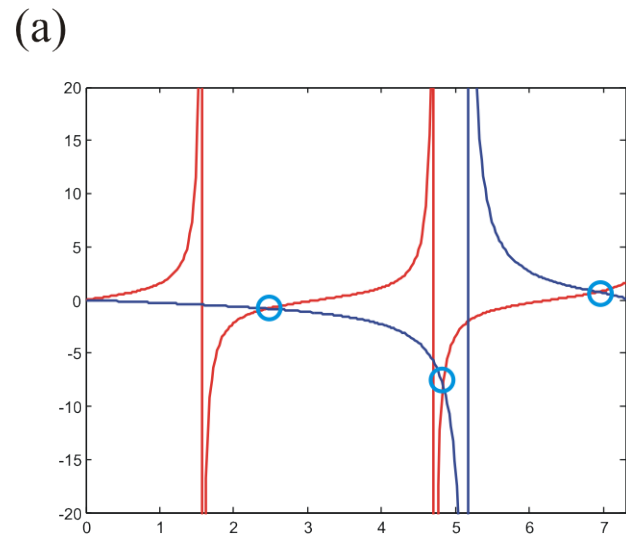


La composante  $E_y$  n'est pas continue:

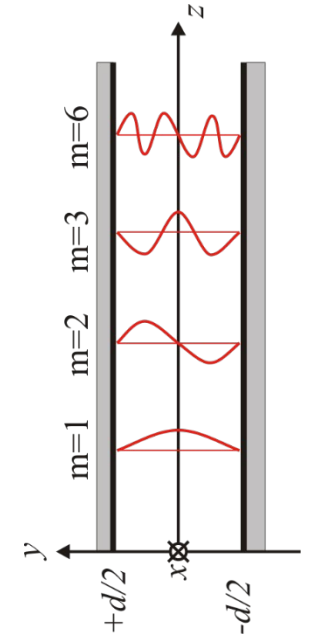
$$\begin{aligned} \epsilon_1 E_{1,y} &= \epsilon_2 E_{2,y} \\ n_1^2 E_{1,y} &= n_2^2 E_{2,y} \end{aligned}$$

La composante  $E_z$  est continue

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



Similitudes avec les modes du guide miroir – sauf au bord:



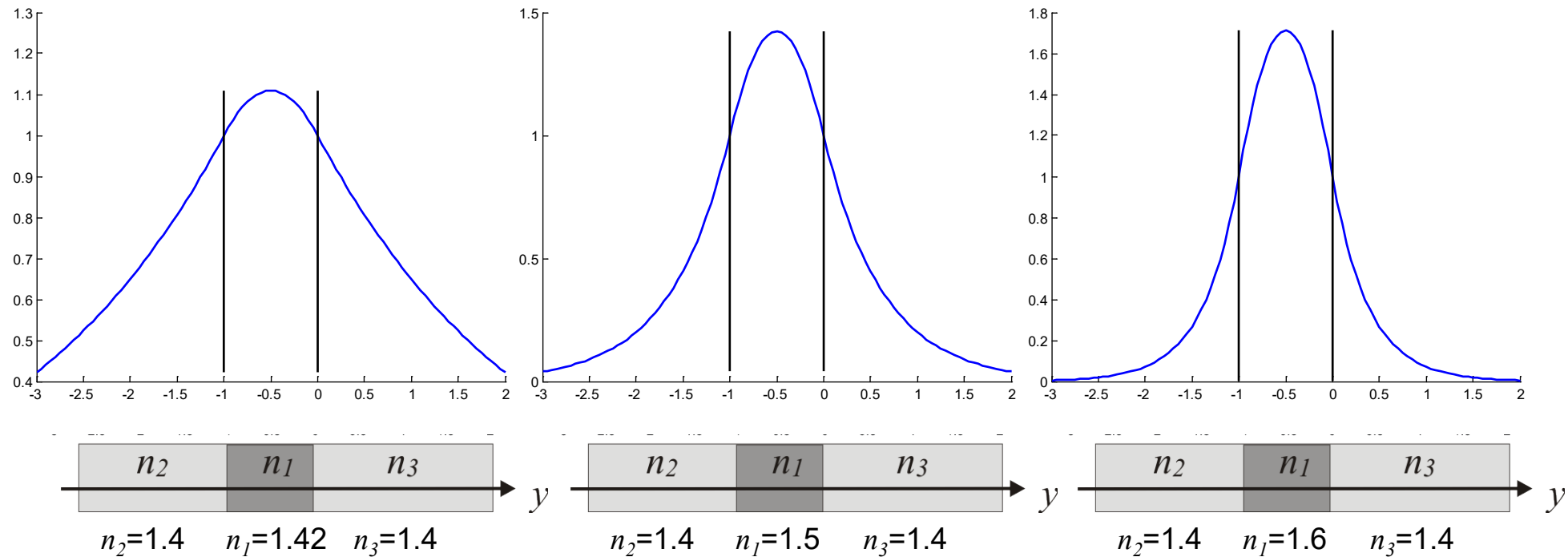
- Les modes doivent satisfaire une équation transcendante de la forme

$$\arctan \beta = \frac{1}{\sqrt{(\beta - \gamma)}}$$

- Résolution numérique seulement → détermination du vecteur de propagation  $\beta$  et de la forme du champ en résolvant une équation transcendante

## Guides diélectriques plans (guide 1D) – Profile du champ

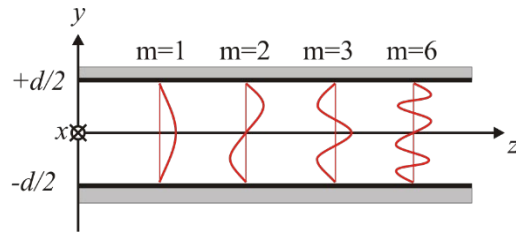
- Pour un guide symétrique, il existe toujours un mode TE



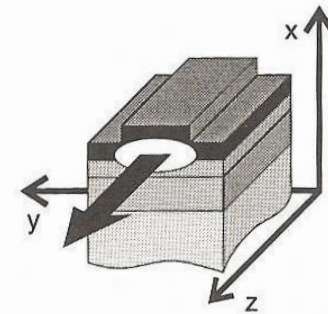
- Le nombre de modes augmente avec l'épaisseur du guide ou avec le contraste d'indice
- La lumière est toujours guidée dans la région d'indice élevé

## Guides diélectriques 2D

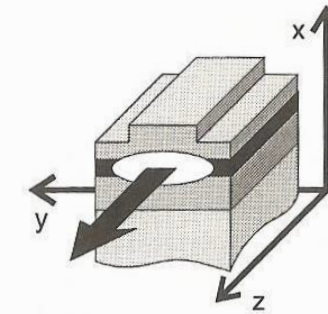
- Jusqu'à présent, nous avons considéré des guides diélectriques qui ne confinent la lumière que dans une seule direction (guide 1D):



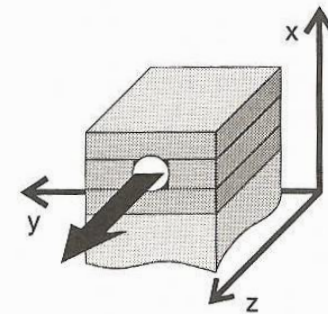
- Pour un guide diélectrique 2D, le principe est toujours le même: on crée un région d'indice élevé, dans laquelle la lumière est guidée
- Des géométries variées existent qui permettent un confinement de la lumière dans les deux directions transverses et sa propagation dans la troisième direction



