

Ingénierie optique

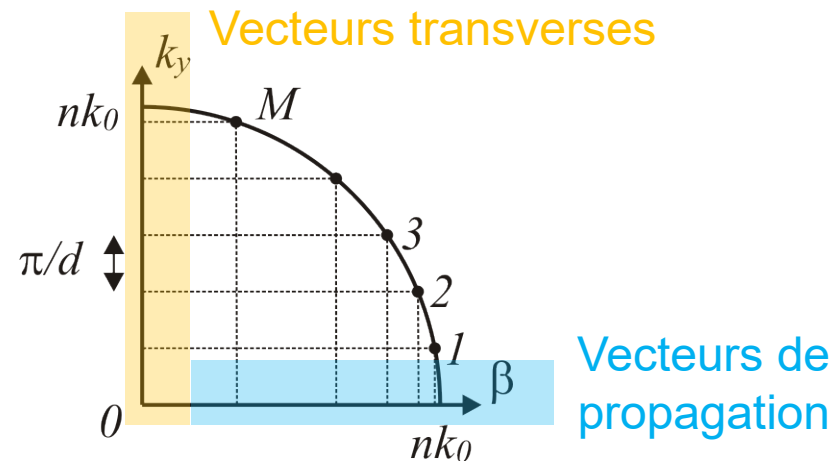
Semaine 10 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



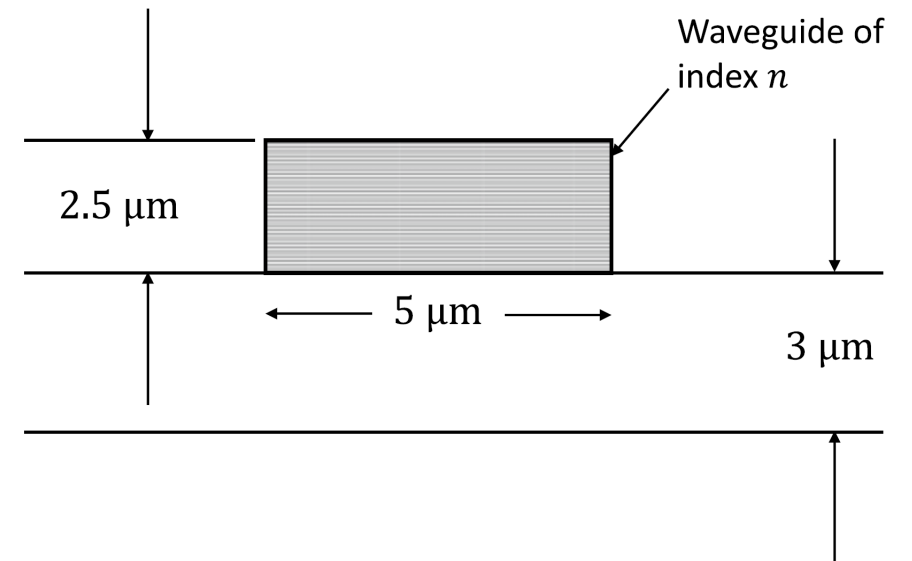
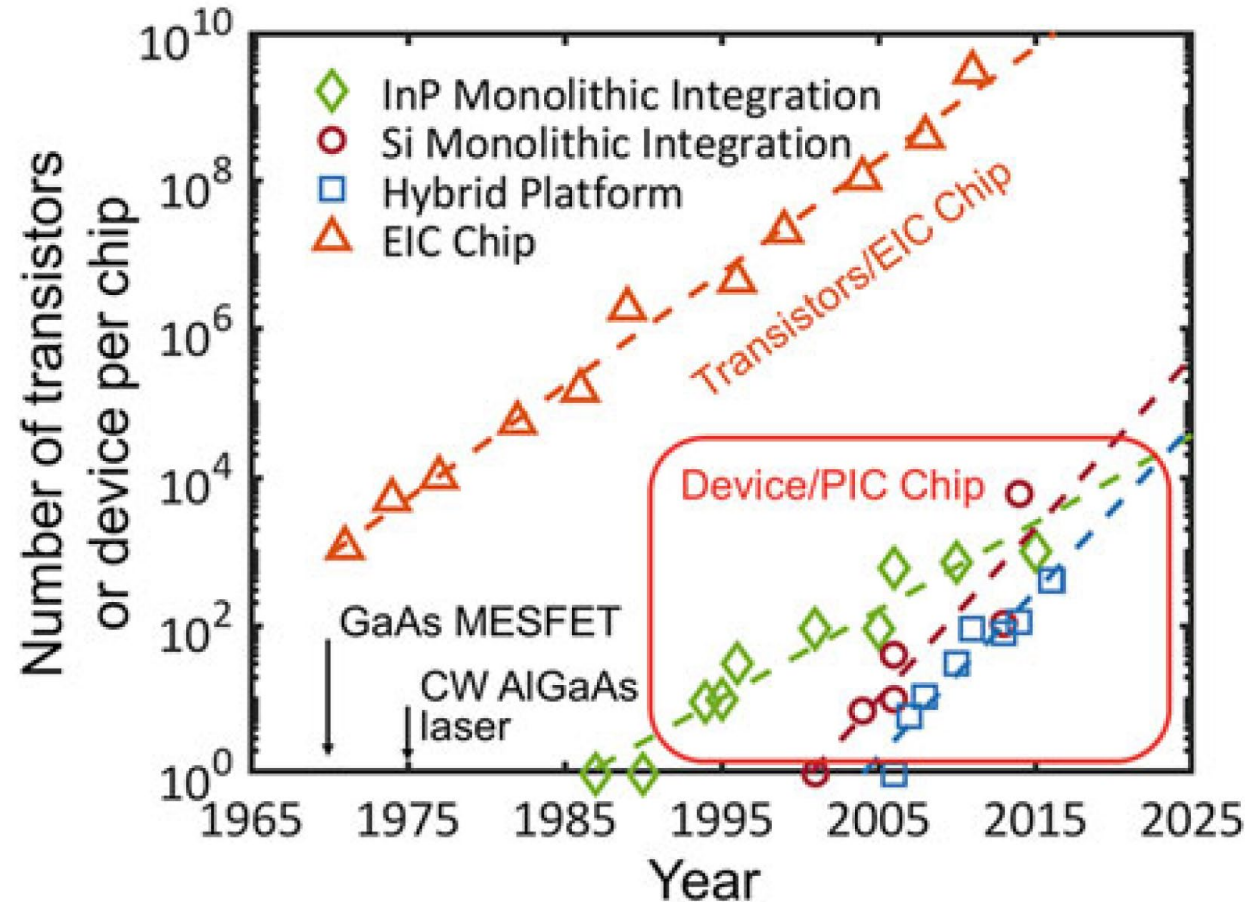
Index de mode (mode index en anglais)

- Un mode optique se propage dans un guide d'onde avec un vecteur de propagation que l'on note en général β
- On peut associer à ce mode un indice de réfraction n_{mode} :
$$\beta = k_0 n_{\text{mode}} = \frac{\omega}{c_0} n$$
- En anglais, on parle de «mode index»



Optique intégrée

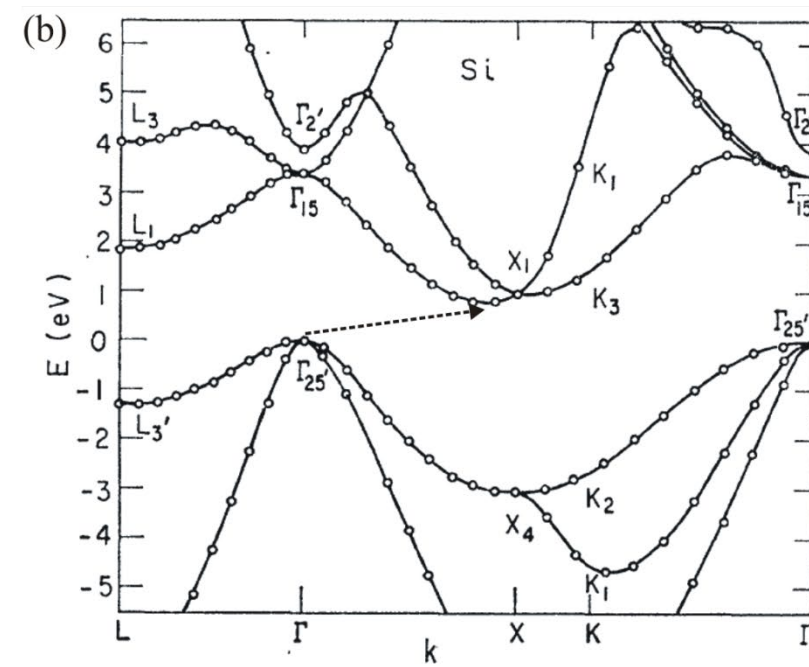
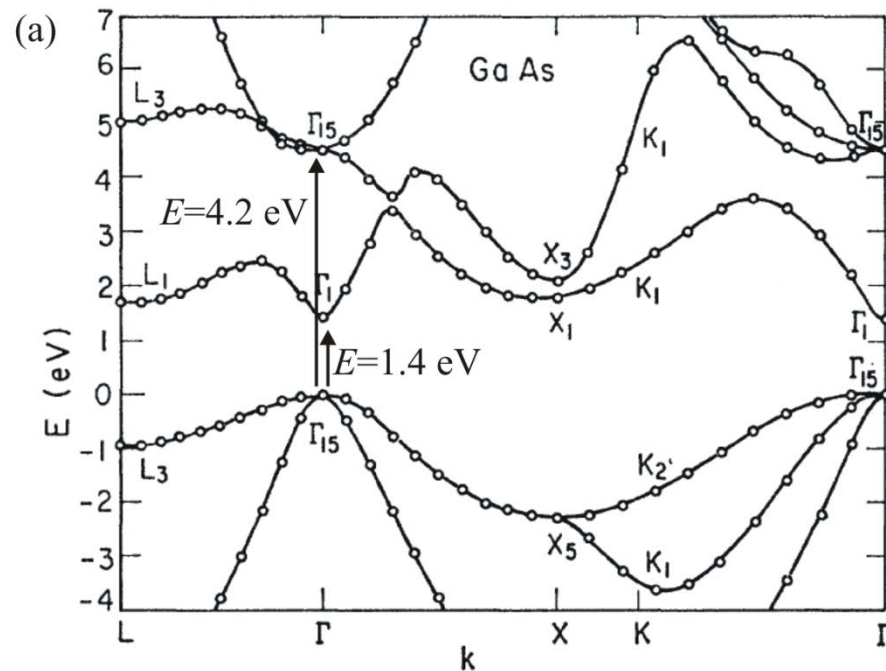
- Photonic integrated circuit (PIC), Optoelectronic integrated circuit (OEIC)
- L'intégration n'est pas aussi dense qu'en électronique, mais on observe tout de même une loi de Moore
- Le composant de base (guide d'onde) est relativement large



R. Osgood, S. Meng, Principles of Photonic Integrated Circuits (Springer, 2021)

Matériaux pour l'optique intégrée

- Alors qu'en électronique on peut «tout» réaliser avec le semiconducteur Si, ce n'est pas le cas en optique
- En particulier, les sources optiques (lasers, diodes lumineuses) nécessitent un semiconducteur à gap direct (le minimum de la bande de conduction se trouve «en face» du maximum de la bande de valence), Si n'a pas de gap direct



M.L. Cohen and T.K. Bergstresser, Physical Review vol. 141, p. 789 (1996).

Matériaux pour l'optique intégrée

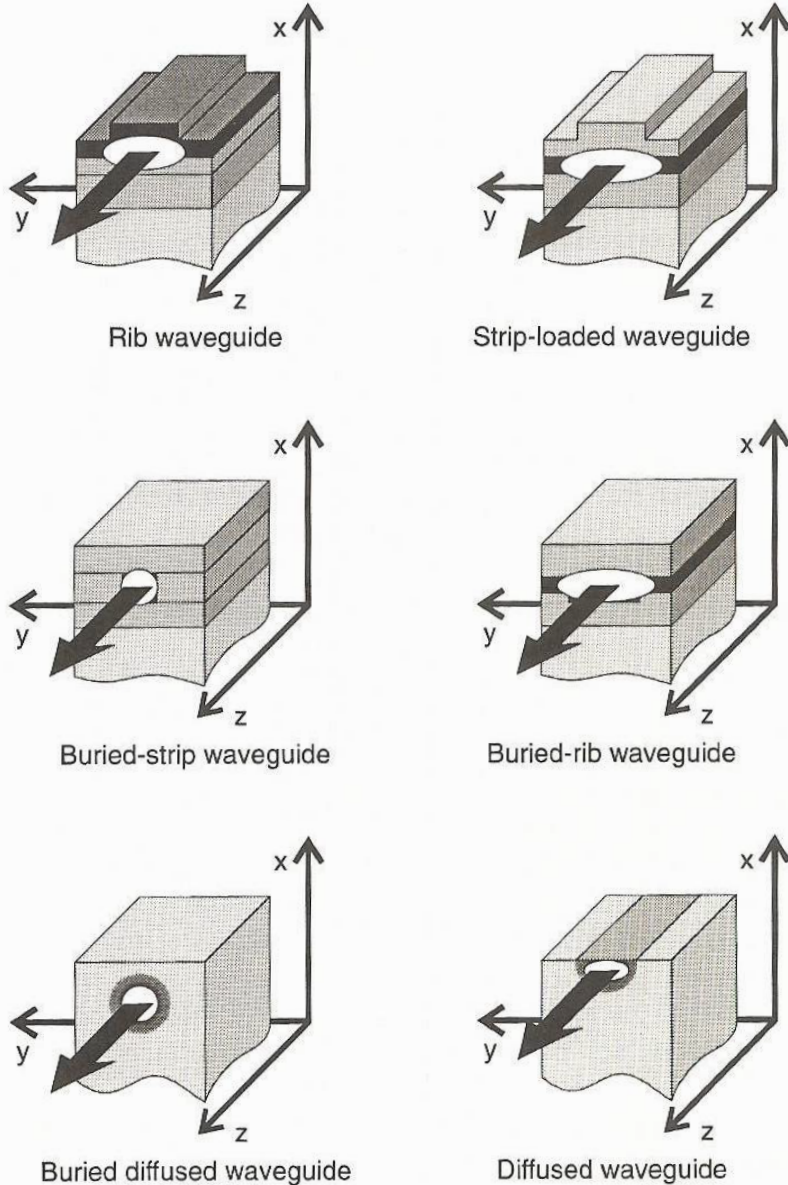
- Matériaux typiques pour l'optique intégrée: SiO₂, Si, semiconducteurs III-V (GaAs, InP), polymers, LiNbO₃

Material	Refractive index n	Index contrast Δn	Absorption α/cm^{-1}	Typical available dimension l/cm	Active optical response
SiO ₂ /Si	1.46 (P-glass 1.3 μm)	7×10^{-3}	0.05	~ 10	Thermo-electric modulation
SiO ₂ /Si ₃ N ₄ /Si	1.97 (1.3 μm)	$2-4 \times 10^{-2}$	0.3	~ 10	Optical amplification (with Er doping)
LiNbO ₃	2.2(n_e) 2.24(n_o)	10^{-2}	5×10^{-3}	$\sim 2 \times 6$	Electro-optic modulation
Polymer	1.49	2×10^{-3} – 10^{-4}	0.02/0.1 (1.3/1.5 μm)	~ 30	Modulation, some emission
GaAs/AlGaAs	~ 3.6	5×10^{-2}	2×10^{-2} (at $n \sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$)	5	Modulation, Optical sources, Nonlinear response
InP/GaInAsP	~ 3.2	5×10^{-2}	2×10^{-2} (at $n \sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$)	5	

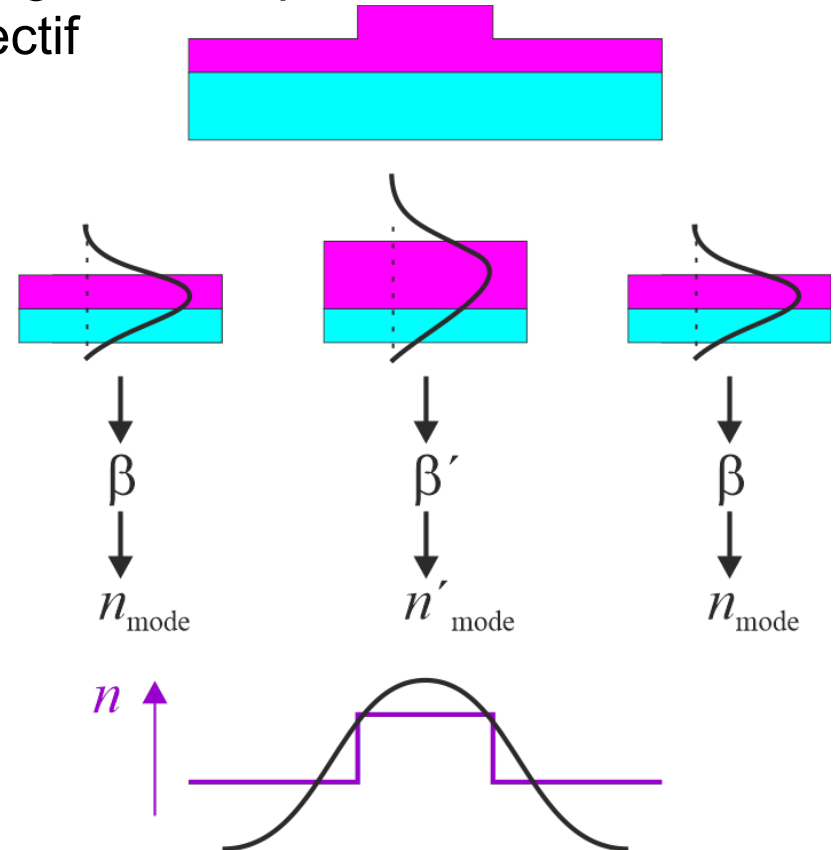
R. Osgood, S. Meng, Principles of Photonic Integrated Circuits (Springer, 2021)