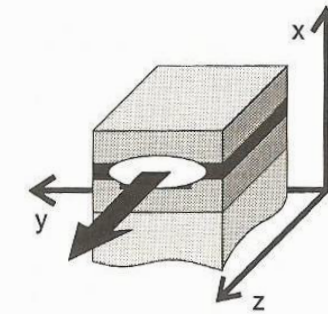
Rib waveguide



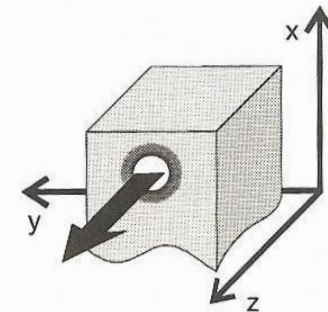
Strip-loaded waveguide



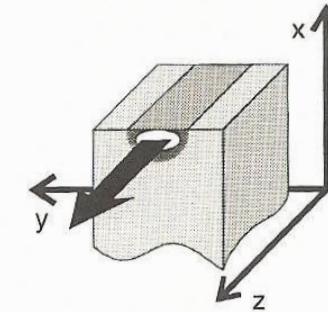
Buried-strip waveguide



Buried-rib waveguide



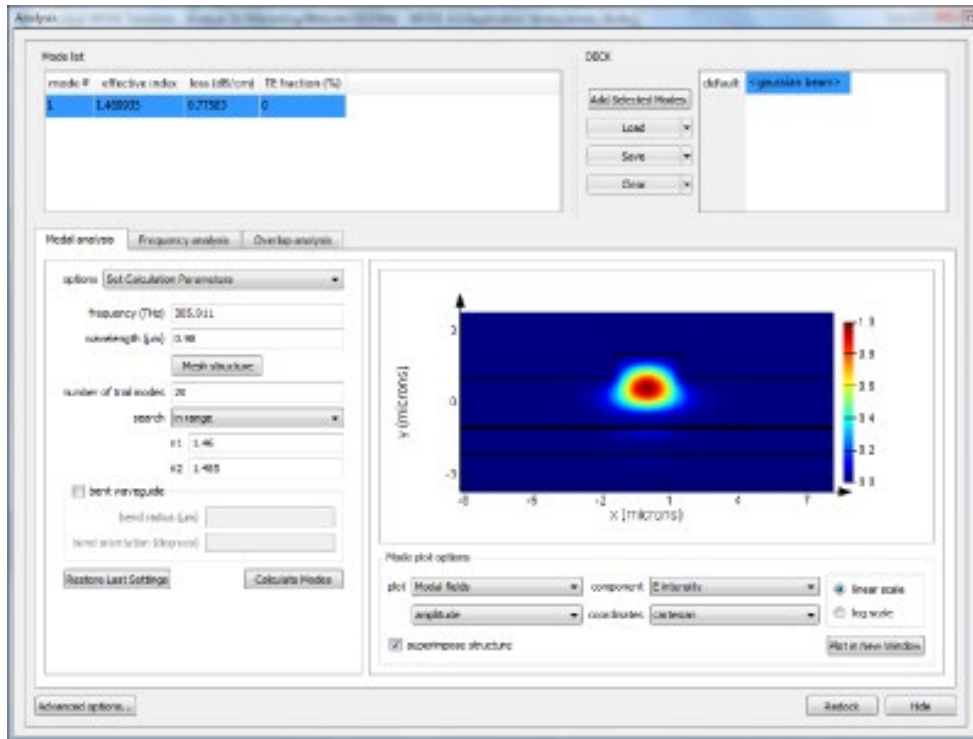
Buried diffused waveguide



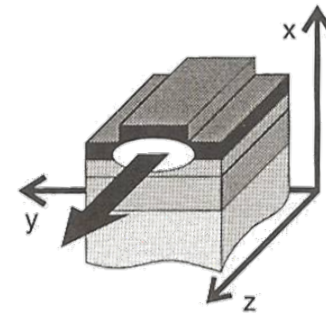
Diffused waveguide

## Guides diélectriques 2D

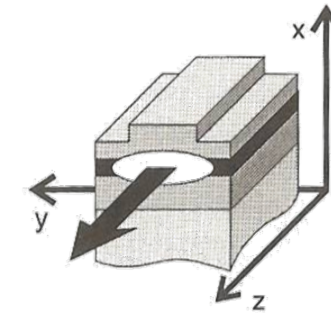
- On ne peut plus calculer les modes (semi)-analytiquement, il faut utiliser des méthodes numériques basées sur un maillage en éléments finis ou en différences finies de la section du guide:



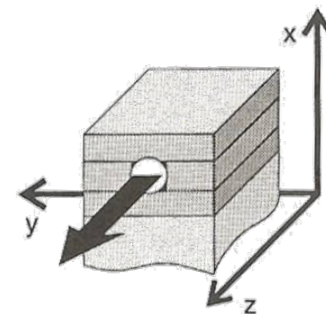
www.lumerical.com



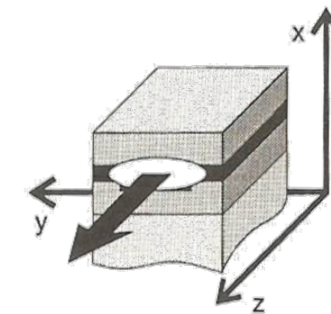
Rib waveguide



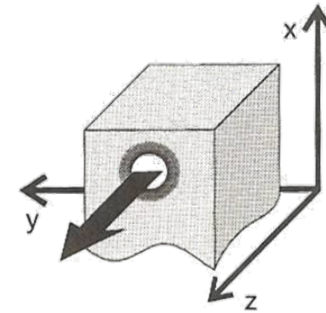
Strip-loaded waveguide



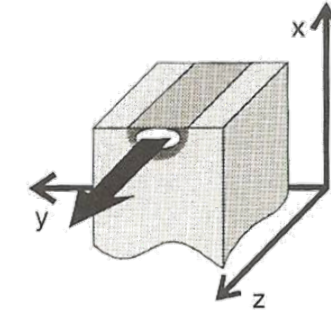
Buried-strip waveguide



Buried-rib waveguide



Buried diffused waveguide



Diffused waveguide

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

# Ingénierie optique

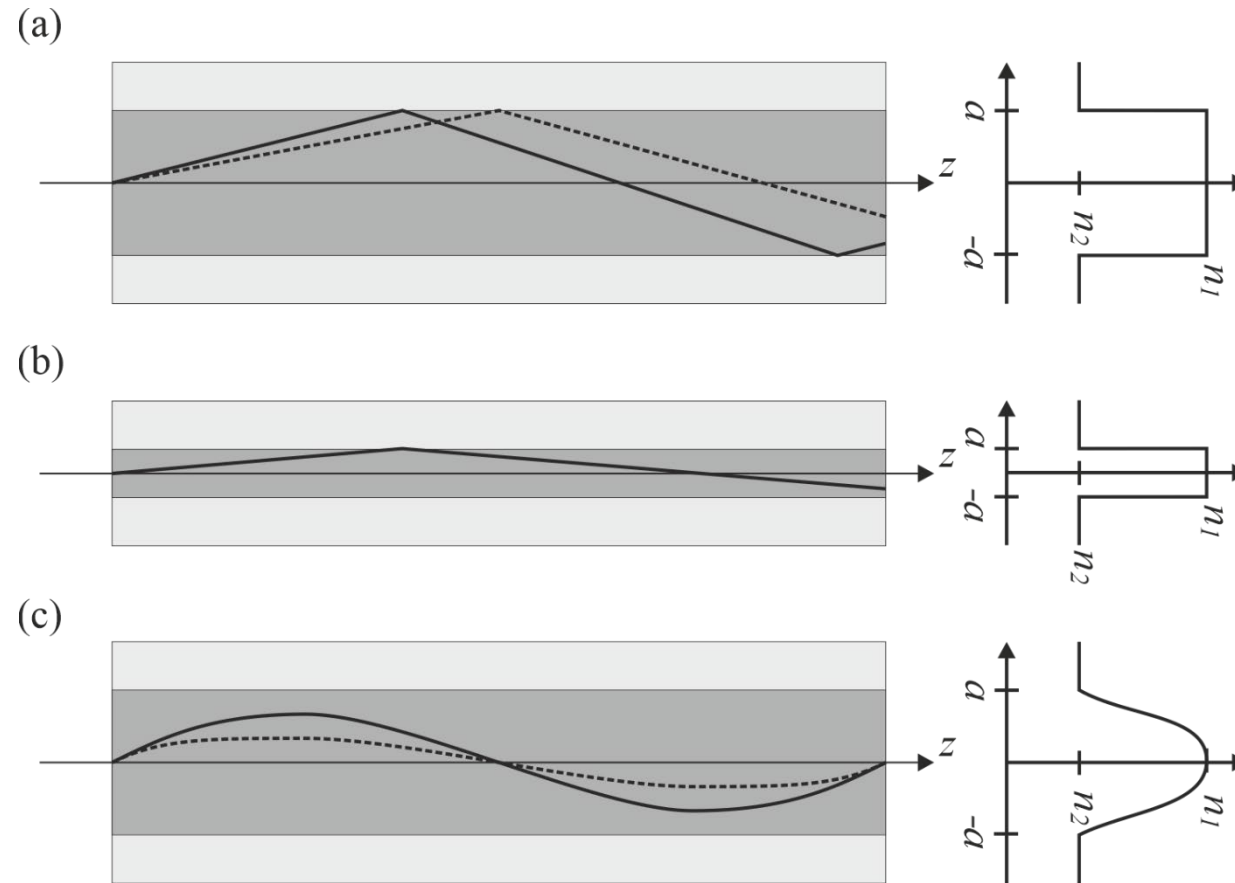
---

## Semaine 9 – partie 4

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

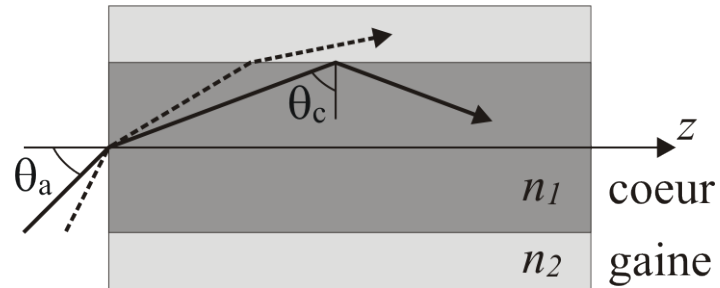


# Fibres optiques



- 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



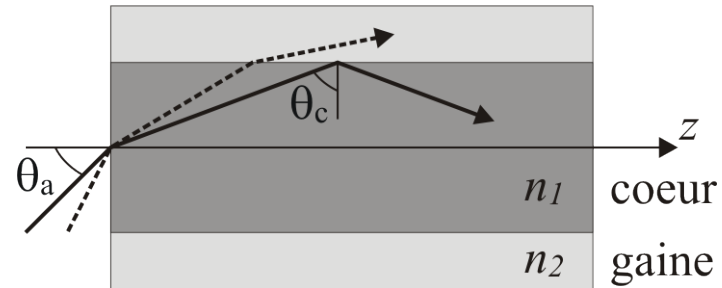
- Comme pour le guide diélectrique, propagation par réflexion totale interne
- Les ondes incidentes avec  $\theta > \theta_a$  ne sont pas guidées dans la fibre
- Angle d'acceptance:

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

- 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  $NA \simeq n_1 \sqrt{2\Delta}$

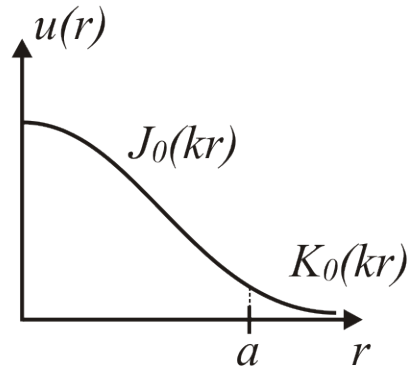
- Fréquence normalisée de la fibre ( *fibre parameter*):

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

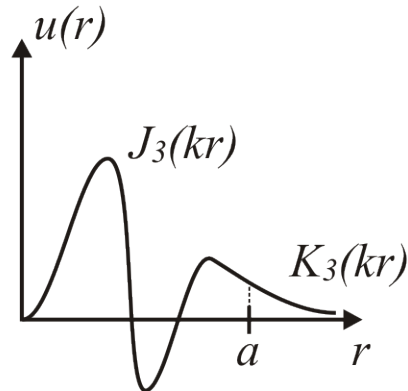
- Permet de caractériser le nombre de modes de la fibre

## Fibres optiques – Profile du champ des modes

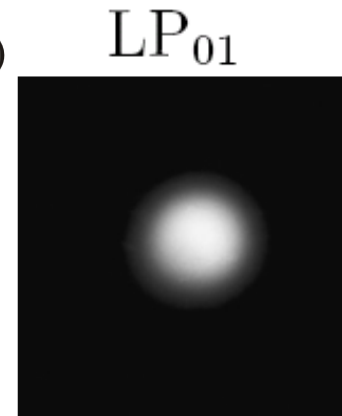
(a)



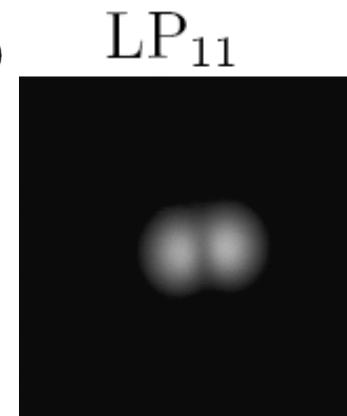
(b)



(c)



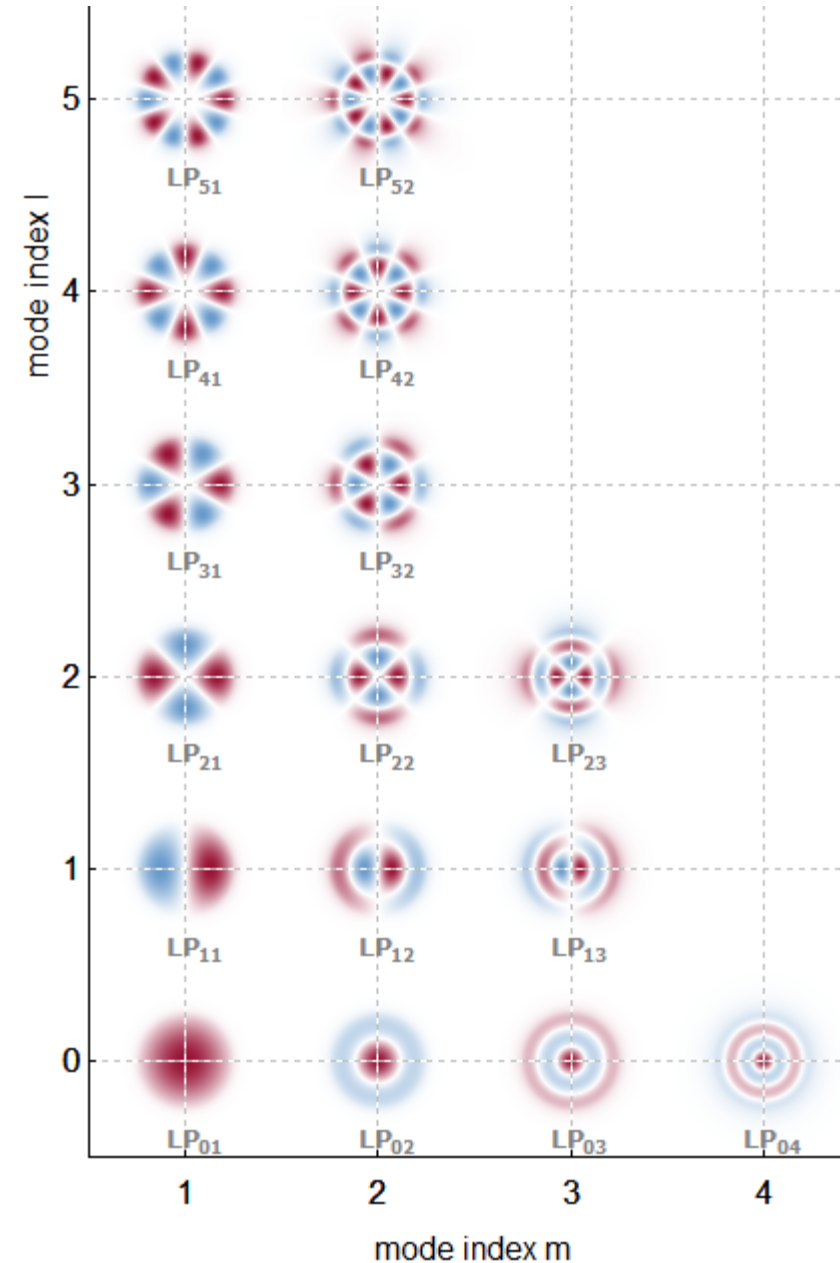
(d)



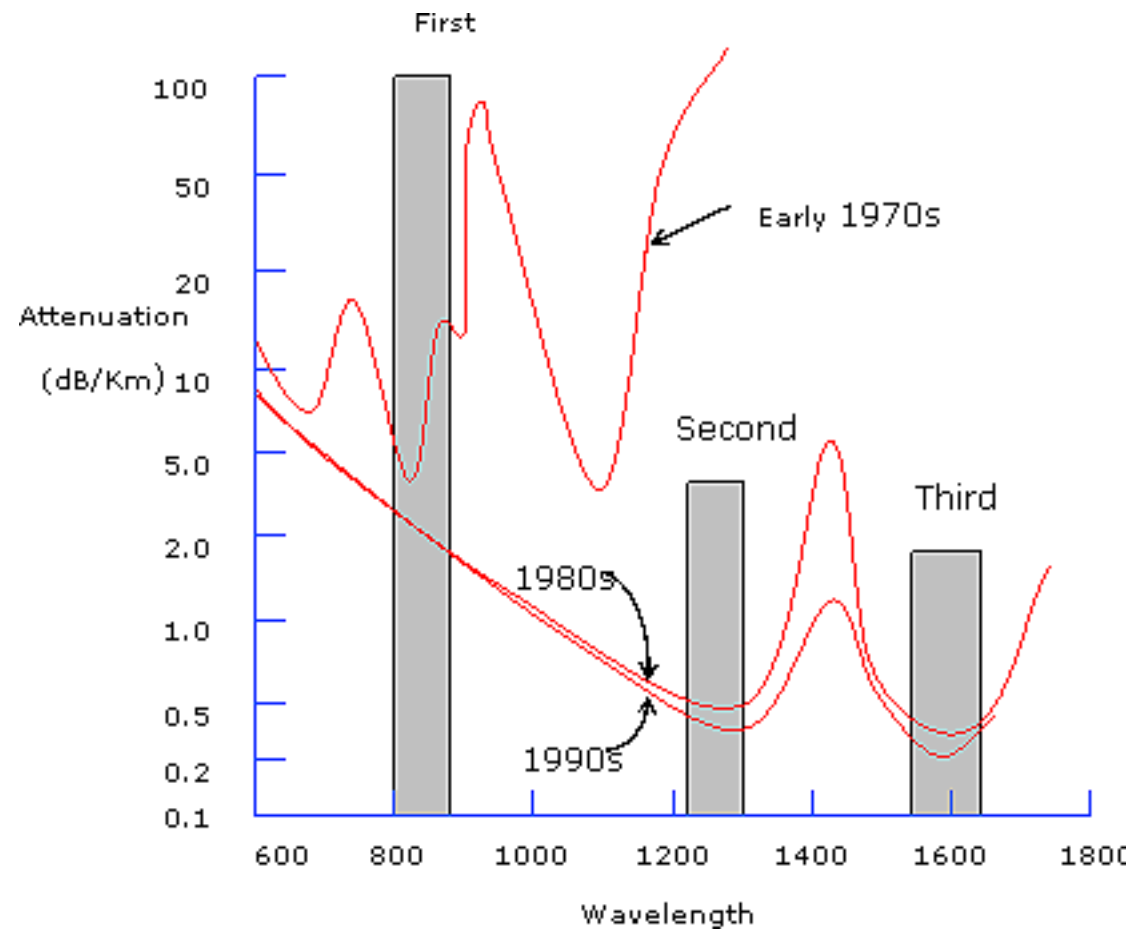
- On fait un calcul en coordonnées cylindriques
- Il n'existe pas de modes purement TE ou TM pour une fibre optique (il existe toujours une petite composante longitudinale)
- Il cependant existe des modes avec une dominante de polarisation linéaire (en anglais *linearly polarized*): LP<sub>lm</sub>
- 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:

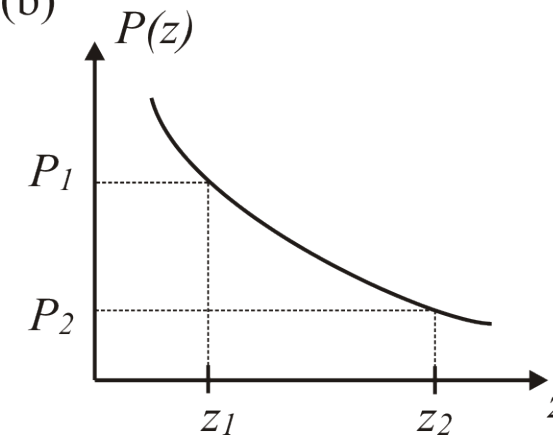
$$\lambda_0 \simeq 850 \text{ nm}, 1.3 \mu\text{m} \text{ et } 1.55 \mu\text{m}.$$

# 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:

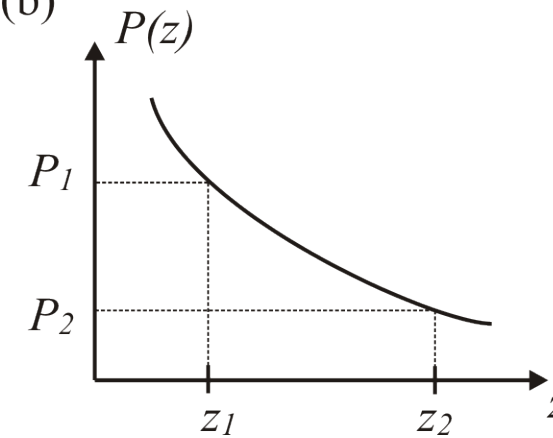
$$\alpha_{\text{dB}} = \frac{10 \log(P_1/P_2)}{z_2 - z_1}; \quad P_2 = P_1 10^{-\alpha_{\text{dB}}(z_2 - z_1)/10}$$

# Atténuation dans les fibres optiques

(a)