Guides diélectriques 2D

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

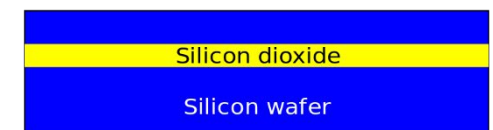
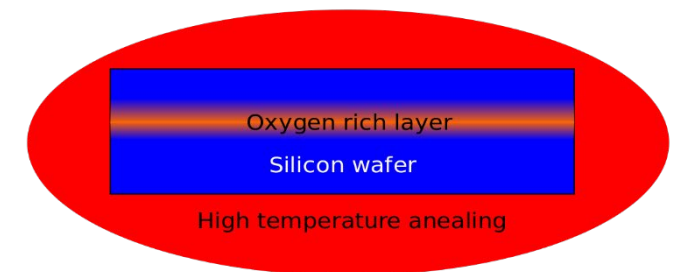
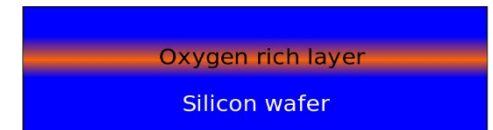
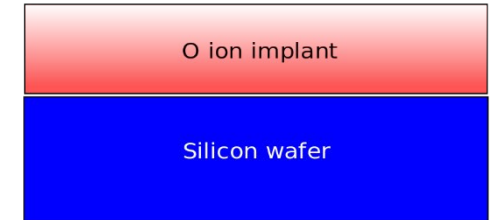
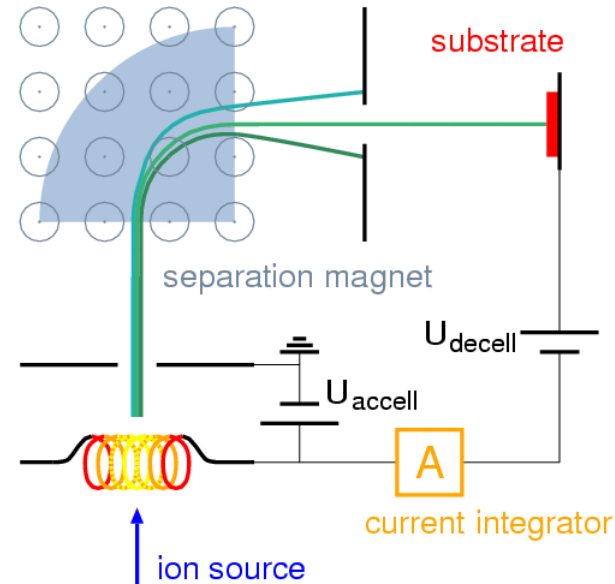
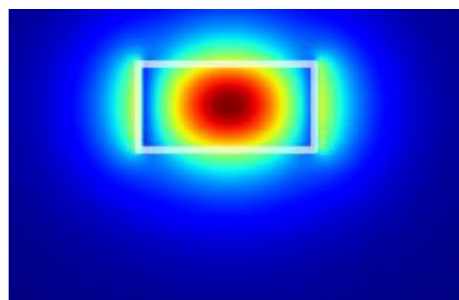
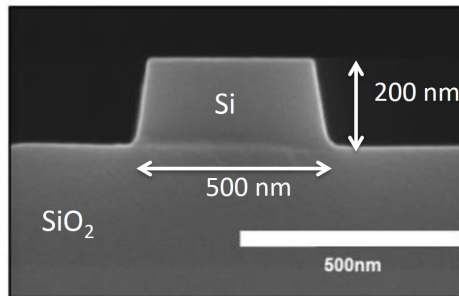
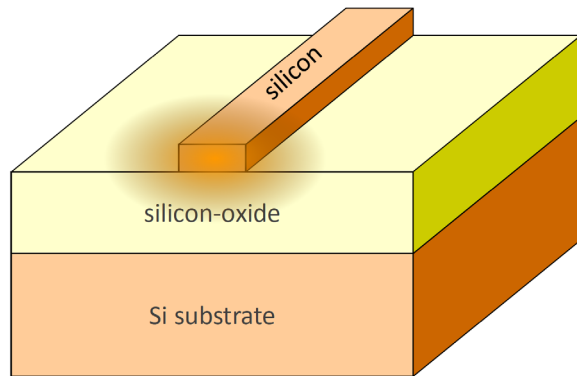


- Rib waveguide: une des structures les plus utilisées dans les circuits
- La partie «épaisse» guide la lumière
- On peut comprendre le guidage à partir des guides 1D par tranches et index effectif



Silicon on Insulator (SOI)

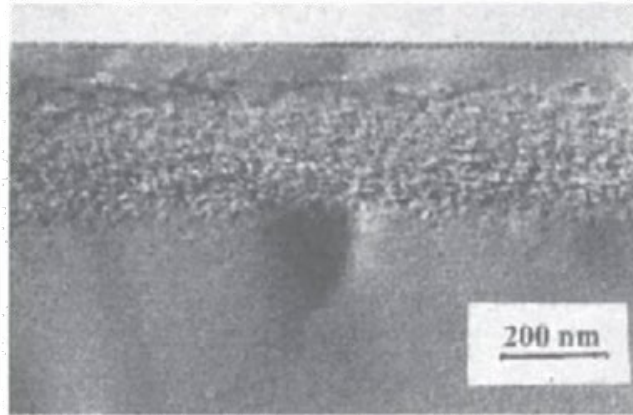
- Une couche de Si pour guider la lumière sur une couche de verre (SiO_2) pour augmenter le contraste d'indice et donc le confinement de la lumière



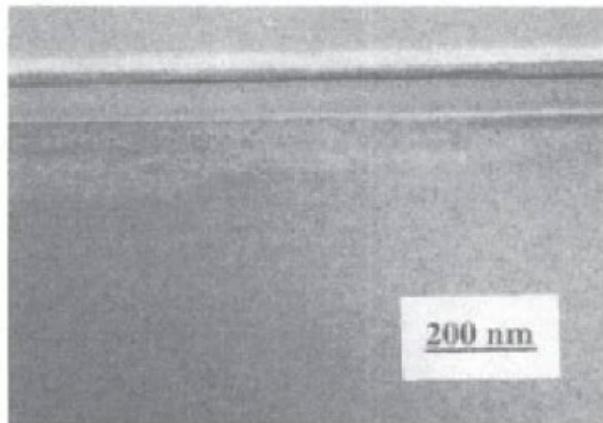
Silicon on insulator (SOI)

- La couche d'oxyde (SiO_2) enterrée a un indice plus faible que la couche de Si, la lumière est guidée dans la couche Si

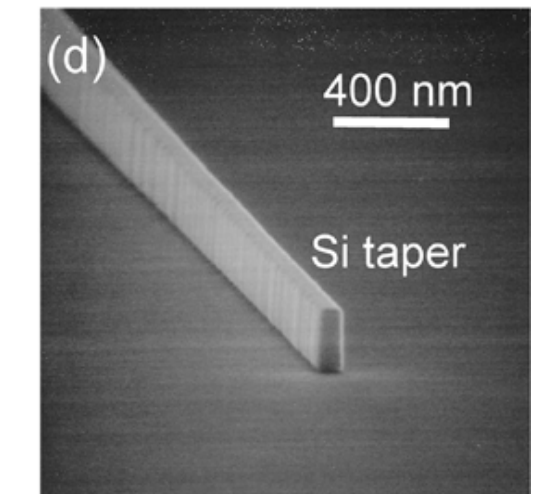
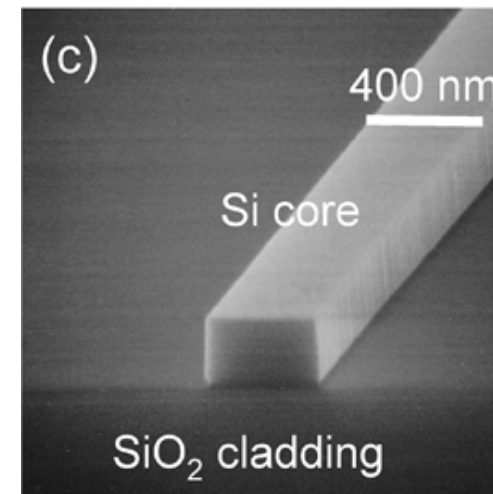
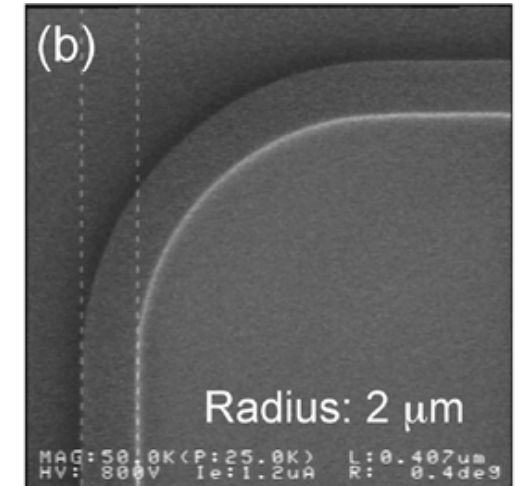
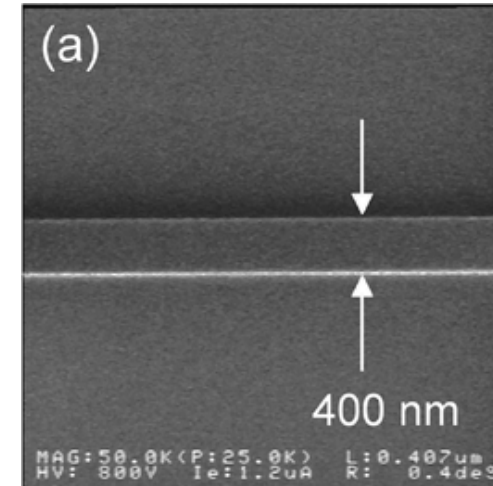
Après implantation:



Après recuit:



T. Kim, and J. Lee, Micro & Nano Systems Lett. vol. 11, p. 15 (2023)

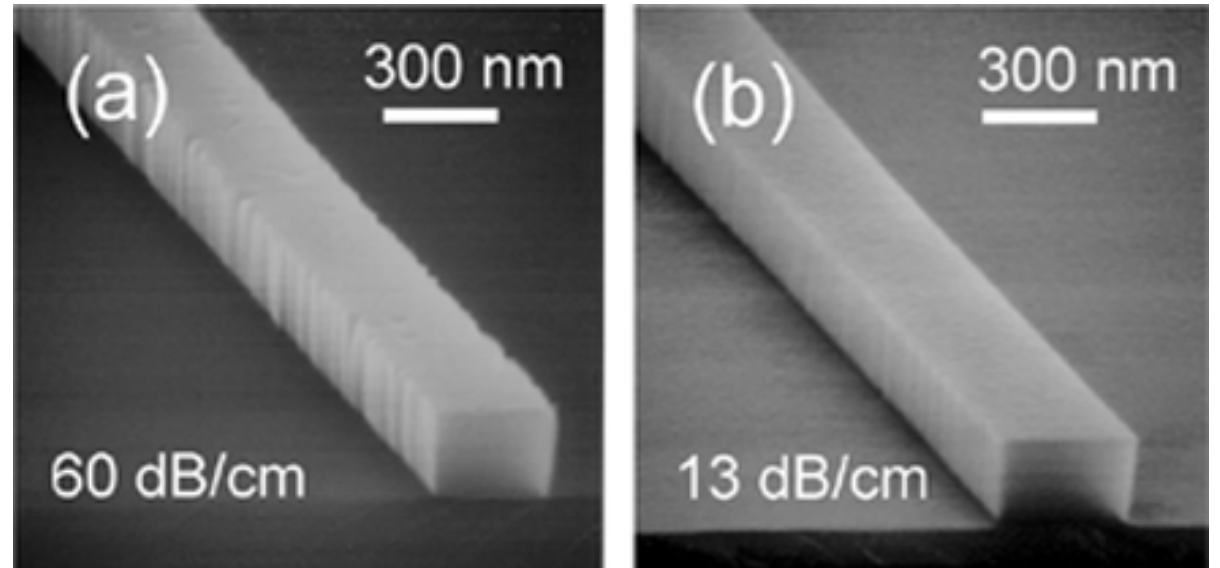
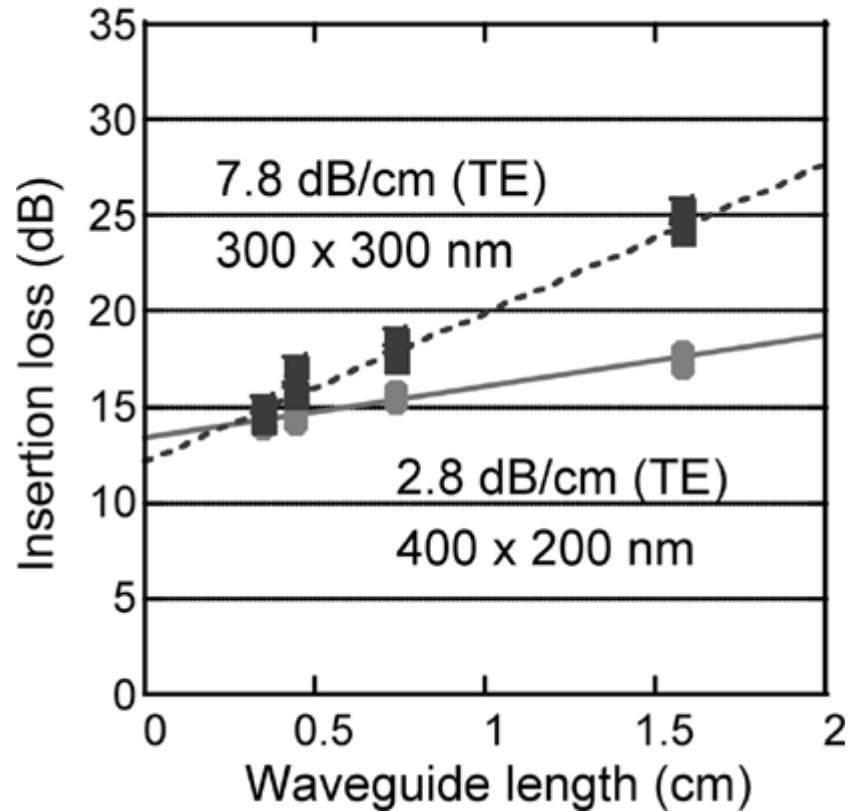


T. Tsuchizawa, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. Vol. 11, p. 232 (2005)

Olivier J.F. Martin

SOI guide

- Les pertes dépendent de la géométrie et de l'état de surface (rugosité) du guide (fibre optique: 0.2 – 0.4 dB/km)



T. Tsuchizawa, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. Vol. 11, p. 232 (2005)

Guides diélectriques 2D

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

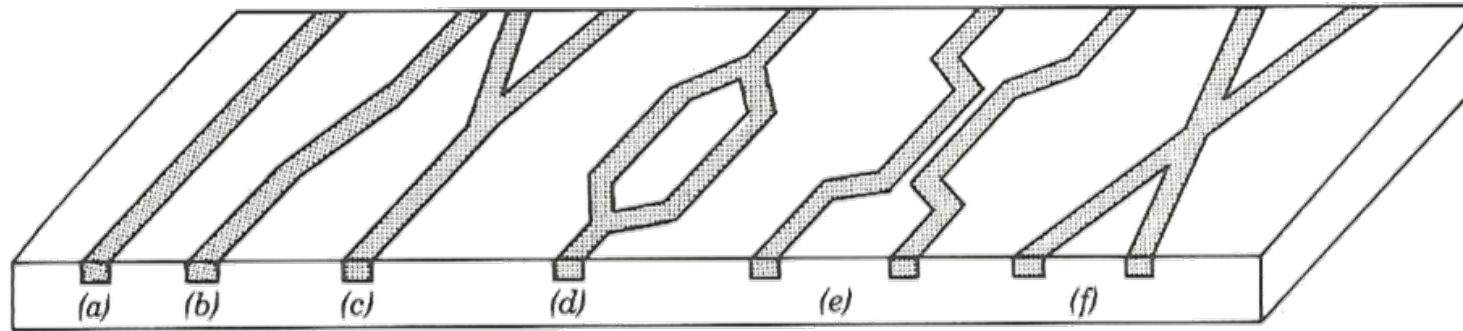
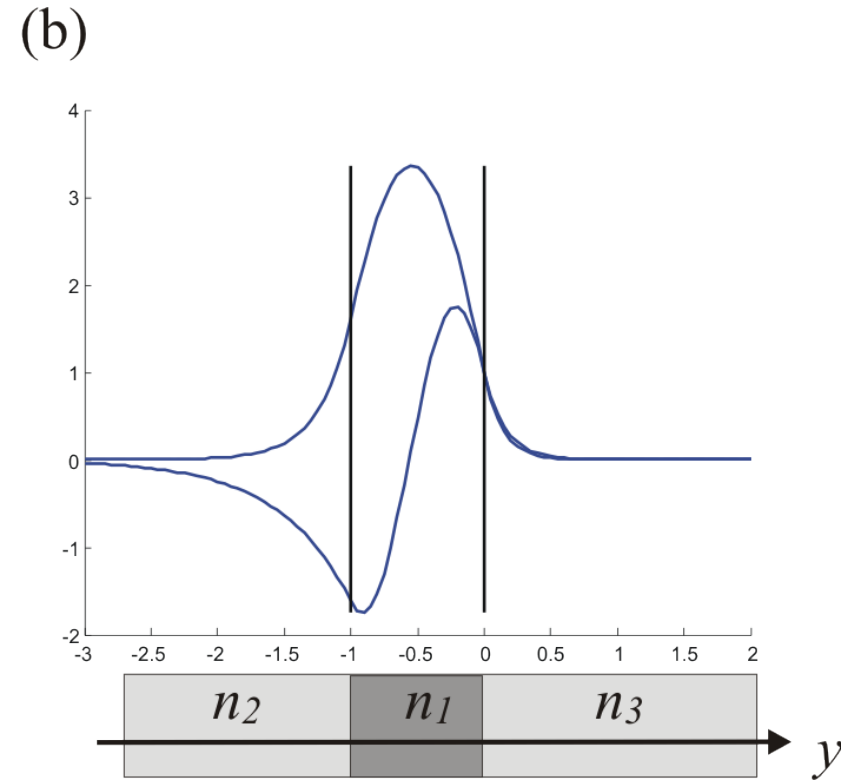
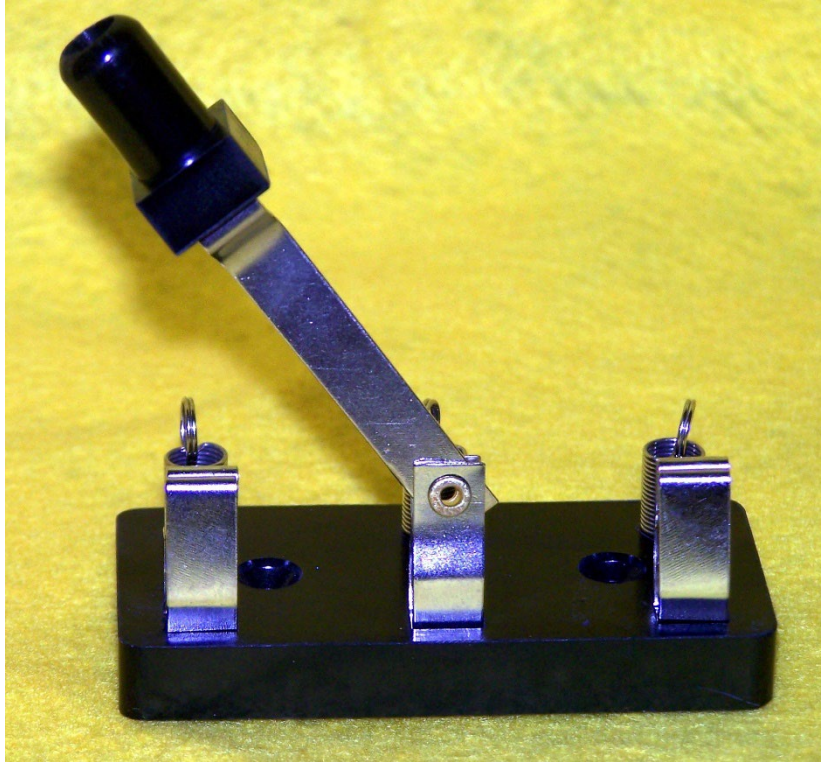


Figure 7.3-4 Different configurations for waveguides: (a) straight; (b) S bend; (c) Y branch; (d) Mach-Zehnder; (e) directional coupler; (f) intersection.