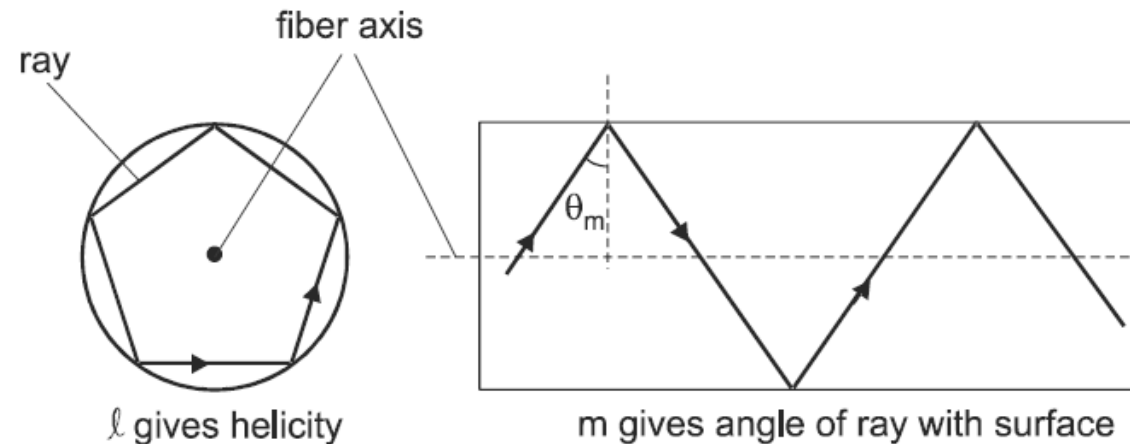
(b)



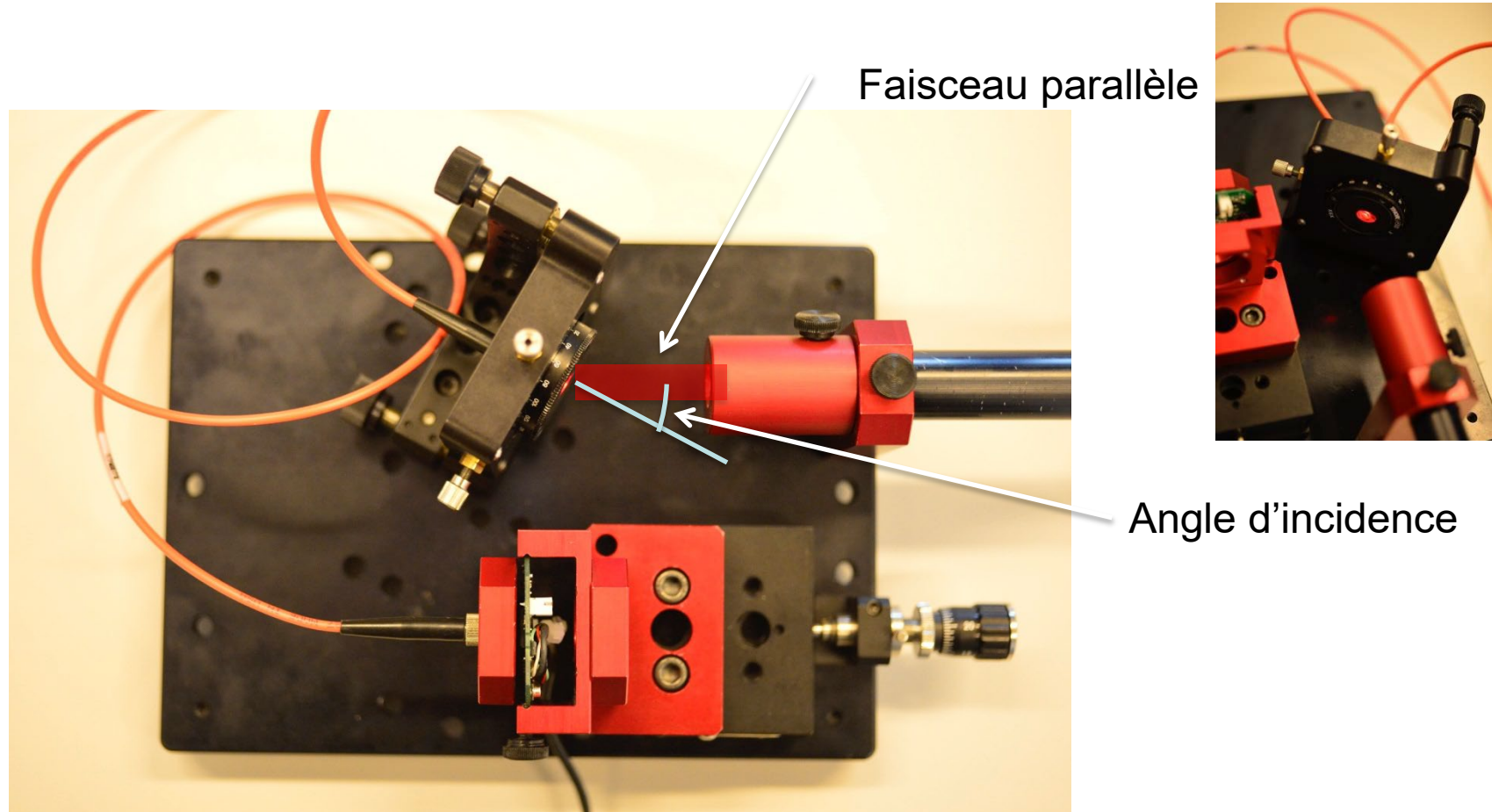
- Origine de l'atténuation:
  - diffusion de Rayleigh  $\alpha = \frac{A_0}{\lambda_0^4}$
  - Absorption par l'eau (liaisons  $\text{O-H}^-$  et liaisons entre  $\text{OH}^-$  et  $\text{SiO}_2$  )
  - Absorption par les métaux (quelques ppm suffisent!)
- Valeurs typiques de l'atténuation: 0.2-0.4 dB/km

## 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

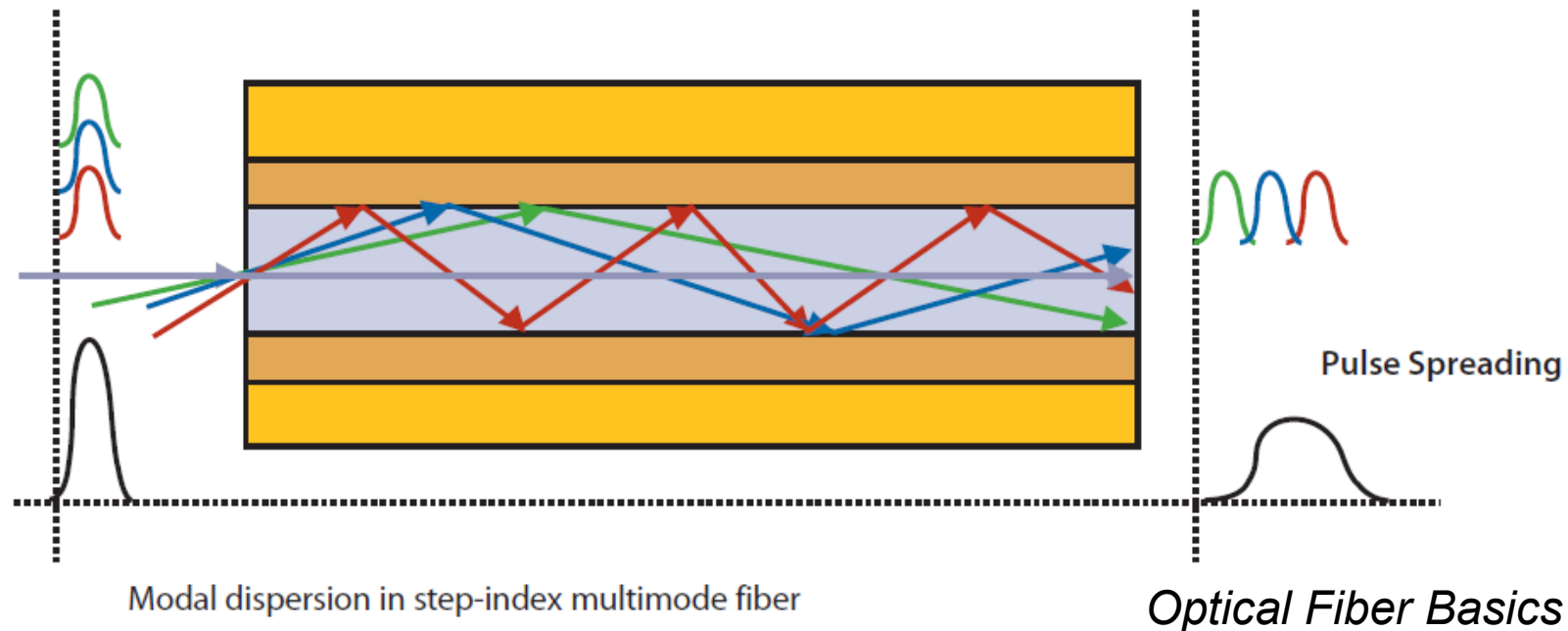


# Propagation des rayons dans une fibre multimode



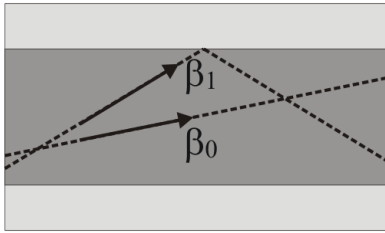
## Dispersion

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

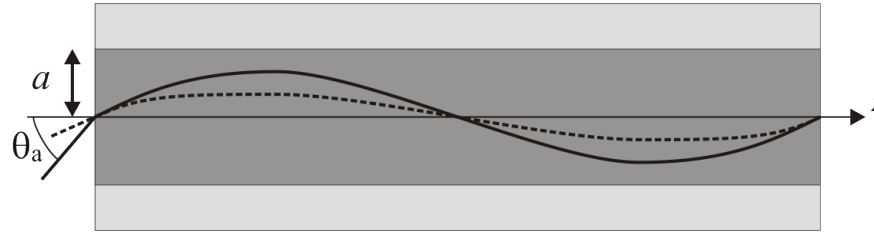


## Fibre à profile d'indice

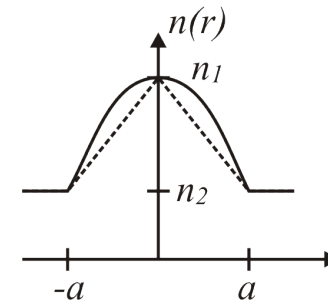
(a)



(b)



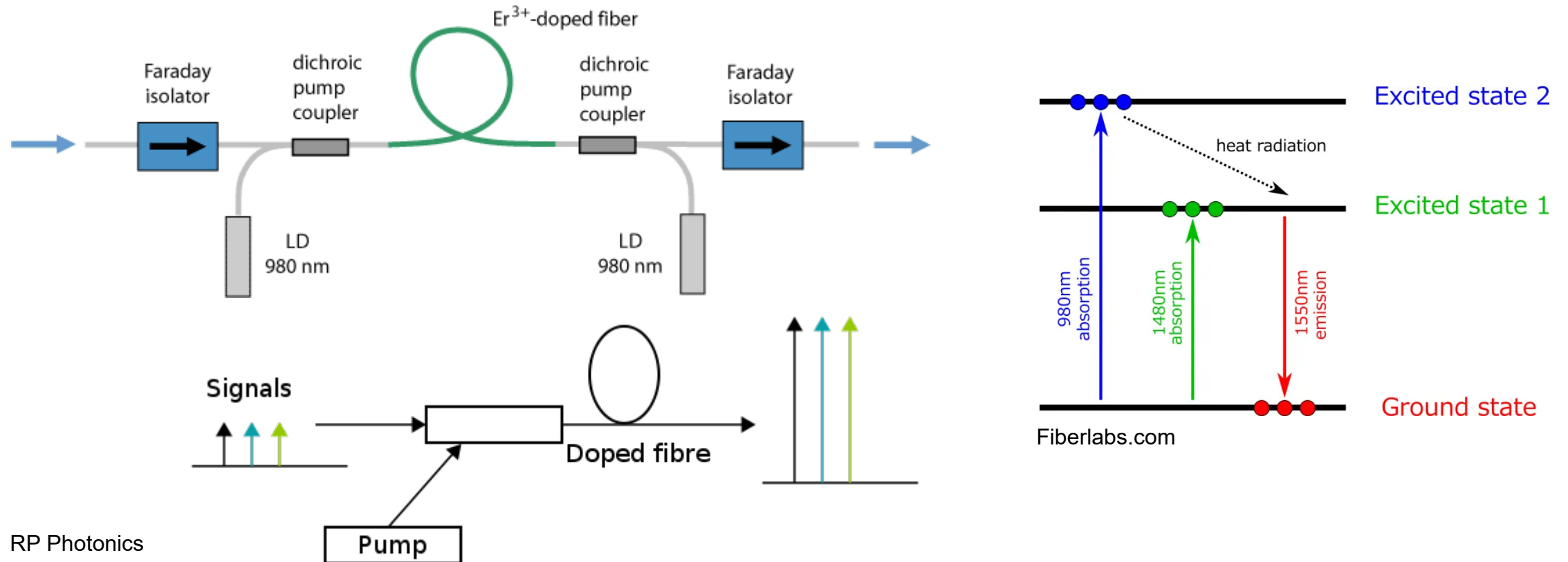
(c)



- 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 qui se propagent dans le centre de la fibre  $c_1 = c_0/n_1$ ).
- 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 son centre
- 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  $\text{Er}^{3+}$  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

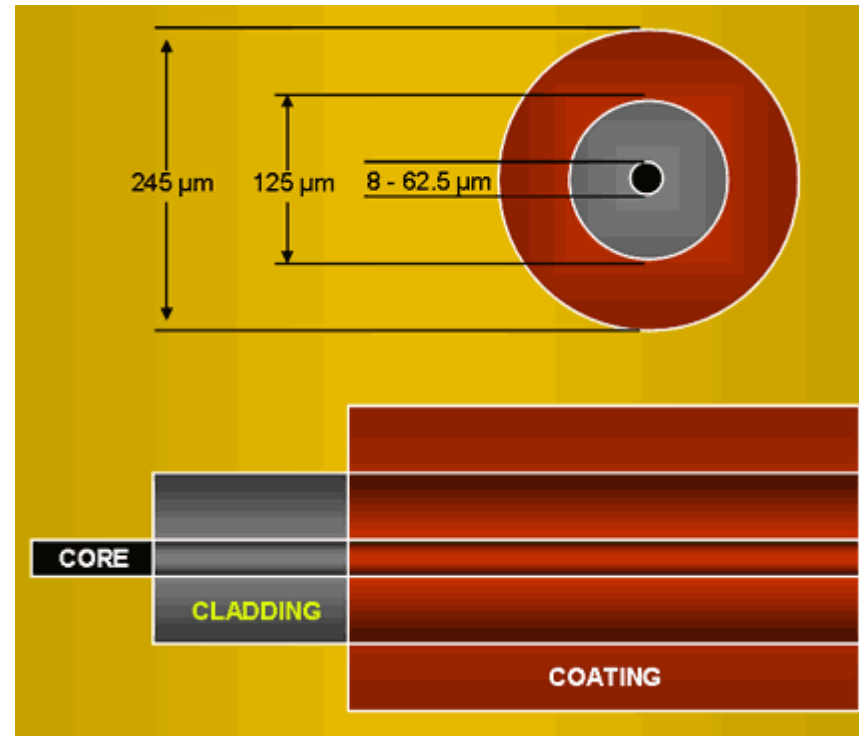
---

## Semaine 9 – partie 5

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

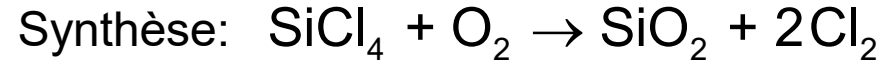


# Fibres optiques – Fabrication



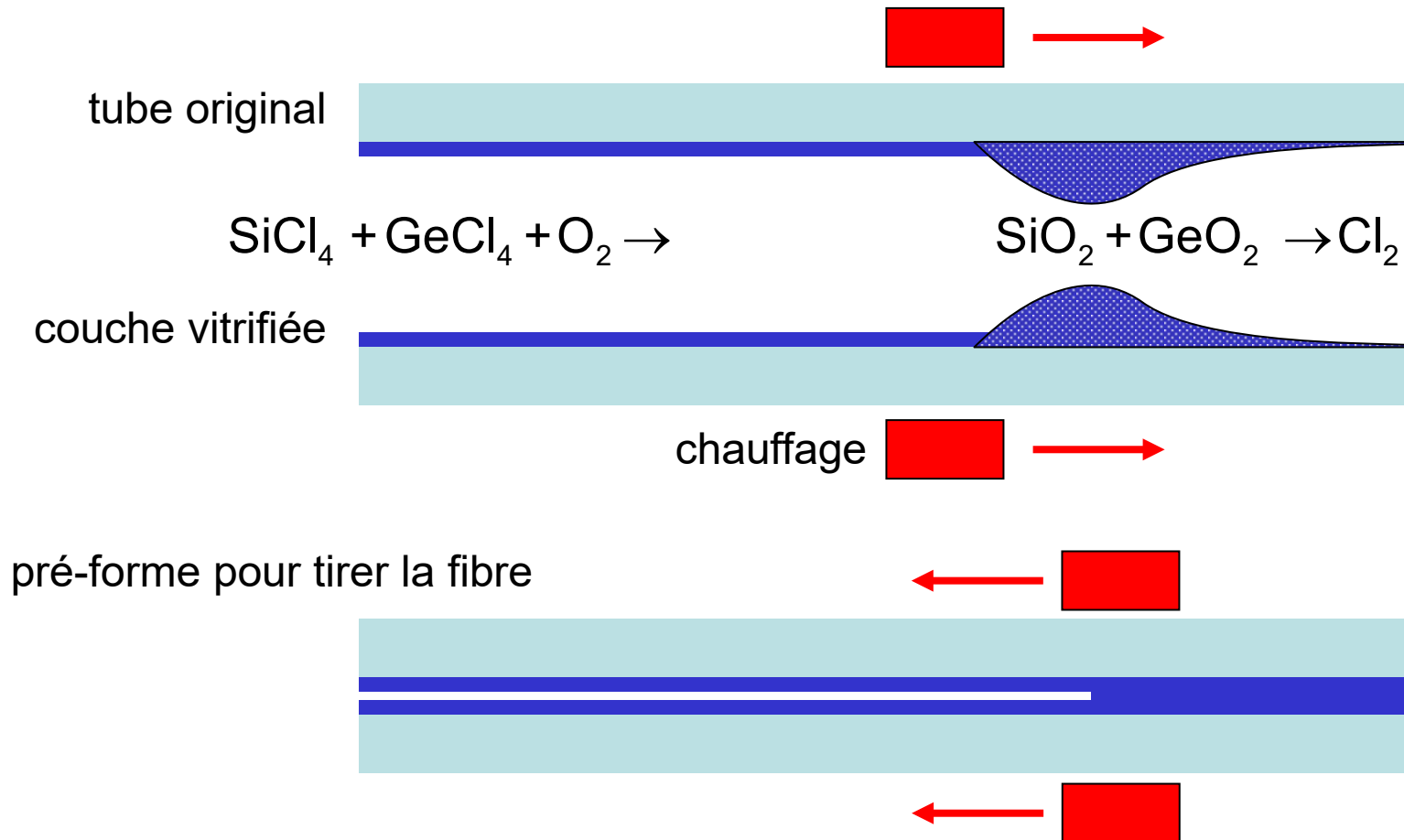
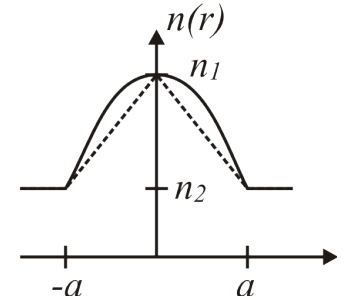
# Fibres optiques – Fabrication