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

Interrupteur optique

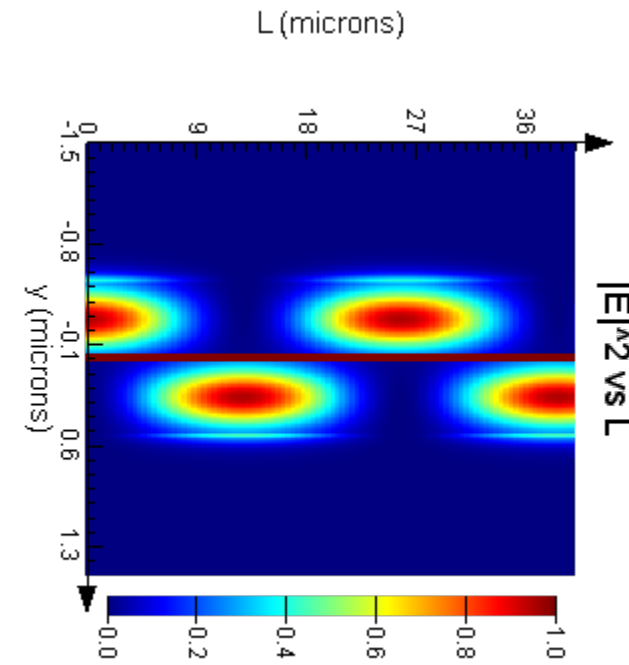
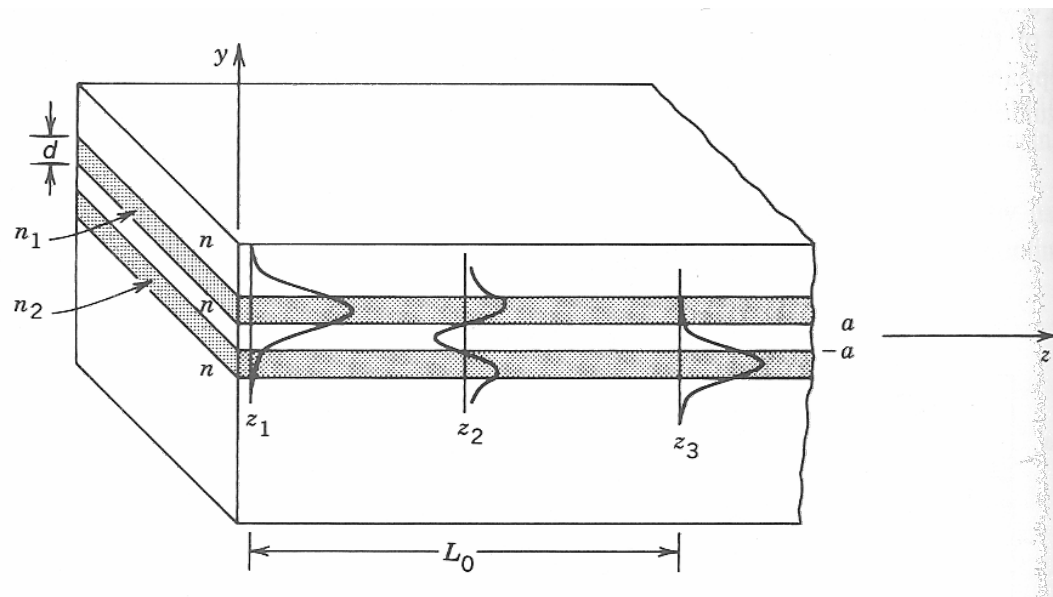
- Contrairement au courant électrique, il n'existe pas d'interrupteur permettant de rediriger la lumière d'un guide d'onde à l'autre



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

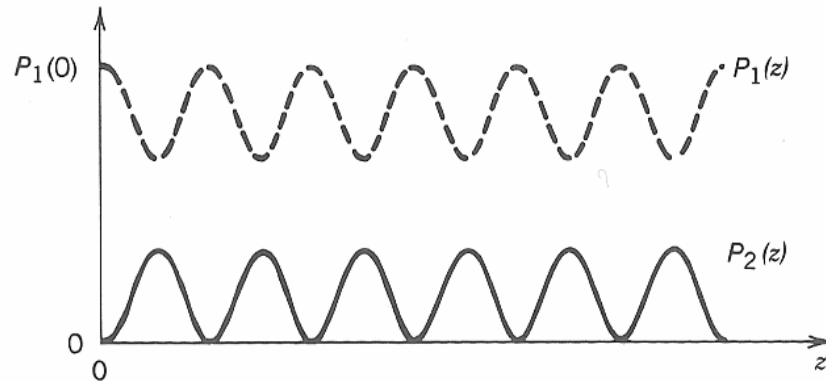
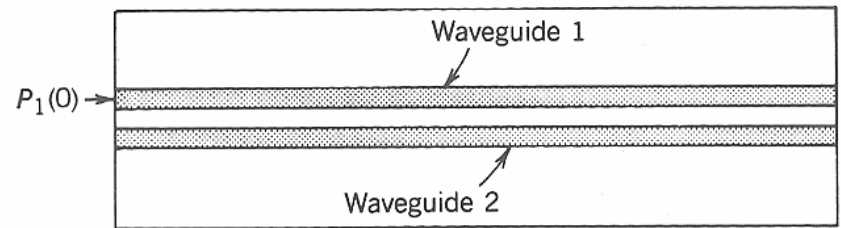
Couplage entre des guides parallèles

- Comme l'extension latérale d'un mode s'étend vers le guide voisin, le mode peut se coupler entre guides voisins
- 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

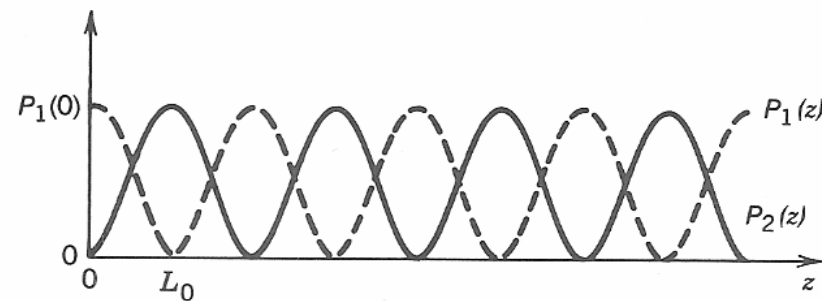


Couplage entre des guides parallèles

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



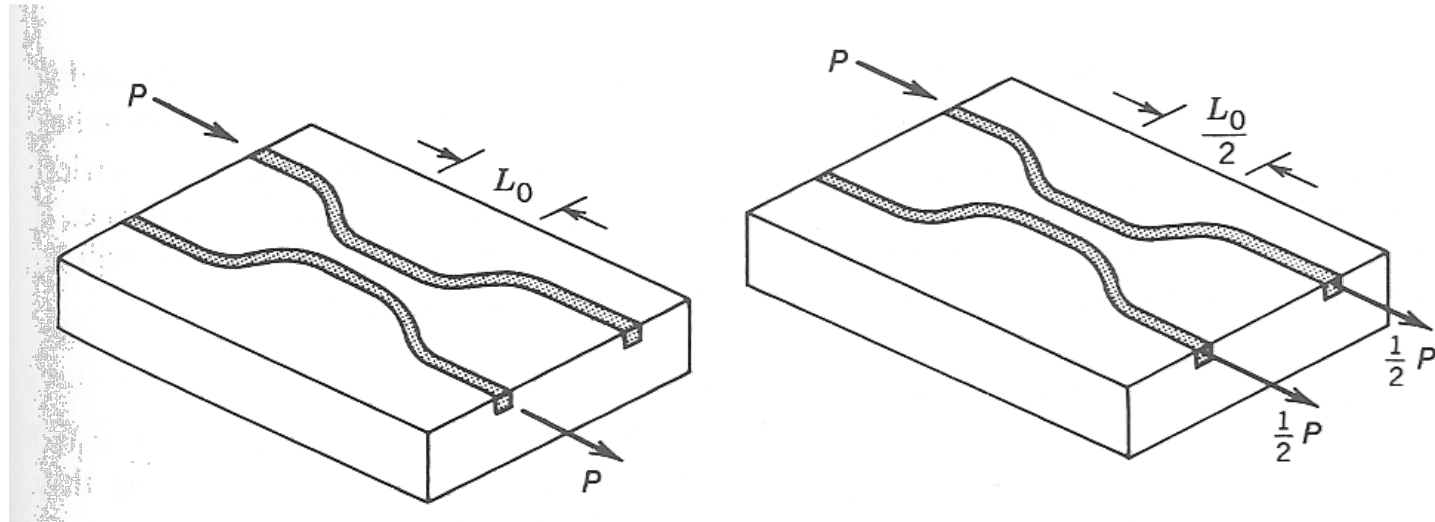
Couplage partiel



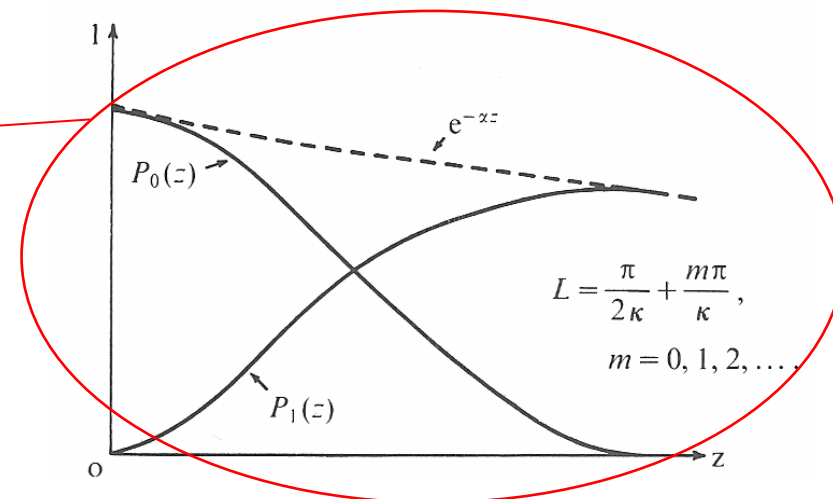
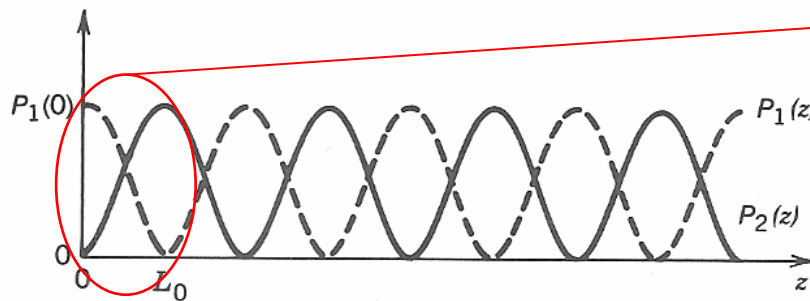
Couplage total

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:

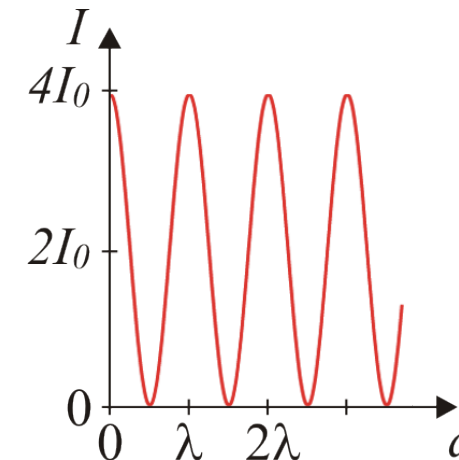
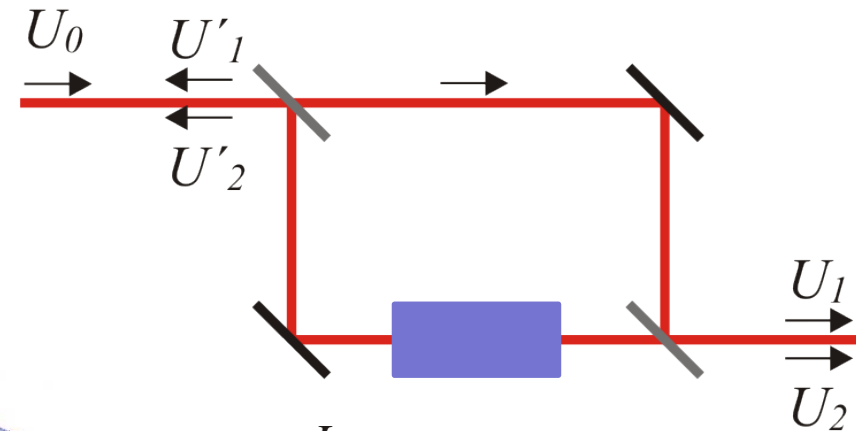
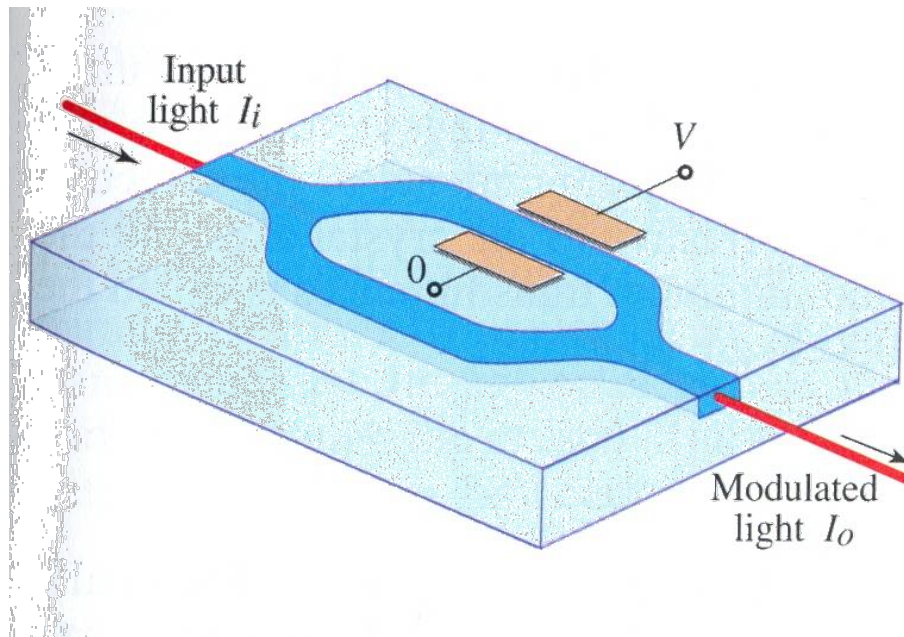


$$L = \frac{\pi}{2\kappa} + \frac{m\pi}{\kappa},$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

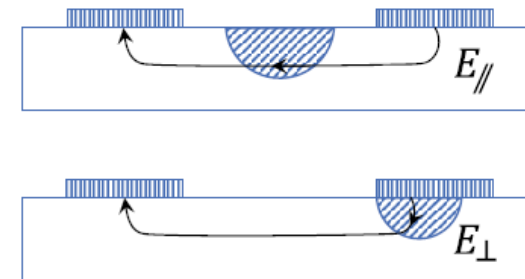
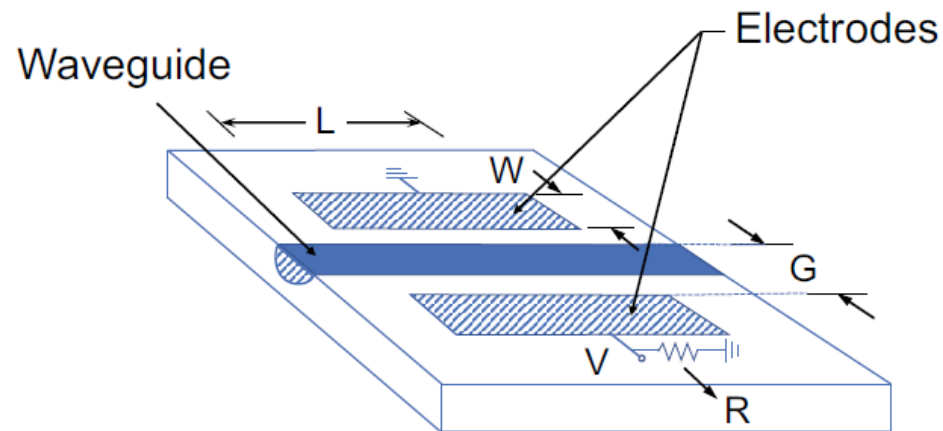
Modulateur électro-optique