Matériau: silica  $\text{SiO}_2$

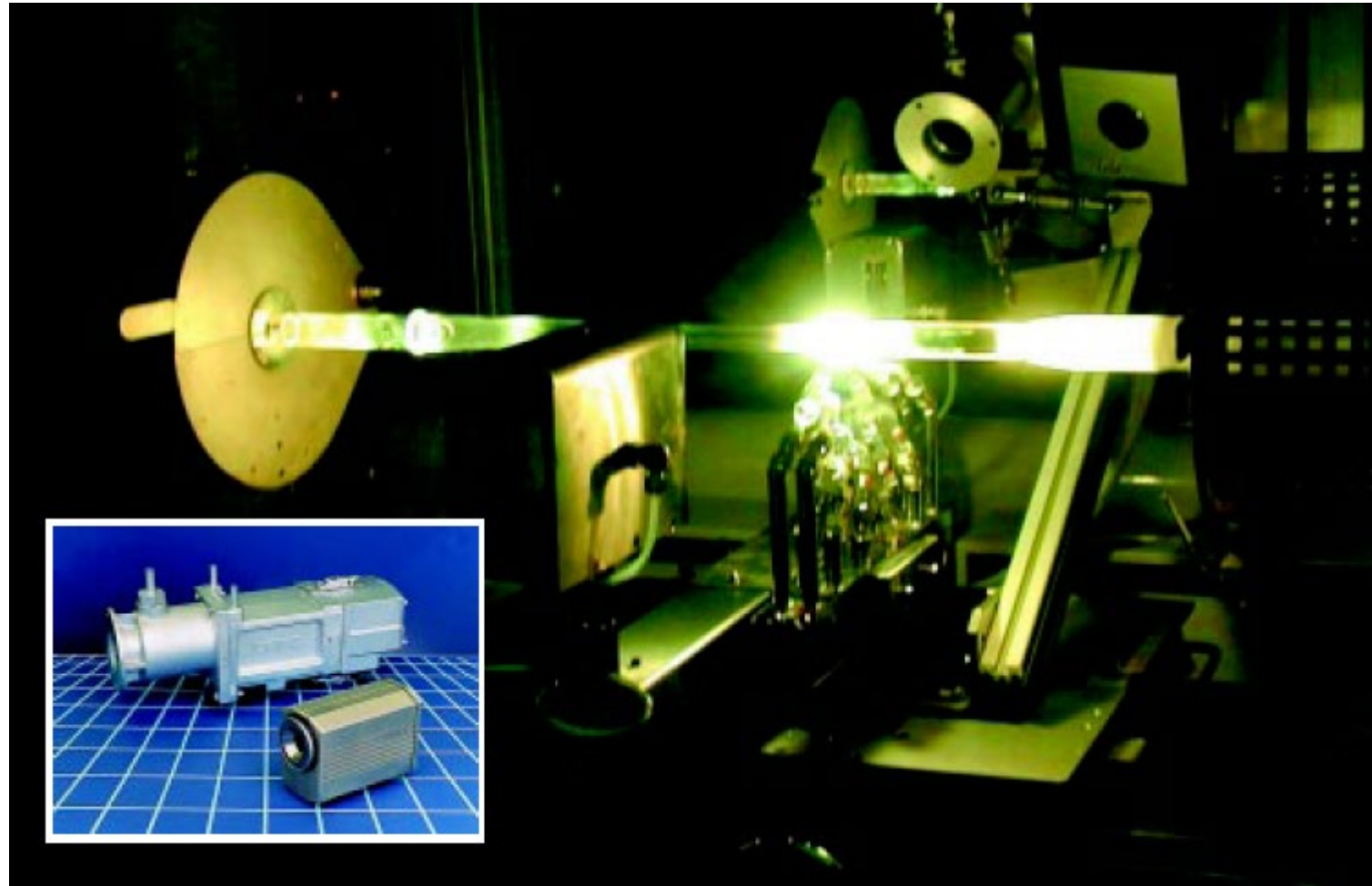


- pour augmenter l'indice, dopage  $\text{GeCl}_4$

- pour diminuer l'indice, dopage  $\text{SiF}_4$



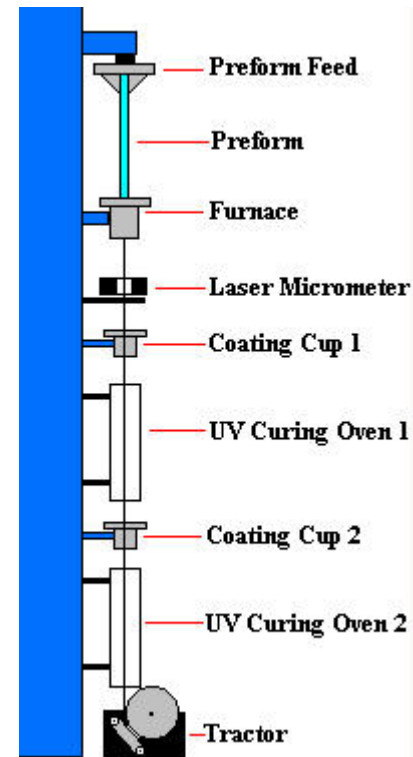
# Fibres optiques – Fabrication



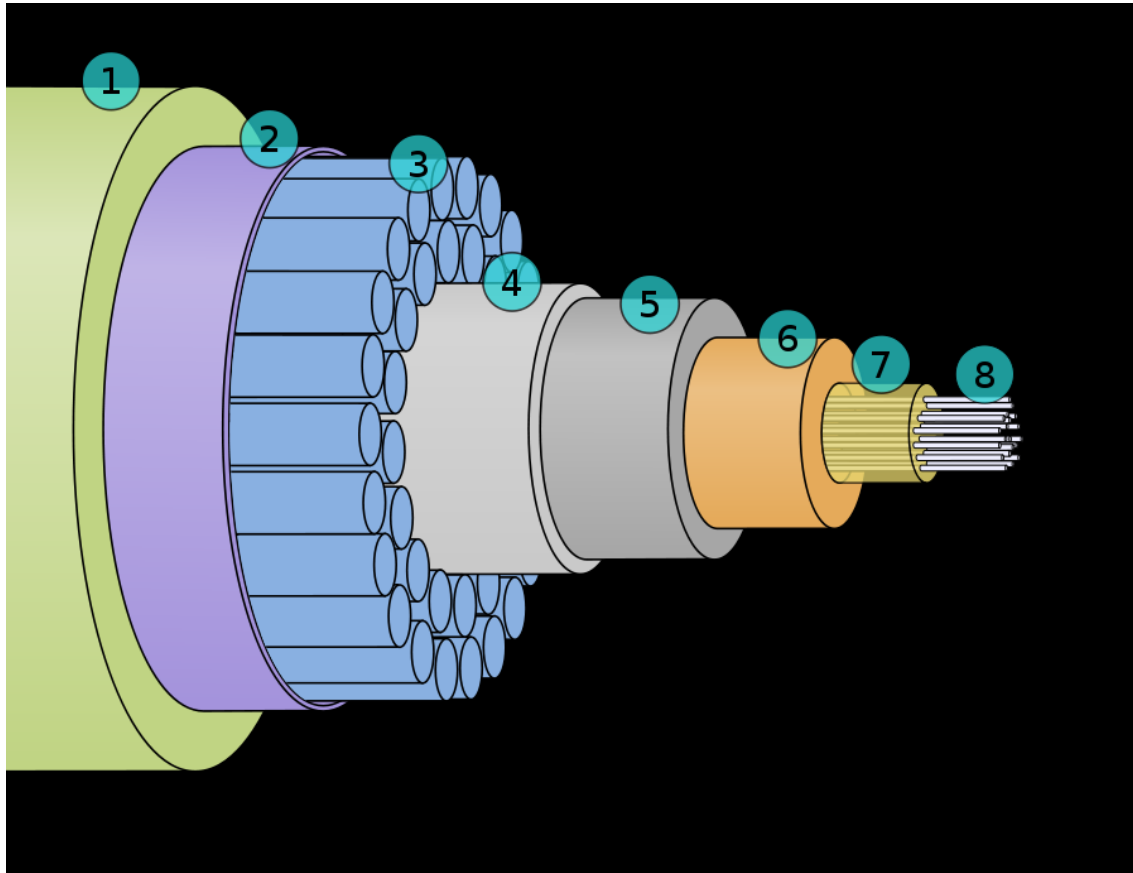
# Fibres optiques – Fabrication



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

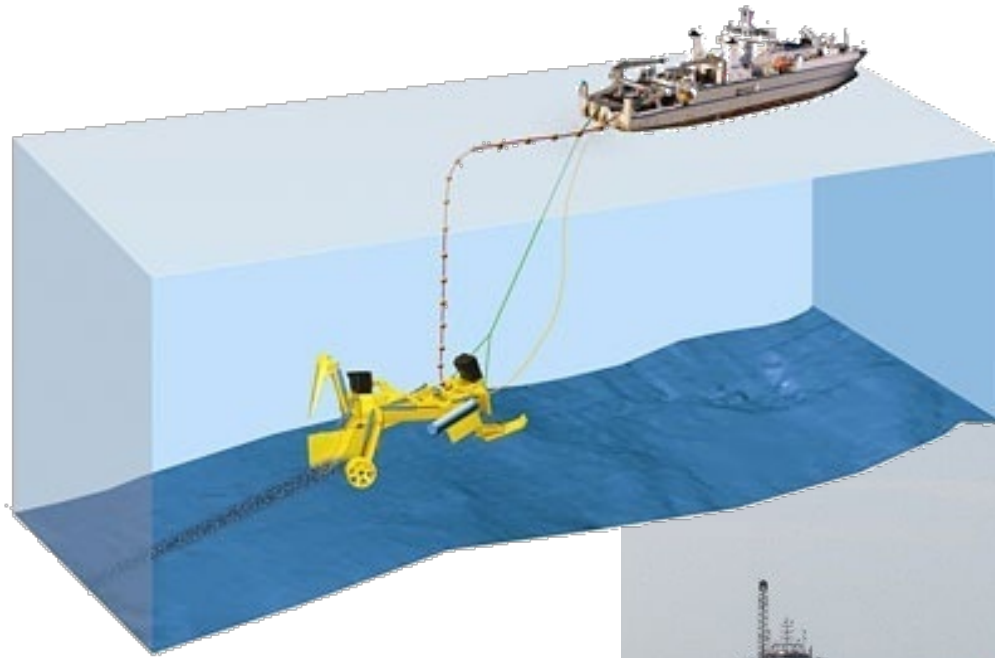


# Navire câblier

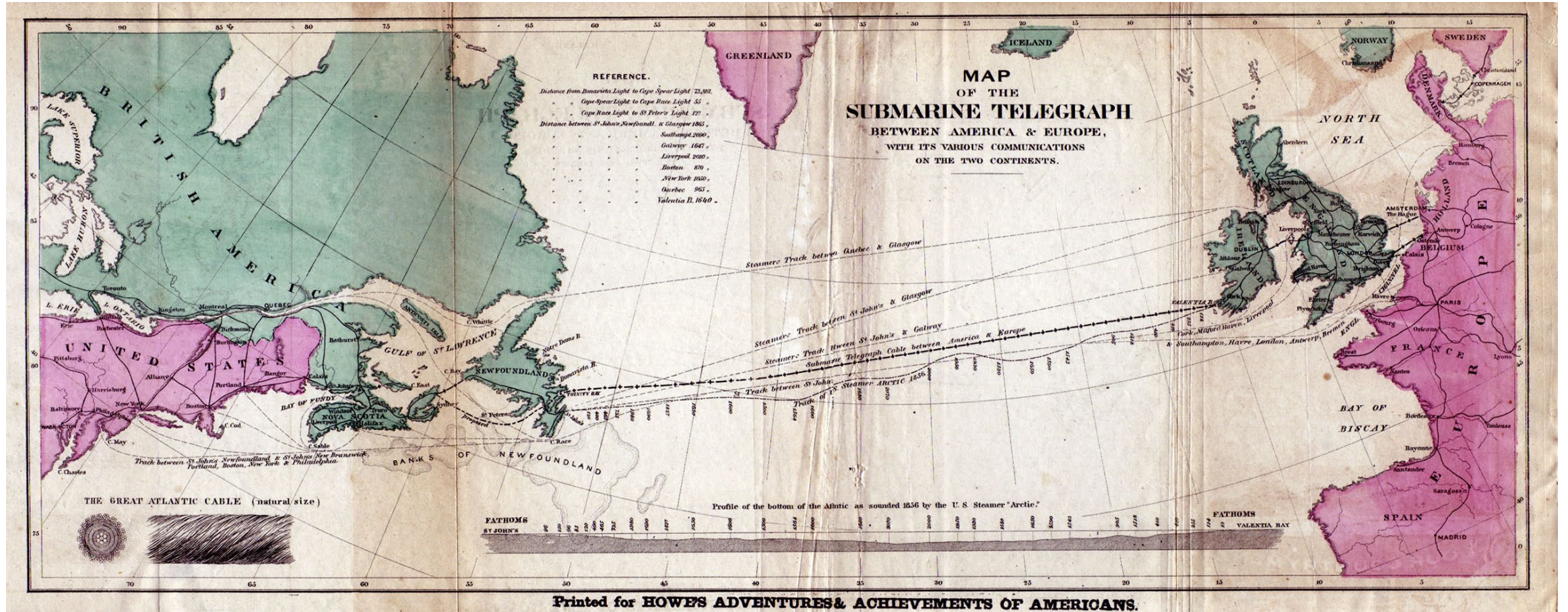


## Pose d'un câble sur le fond marin

- Le câble est enterré avec une "charrue"



# Câbles optiques



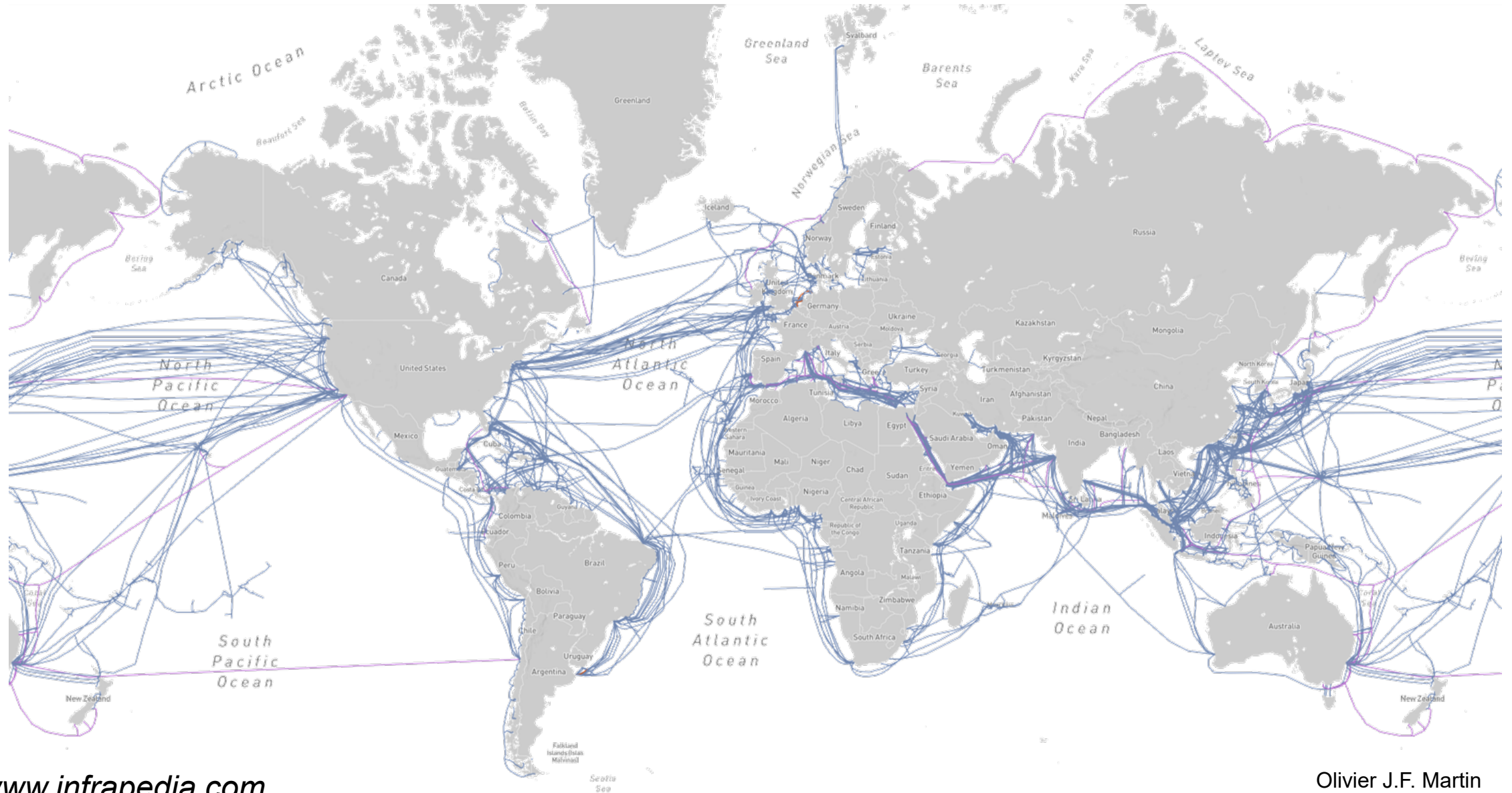
1858

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

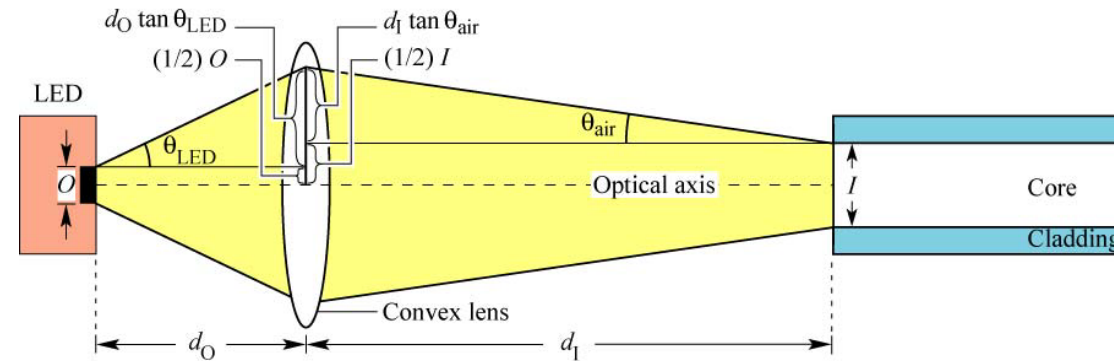
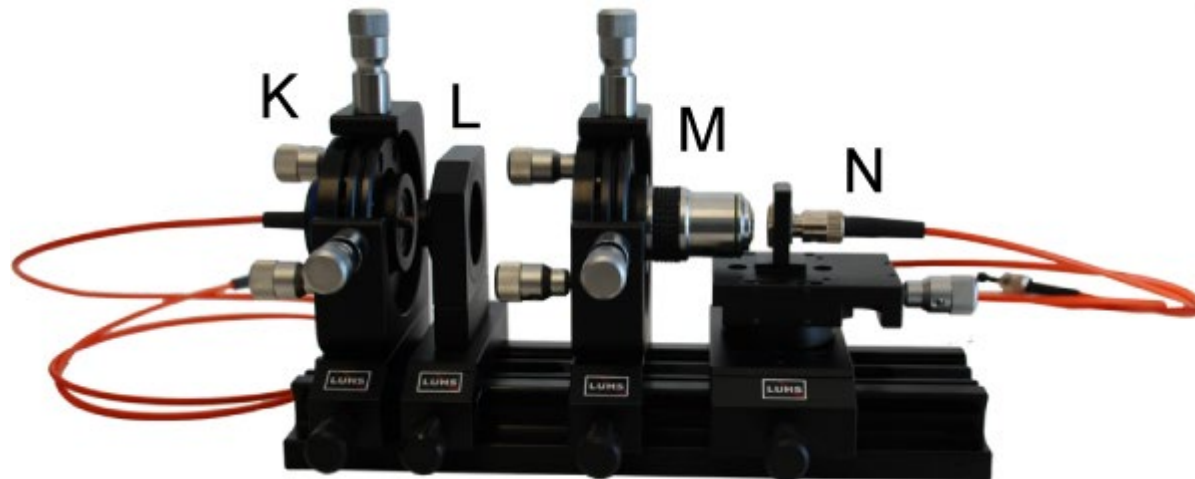