- En appliquant un champ électrique sur 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)



Modulateur électro-optique

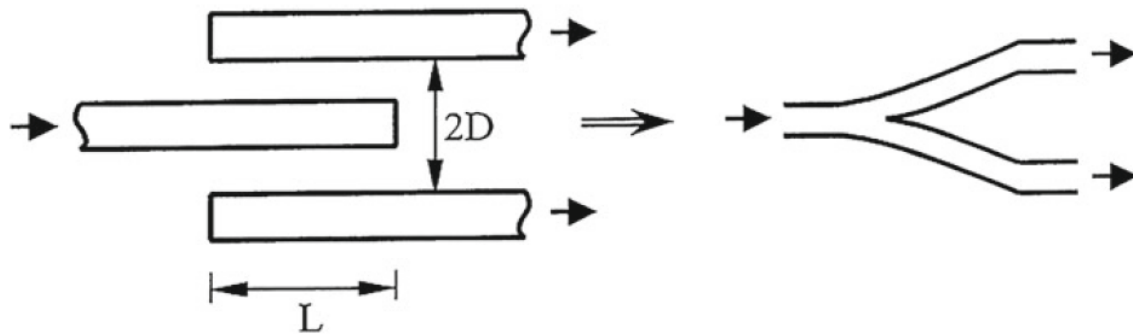
- Généralement avec un cristal de LiNbO_3 , dont la réponse est anisotrope
- Variation de l'indice de réfraction en fonction du champ électrique appliqué
- Effet Pockel $\Delta n \sim 10^{-11} \text{ V/m}$
- Vitesse de modulation $\sim 40 \text{ Gb/s}$ (jusqu'à 100 Gb/s en laboratoire)



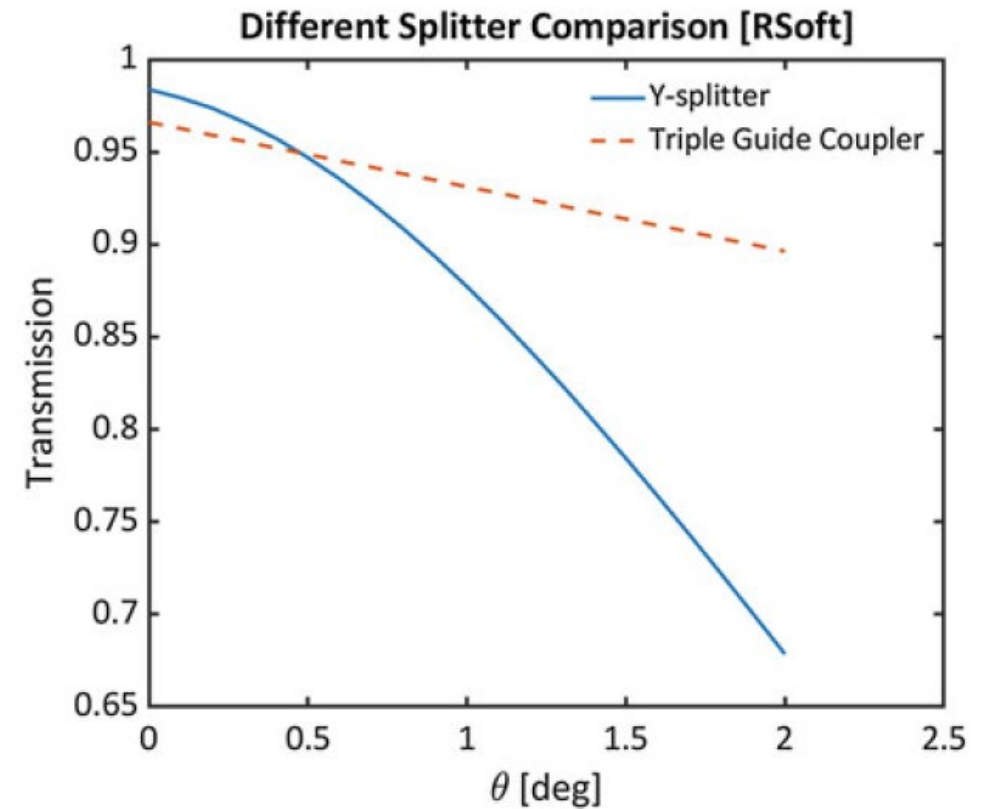
R. Osgood, S. Meng, Principles of Photonic Integrated Circuits (Springer, 2021)

Mode splitter

- Distribution de l'énergie incidente dans deux guides
- Seule une variation très lente de la géométrie permet de limiter les pertes



R. Osgood, S. Meng, Principles of Photonic Integrated Circuits (Springer, 2021)



Les pertes radiatives limitent le rayon de courbure des guides

- Un grand contraste diminue cependant les pertes radiatives

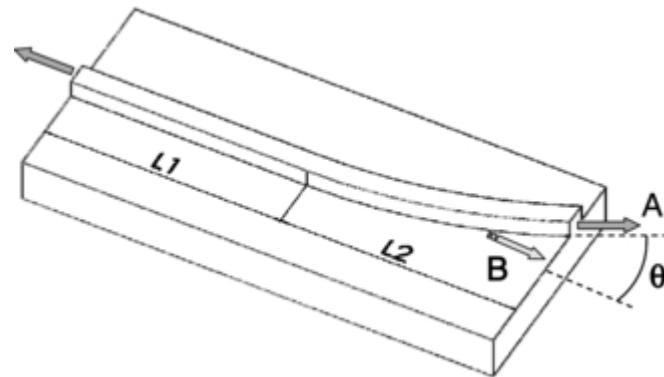
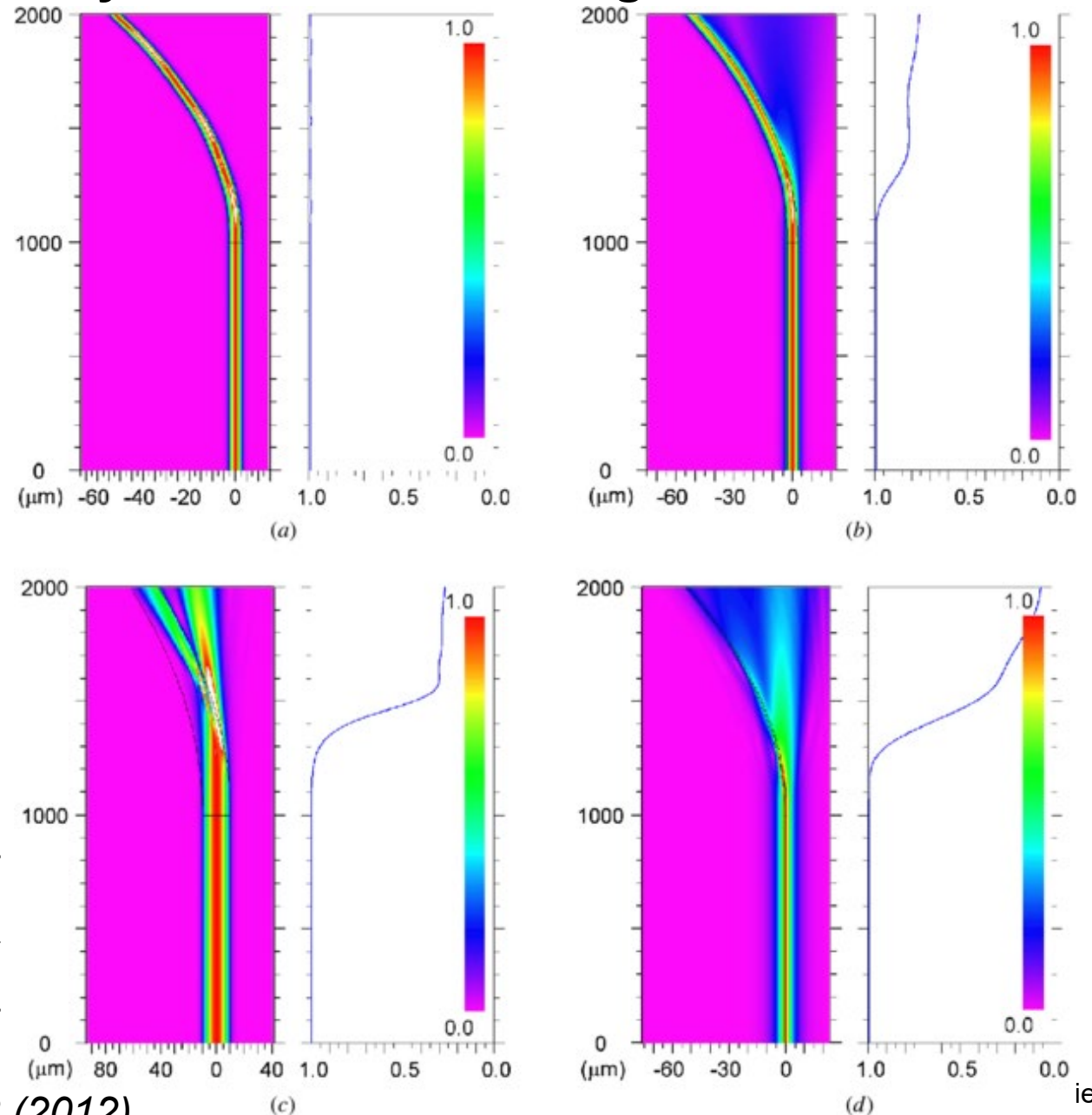


Table 2. The structural parameters of figure 2.

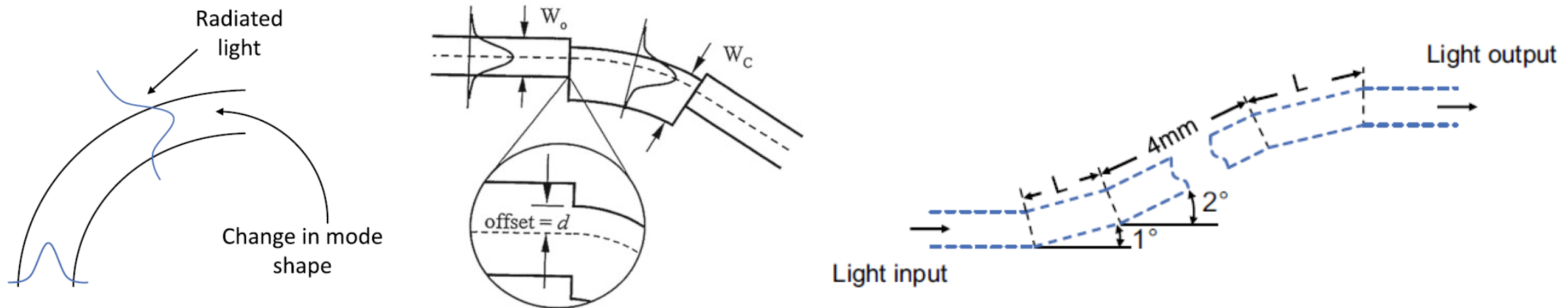
$L_1 = 1 \text{ mm}$, $L_2 = 1 \text{ mm}$, $R = 0.9567 \text{ cm}$ ($\theta = 6^\circ$)

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



Les pertes radiatives limitent le rayon de courbure des guides

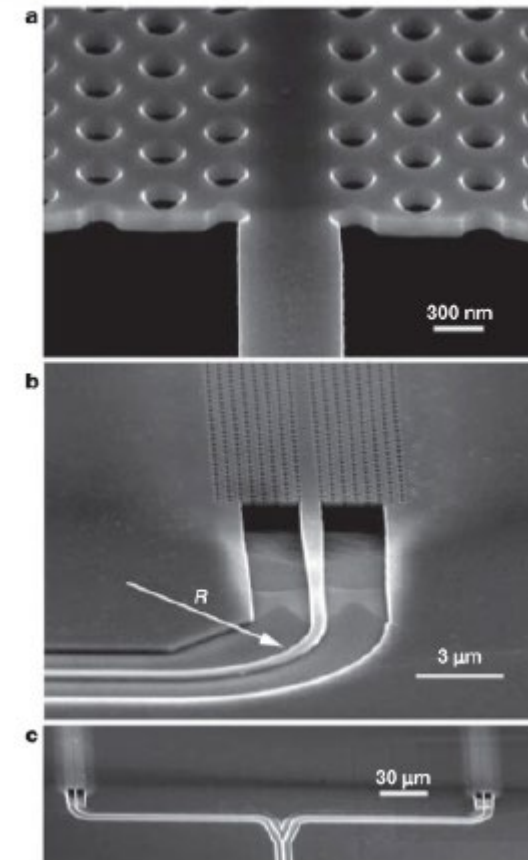
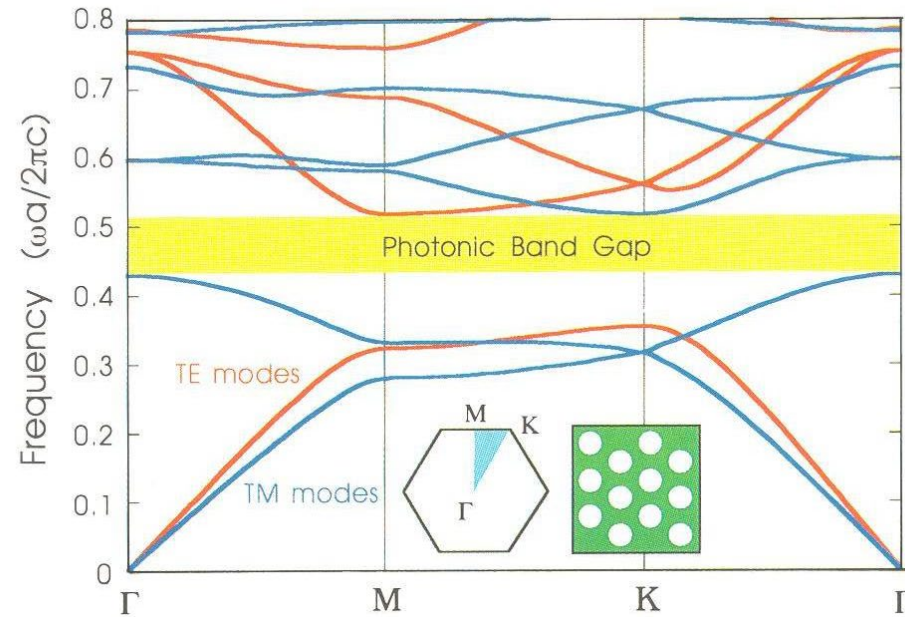
- Les modes qui se propagent dans un guide courbe sont différents des modes d'un guide droit
- Pour éviter les pertes, une succession de petits segments est préférable à une grande courbe
- Un décalage entre les sections permet d'avoir un meilleur recouvrement spatial des modes et donc une meilleure transmission



R. Osgood, S. Meng, Principles of Photonic Integrated Circuits (Springer, 2021)

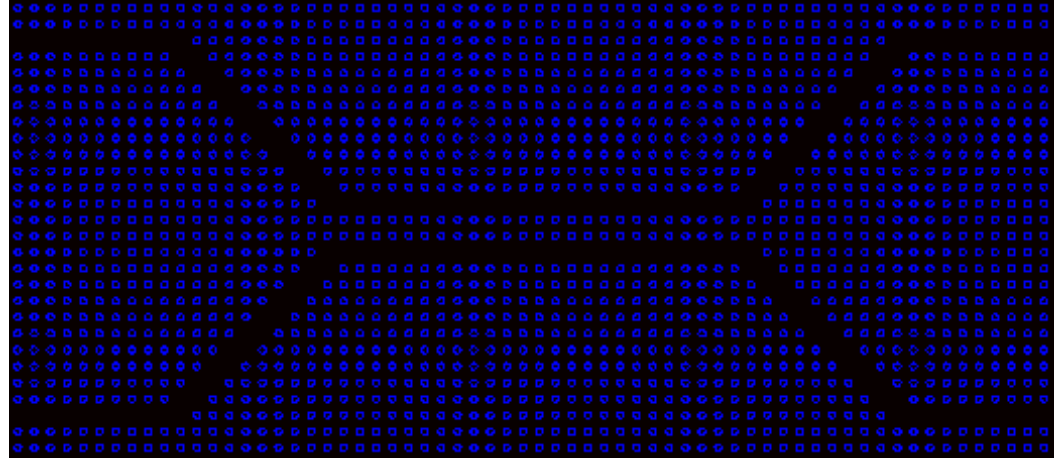
Cristaux photoniques

- 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

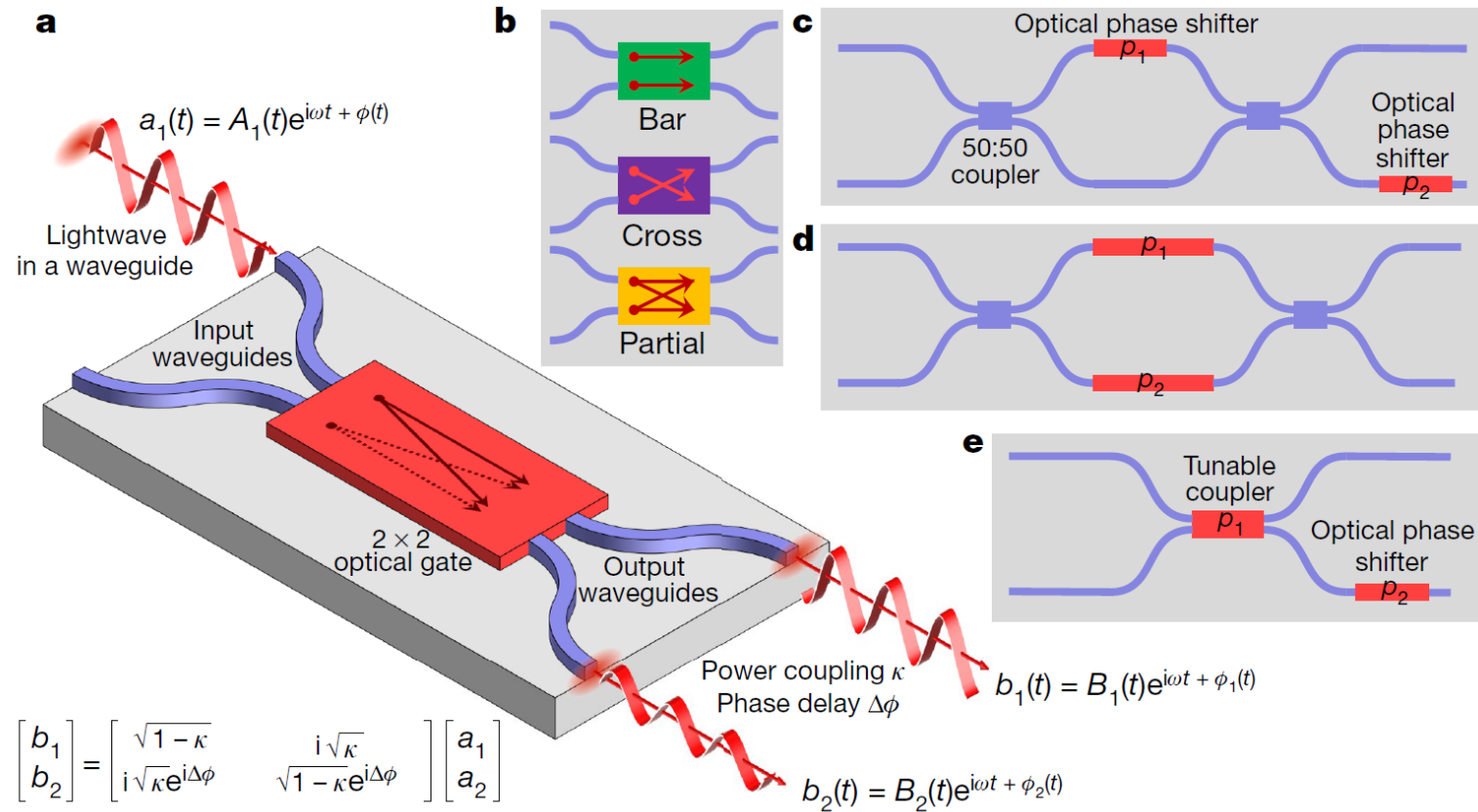
Semaine 10 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