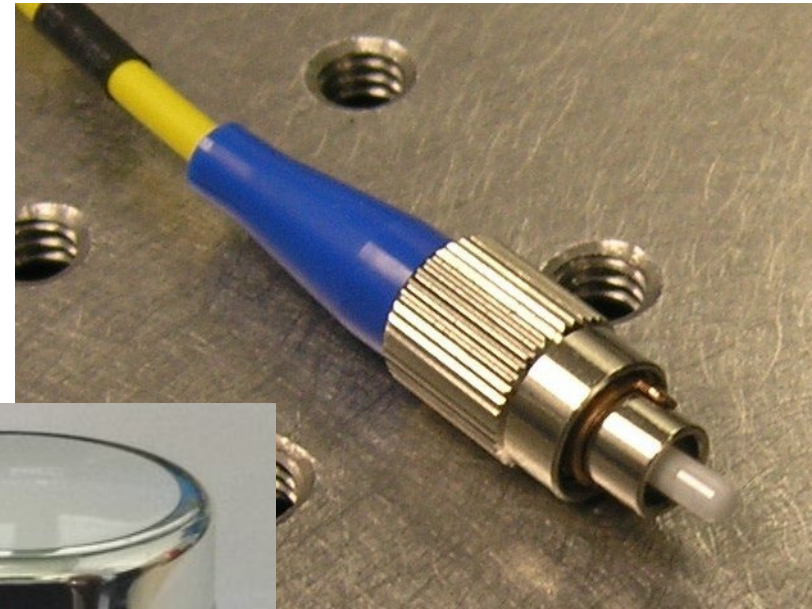
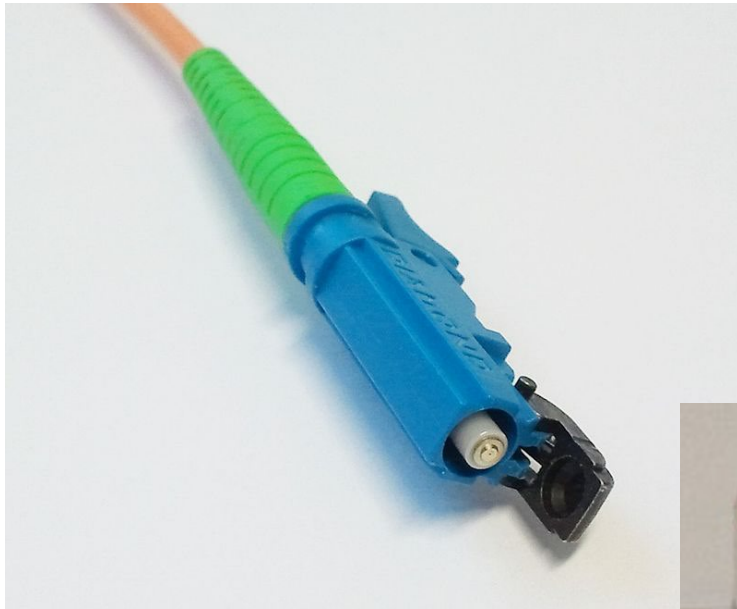
Fig. 22.7. Schematic illustration of coupling with a lens by imaging the light-emitting region of an LED onto the core of an optical fiber. The LED has a circular emission region with diameter  $O$  (Object). The emission region is imaged onto the fiber core with diameter  $I$  (Image) using a convex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

E. F. Schubert  
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)  
[www.LightEmittingDiodes.org](http://www.LightEmittingDiodes.org)



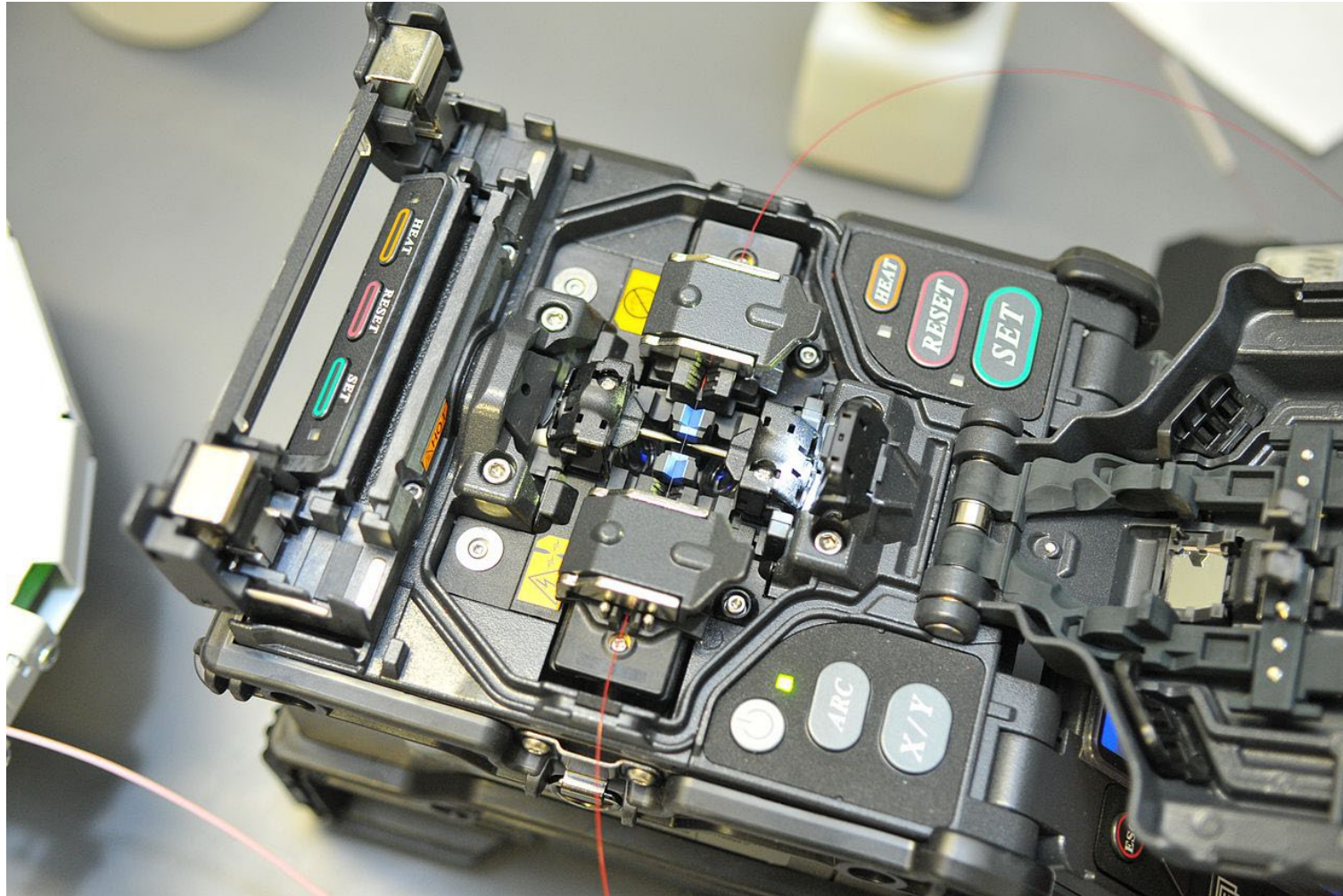
## Couplage dans une fibre

- 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



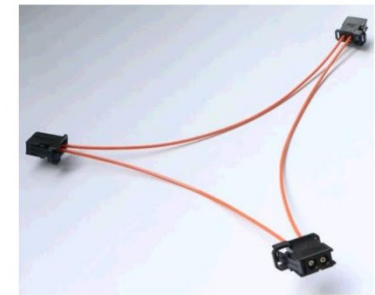
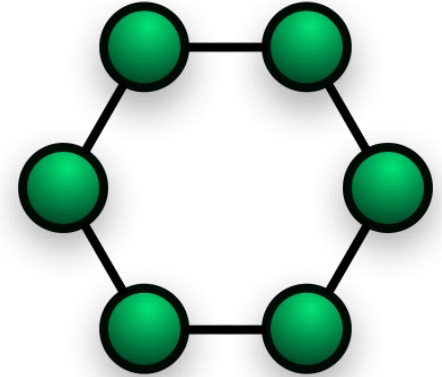
## Fibre splicing

- 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)

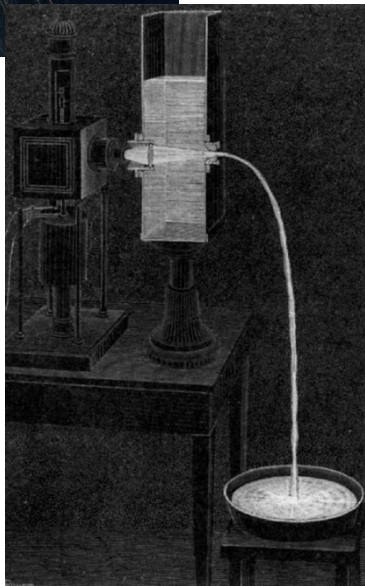
- Utilisées dans l'industrie automobile dès la fin des années 1990
- Fibre à saut d'indice, généralement en polyméthylméthacrylate (PMMA), avec un coeur de 1mm et  $NA=0.5$
- Pertes: 180 dB/km ( $\lambda_0=650$  nm), 110 dB/km ( $\lambda_0=520$  nm) (~0.3 dB/km pour une fibre en verre monomode!)
- Le 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](http://www.synova.ch)



Jean-Daniel Colladon (1802-1893)  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