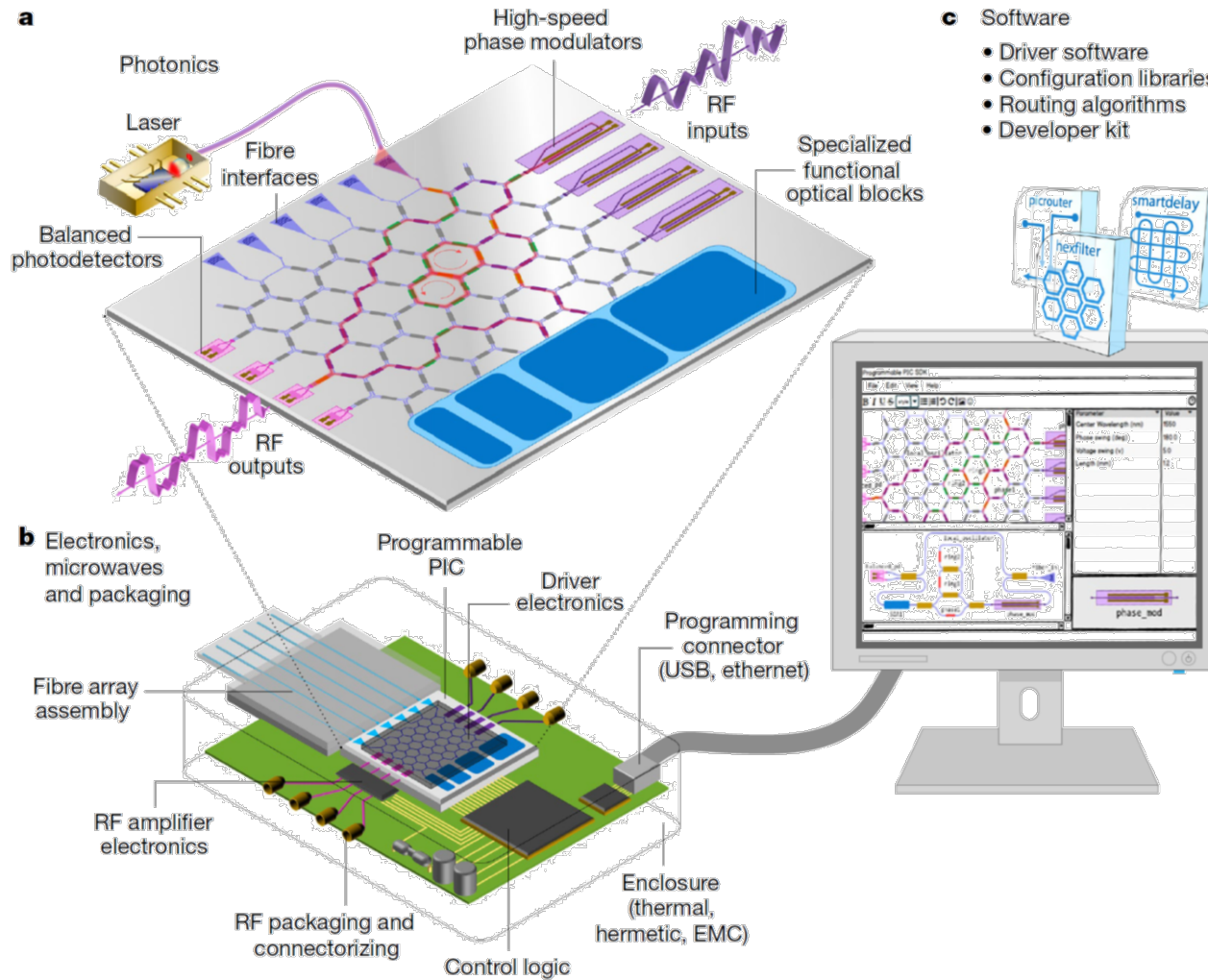
Optique intégrée

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

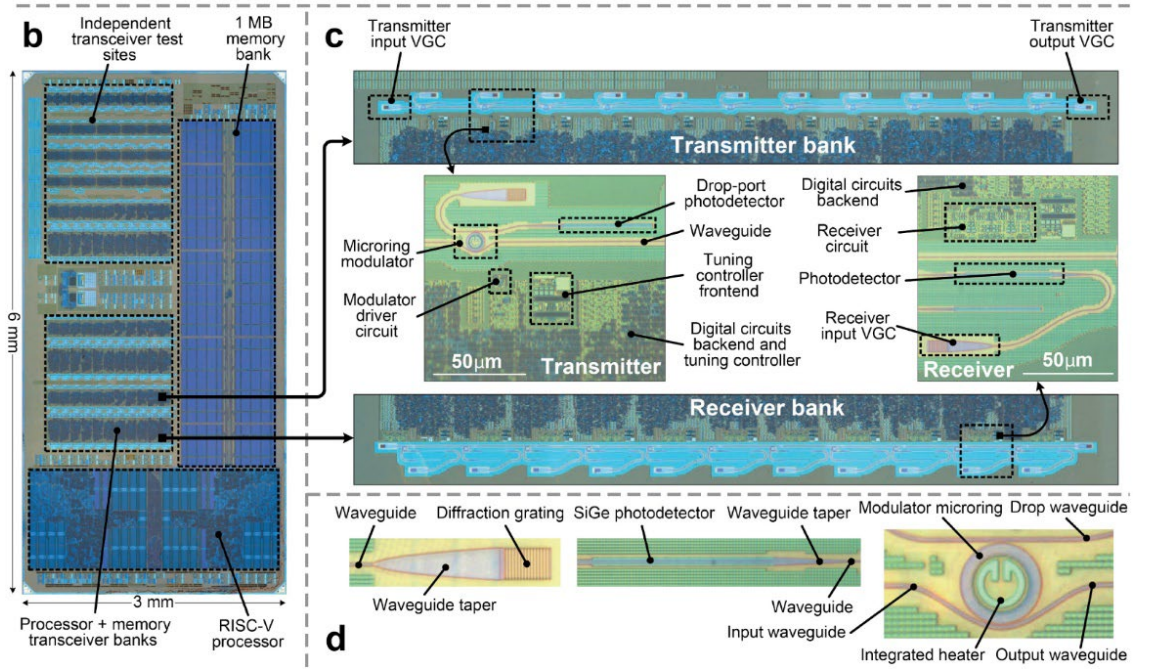
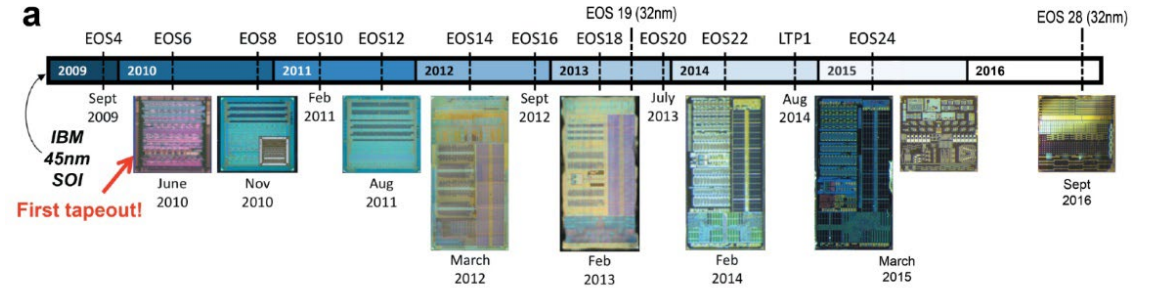
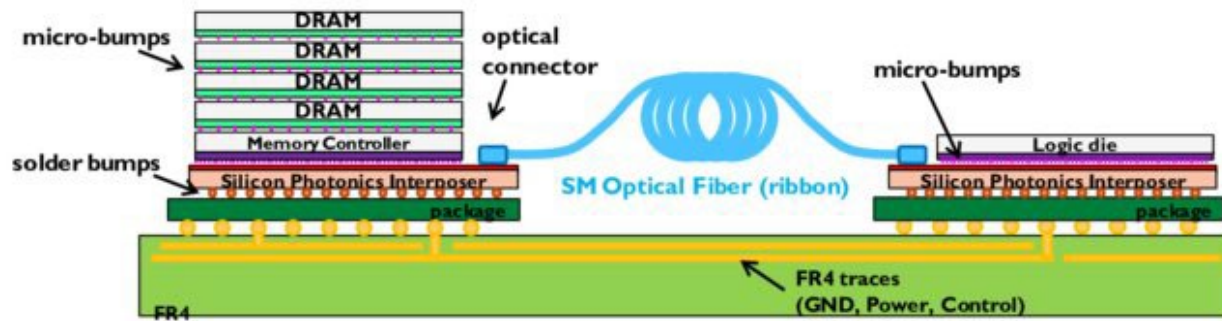
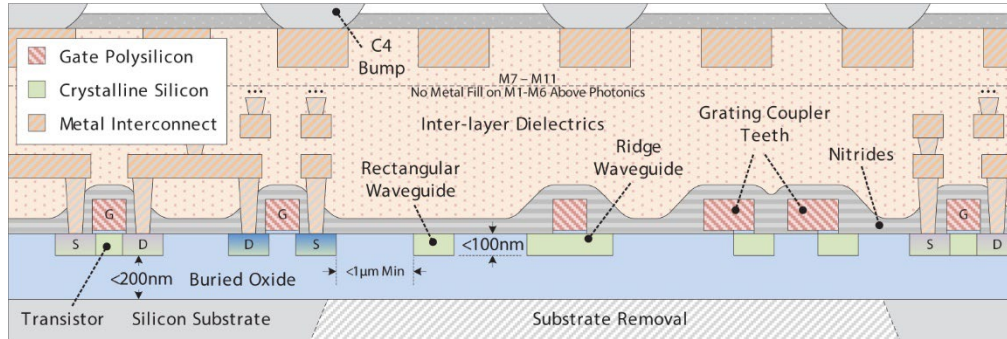


Intégration avec CMOS

- Il faut cependant toujours une couche électronique – Intégration hybride

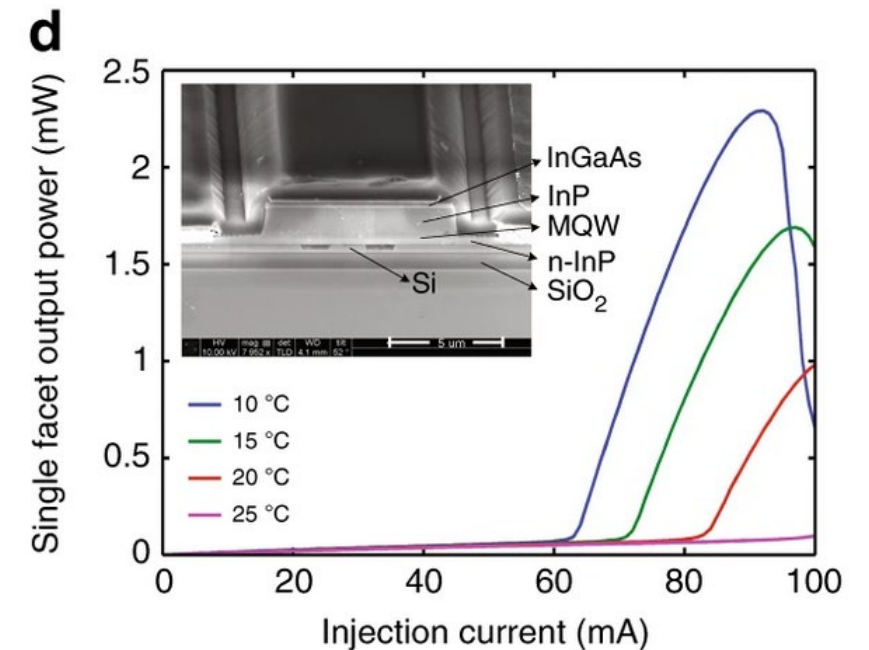
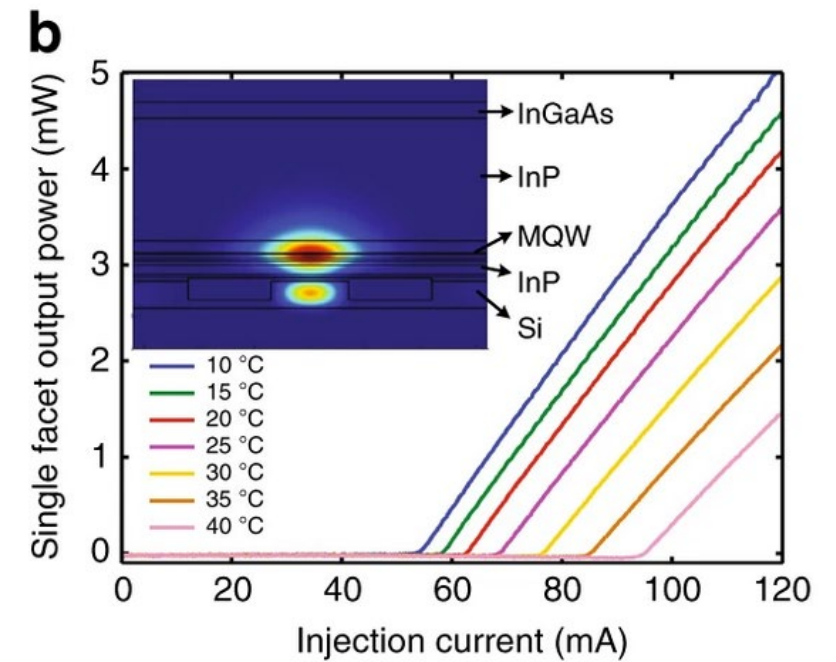
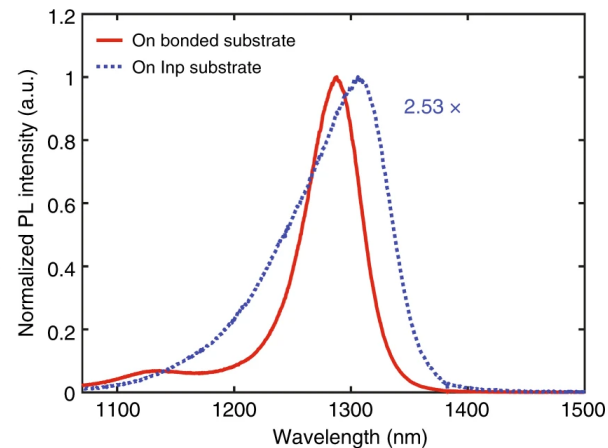
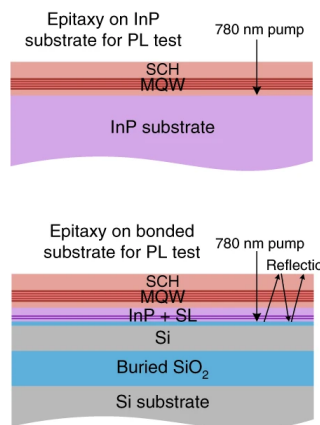
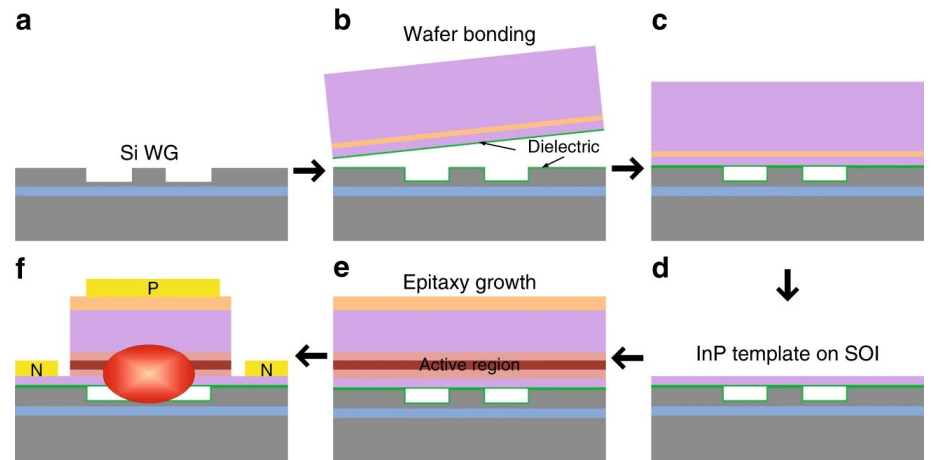


Intégration SOI – CMOS

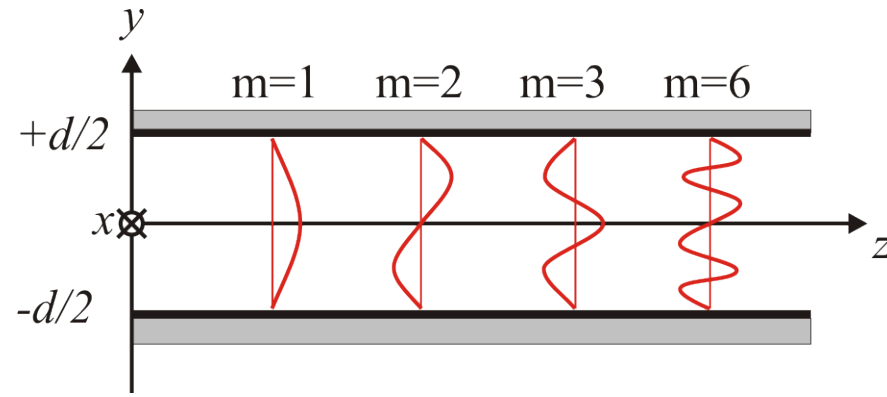


Intégration SOI – CMOS et III/V

- Permet d'intégrer des lasers sur le même chip



Modes guidés – Distribution du champ



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

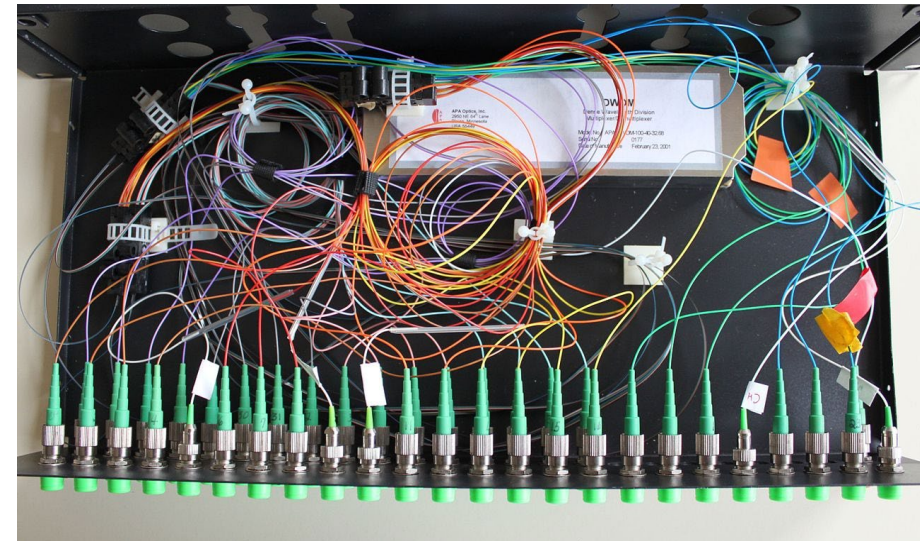
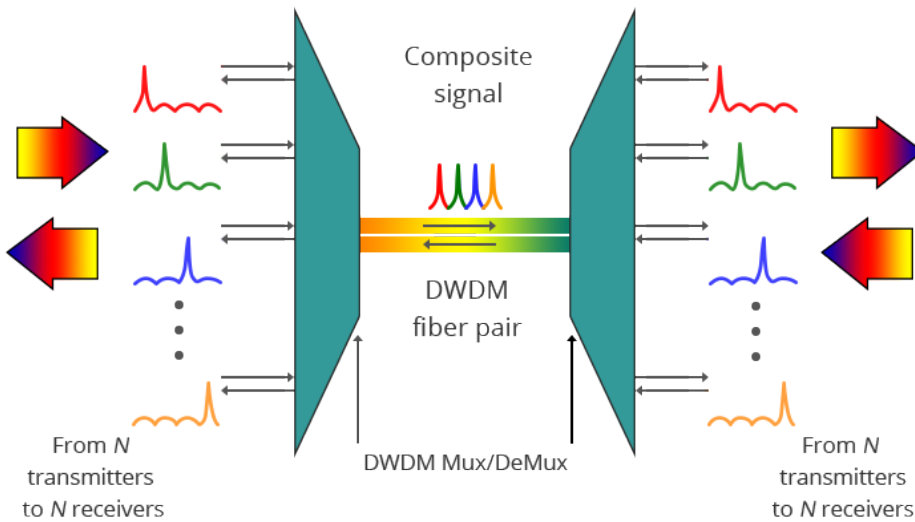
- Normalisation
$$\int_{-d/2}^{d/2} u_m^2(y) dy = 1$$

- Propriété d'orthogonalité

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

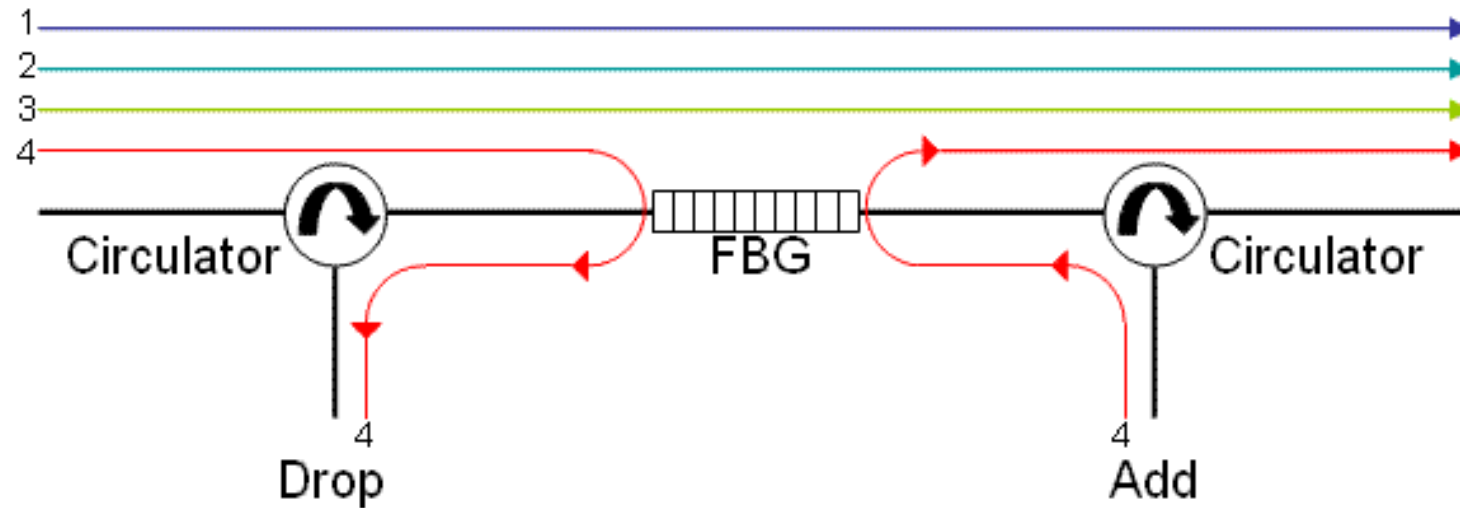
Dense wavelength division multiplexing (DWDM)

- 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)

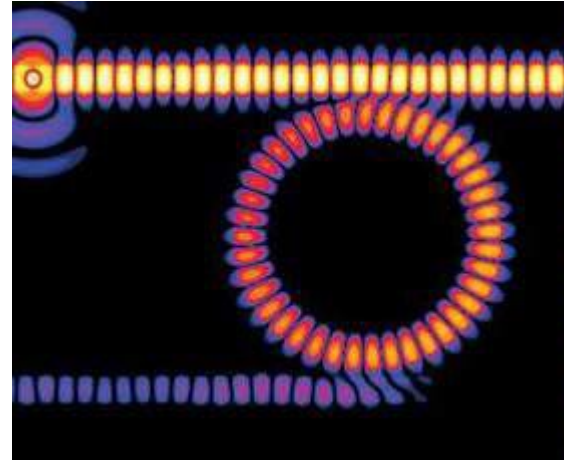
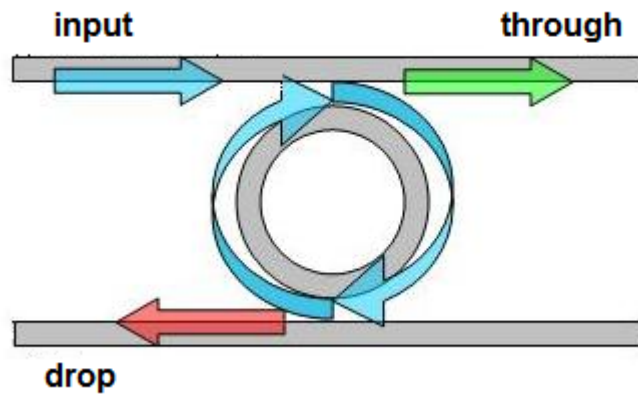
- Des systèmes de filtres interférentiels (réseau de Bragg) permettent d'extraire et/ou d'ajouter une seule longueur d'onde de la fibre optique



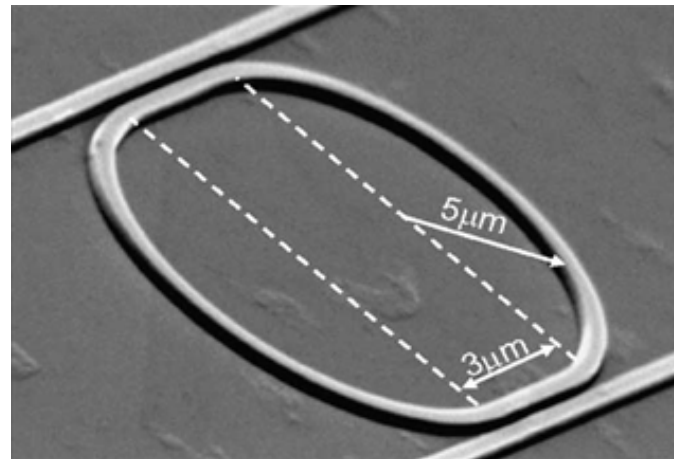
wikimedia

Couplage par cavité résonante

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



Schmid & Partners



IMEC

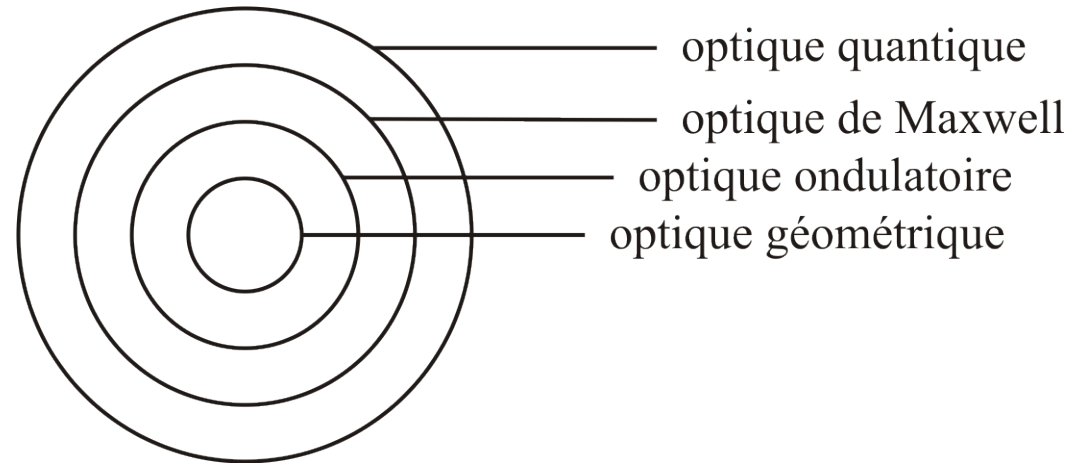
Ingénierie optique

Semaine 10 – partie 3

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

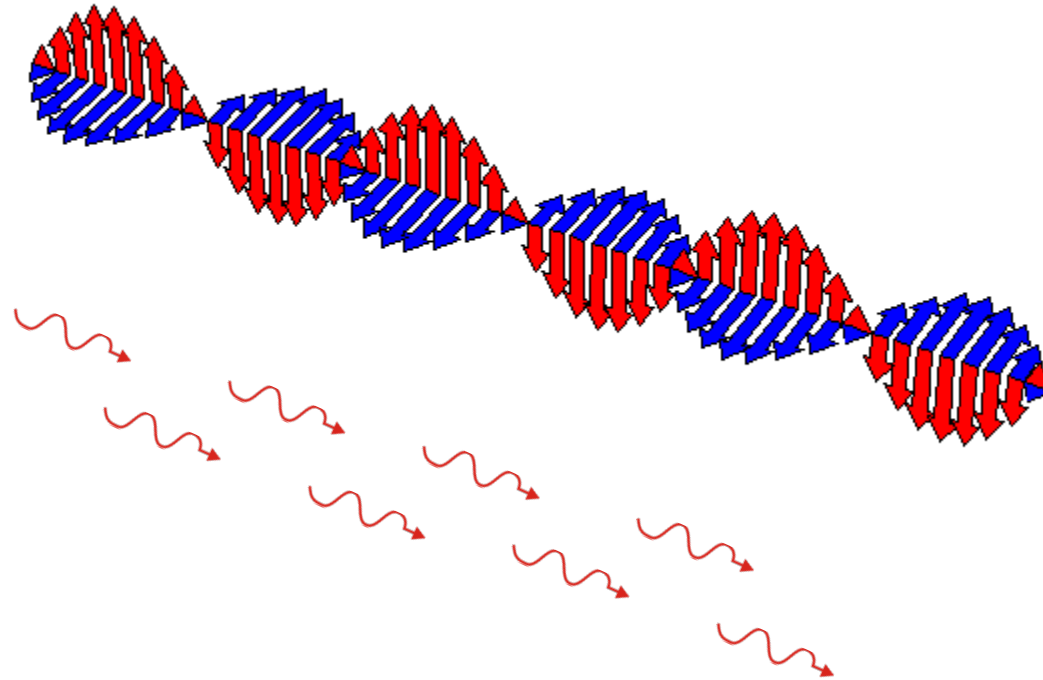
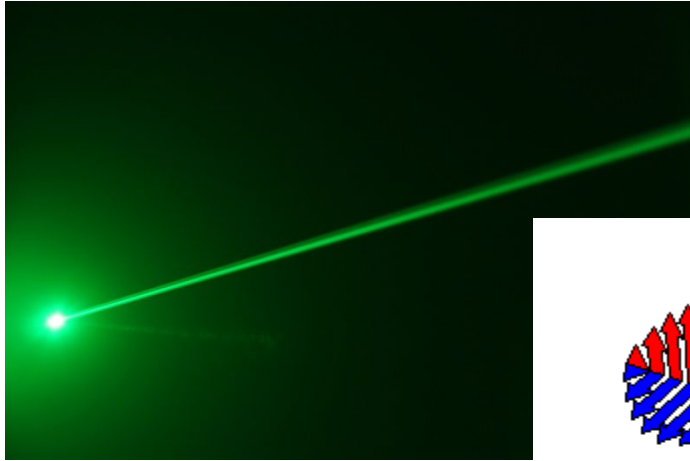


Photons



- Optique quantique: nouvelle perspective sur des phénomènes optiques déjà connus
- Théorie sous-jacente: électrodynamique quantique qui inclut la quantification des champs électromagnétiques
- Dans ce cours on se limite à une approche phénoménologique et on décrit un certain nombre de phénomènes

Rayon – onde – particule



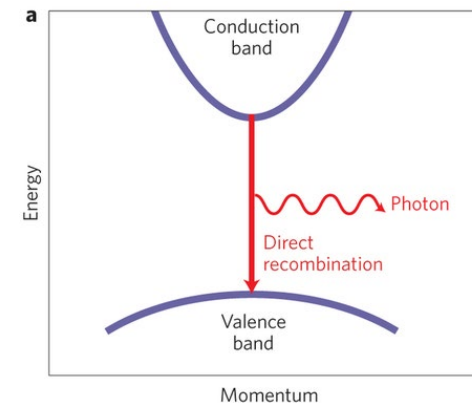
Le photon

- Energie: $E = h\nu = \hbar\omega$ $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Js.
- Constante de Planck réduite, $\hbar = h/2\pi$.
- L'énergie du photon dépend de la fréquence correspondante:
 - photon infrarouge ($\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$, $\nu = 3 \cdot 10^{14}$ Hz):

$$h\nu = 1.99 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1.24 \text{ eV}$$

- énergie acquise par un électron dans une différence de potentiel de 1.24 V
- relation très utile:

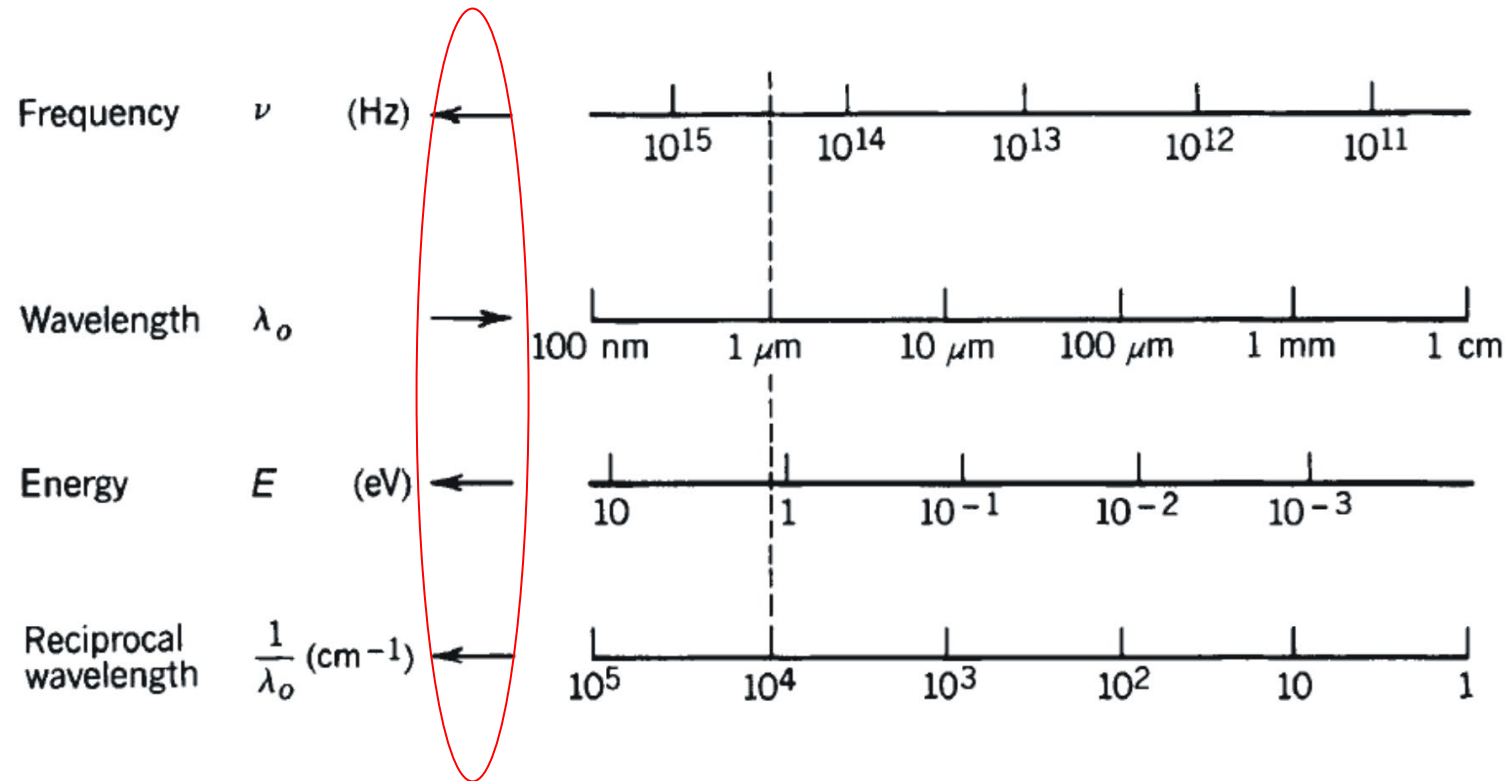
$$E(\text{eV}) \lambda_0(\mu\text{m}) \approx 1.24$$



- par exemple: GaAs bandgap $E = 1.43 \text{ eV} \rightarrow \lambda_0 = 870 \text{ nm}$

Le photon

- Différentes échelles d'énergie:

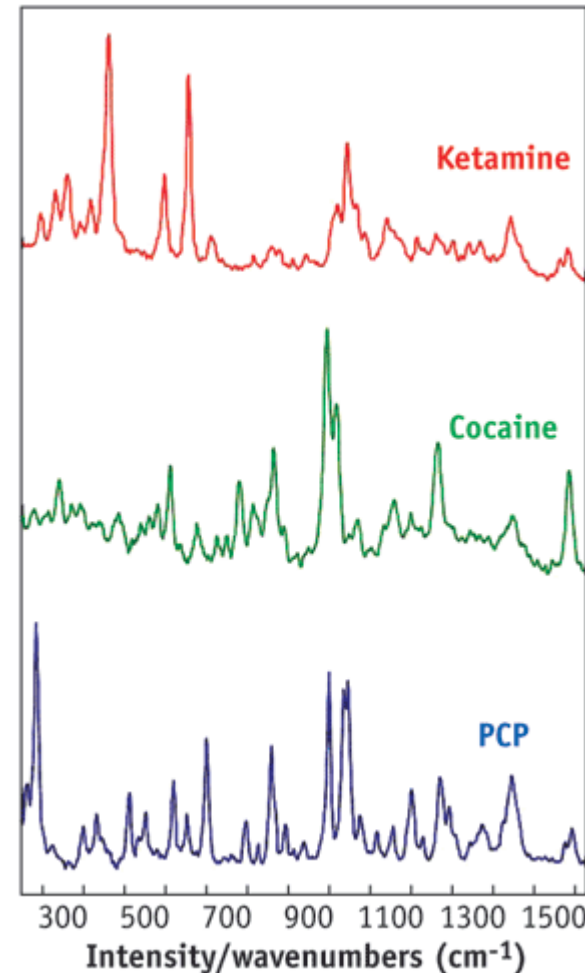


Le photon

- L'énergie du photon dépend de la fréquence:
 - photon micro-onde ($\lambda_0 = 1 \text{ cm}$): $h\nu = 1.24 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$

- Unités d'énergie spectroscopiques: cm^{-1}
 - $1 \text{ cm}^{-1} \longrightarrow 1.24/10'000 \text{ eV}$
 - $1 \text{ eV} \longrightarrow 8068.1 \text{ cm}^{-1}$

- Même si on l'utilise comme unité, la longueur d'onde dépend du milieu (on fait donc référence à la longueur d'onde dans le vide); l'énergie (ou la fréquence) par contre ne dépendent pas du milieu



Ingénierie optique

Semaine 10 – partie 4

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Le photon

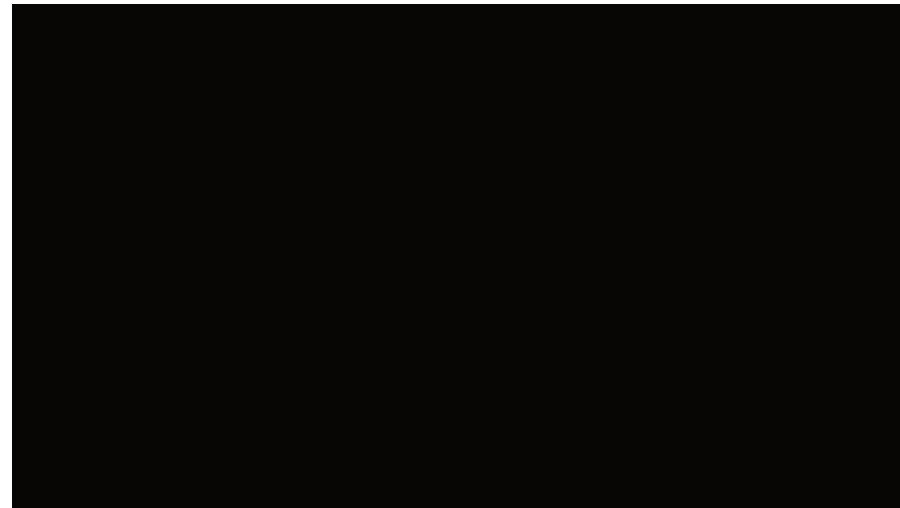
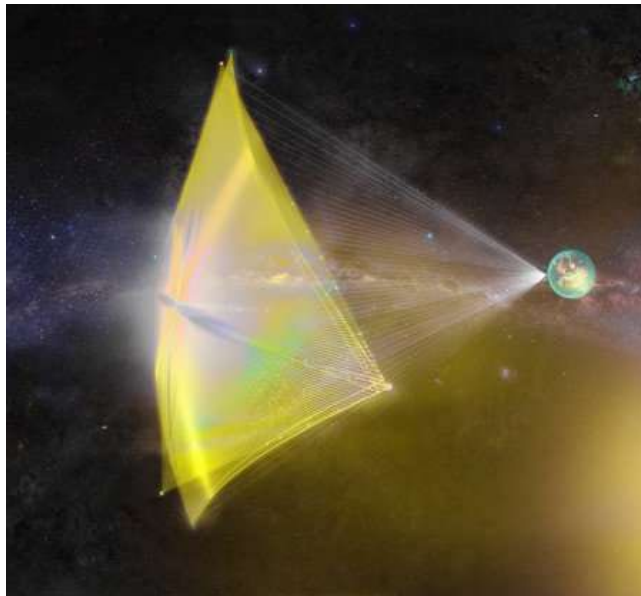
- Pas de masse...
- ... mais une quantité de mouvement! $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$
- En utilisant $p = \hbar k = \hbar\omega/c = \hbar 2\pi/\lambda$, $E = h\nu = \hbar\omega$ et $\hbar = h/2\pi$.

$$p = E/c = h/\lambda$$

- Cette quantité de mouvement peut être transférée à un objet de masse finie
 - pression de radiation
 - pincettes optiques (optical tweezer)
 - piégage optique (optical trapping)

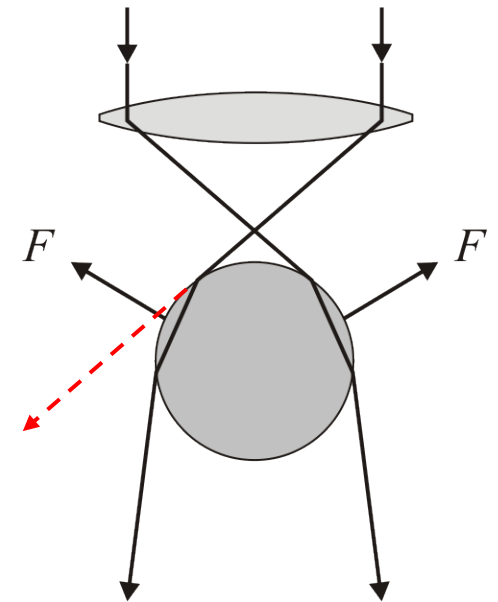
Pression de radiation – Breakthrough starshot sail program

- Une série de petits “vaisseaux” à voile que l’on lance depuis la stratosphère et auxquels on donne une vitesse initiale à l’aide d’une série de lasers terrestres
- Une fois mis en mouvement, chaque vaisseau doit pouvoir poursuivre sa route pendant des années, en évitant les collisions avec d’autres objets célestes
- Objectif: atteindre Alpha Centauri après 4.37 années de vol à $0.2 c_0$
- Challenges: matériau, illumination, etc..



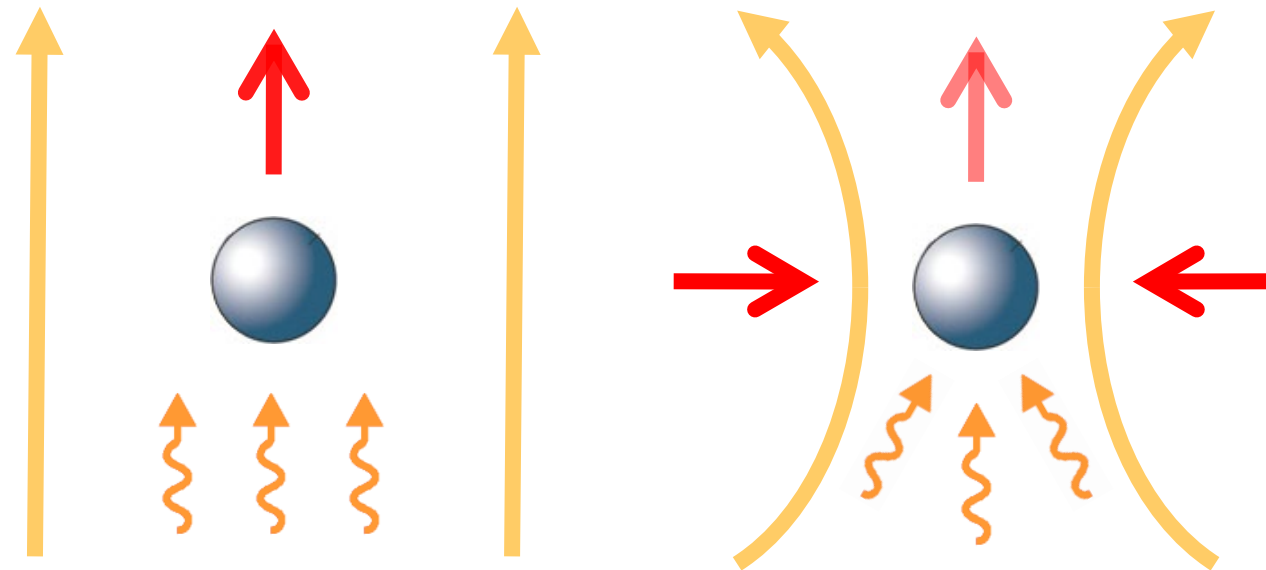
Piégeage optique

- La pression de radiation d'une onde plane permet de pousser des objets
- Un faisceau focalisé permet de piéger des objets
- Cette force optique peut se comprendre en considérant la réfraction et en utilisant le principe action \leftrightarrow réaction: la particule est attirée vers le centre du faisceau et la force de gravité peut être compensée
- La particule peut aussi être manipulée latéralement en déviant le faisceau
- Il y a donc deux types de forces optiques:
 - La pression de radiation (transfert "direct" de la quantité de mouvement du photon): champ homogène
 - La force liée au gradient du champ électrique, qui nécessite un champ inhomogène



Piégeage optique

- Pour pouvoir piéger une particule latéralement, il faut une variation spatiale du champ optique (champ inhomogène, focalisé):



Champ homogène

Champ focalisé

λ

Sphère de rayon a
Indice de réfraction n_1 ,
dans un milieu d'indice n_0

$$\mathbf{F}(x, y, z) = 2\pi n_0^2 \epsilon_0 a^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \nabla E^2(x, y, z)$$

$$m = n_1 / n_0$$

Piégeage optique

- Manipulation non-invasive à l'échelle du nanomètre avec des forces de l'ordre du pN (10^{-12} N)

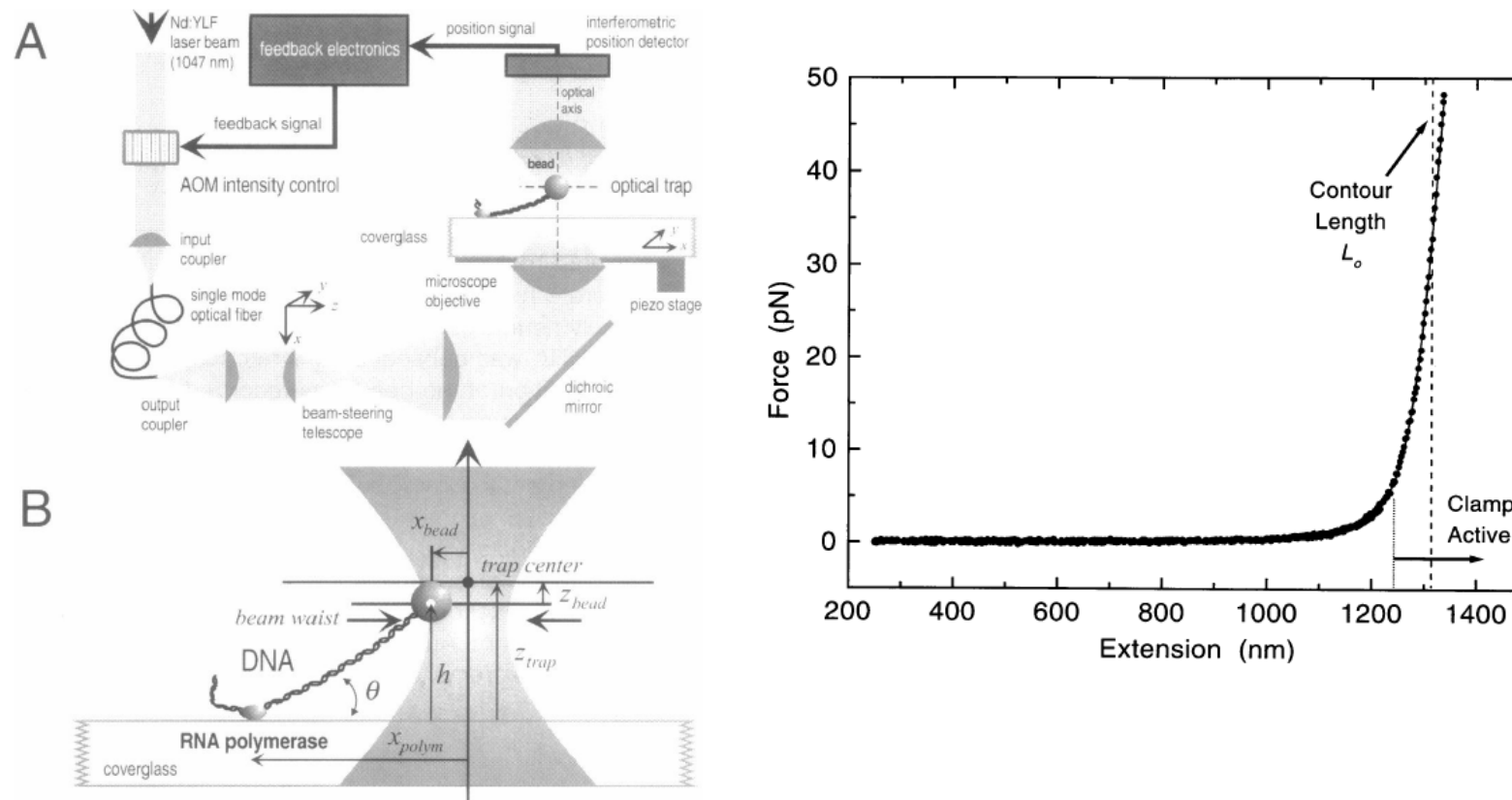
Biophysical Journal Volume 72 March 1997 1335-1346

1335

Stretching DNA with Optical Tweezers

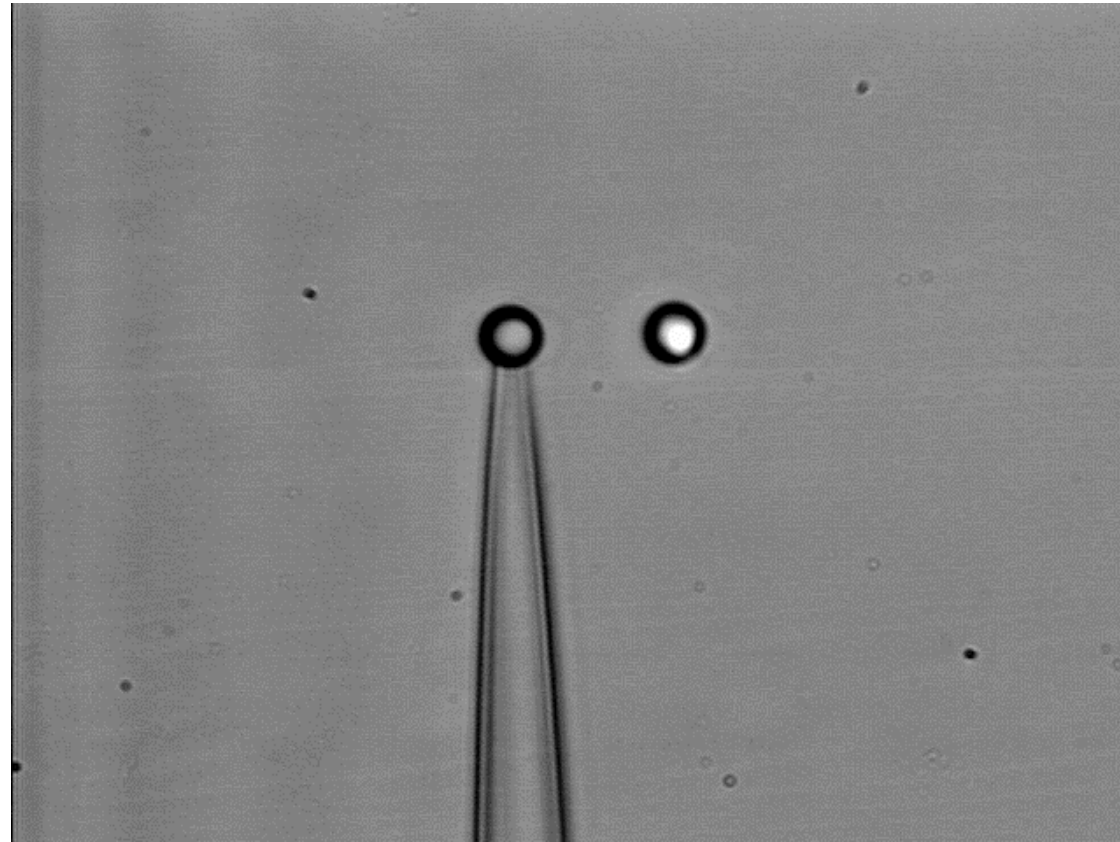
Michelle D. Wang,^{*} Hong Yin,[#] Robert Landick,[§] Jeff Gelles,[#] and Steven M. Block^{*}

^{*}Department of Molecular Biology, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544; [#]Department of Biochemistry, Brandeis University, Waltham, Massachusetts 02254; and [§]Department of Bacteriology, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706 USA



Piégeage optique

- Mesure de l'élasticité d'un brin d'ADN reliant deux sphères (une des sphères est attachée à une pipette, l'autre est piégée par la lumière)

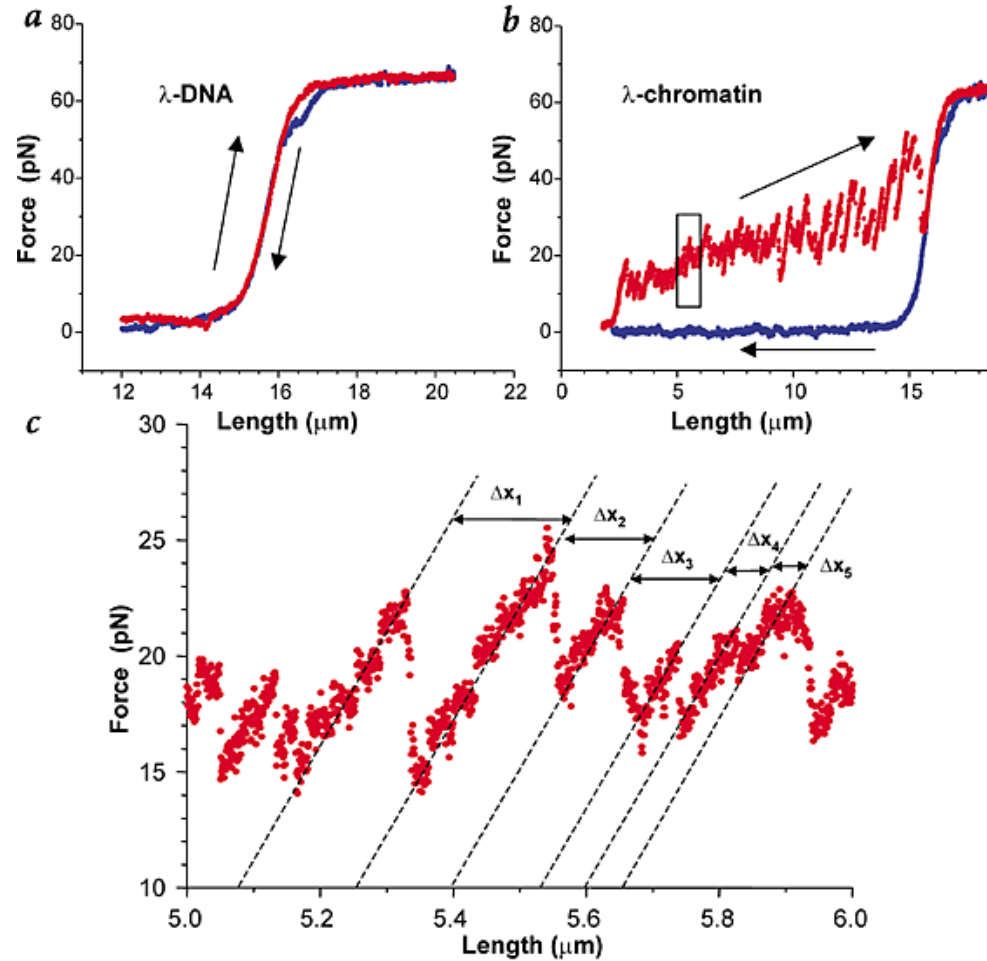
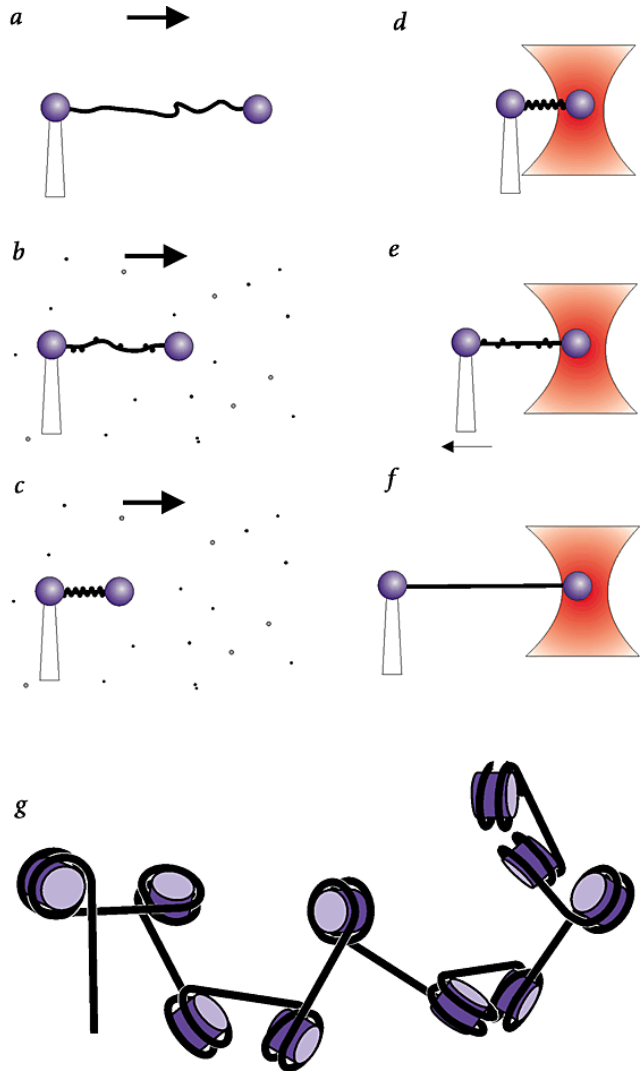


Northwestern University

Piégeage optique – Débobinage de l'ADN

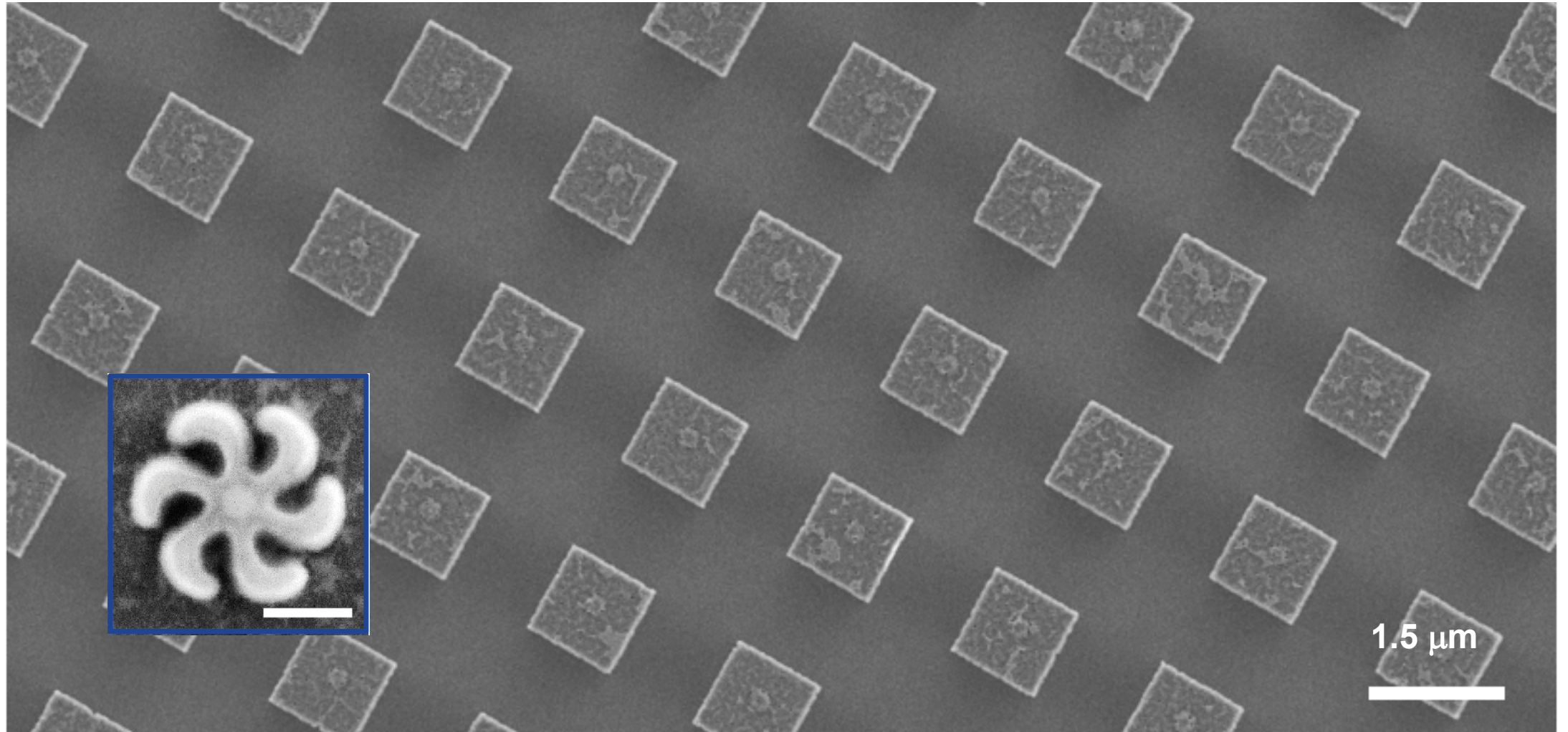
Nature Structural Biology 8, 606 - 610 (2001) doi:10.1038/89646

Unfolding individual nucleosomes by stretching single chromatin fibers with optical tweezers



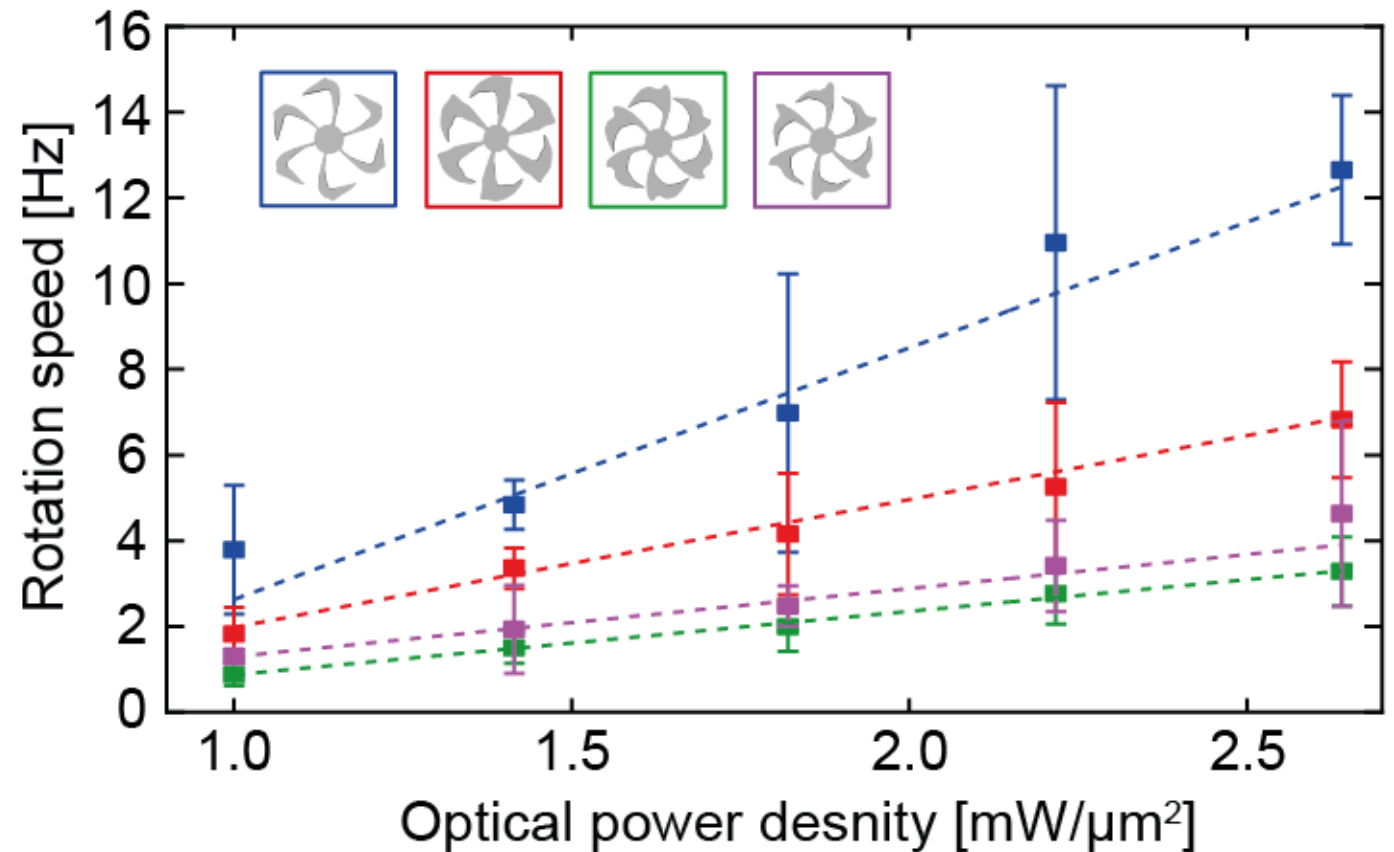
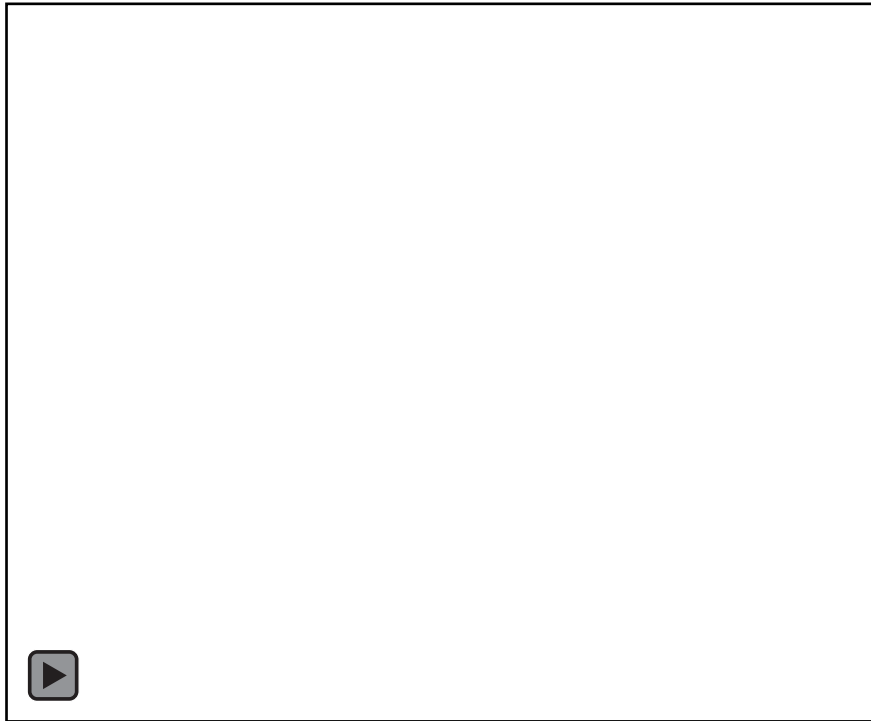
Nanomoteur optique

- Nanostructure en or (100 nm) intégrée dans un bloc de verre (1 μm)



Nanomoteur optique

- Nanostructure en or (100 nm) intégrée dans un bloc de verre (1 μm)
- Lorsqu'on illumine le nanomoteur avec de la lumière il commence à tourner
- Plus l'intensité lumineuse augmente, plus il tourne vite



Nanomoteur optique

- Les effets liés à la polarisation peuvent être très complexes
- Par exemple, une illumination avec une polarisation linéaire crée ici le mouvement de rotation!
- Et le moment de force induit ne dépend pas de l'orientation de la polarisation incidente → dès que la nanostructure est éclairée, elle se met à tourner et le mouvement ne s'arrête pas tant qu'il y a illumination

