

Ingénierie optique

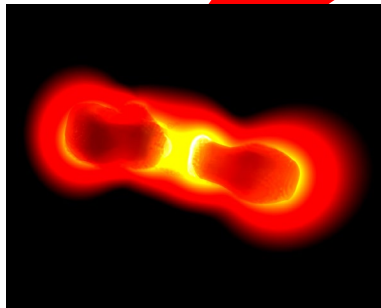
Semaine 1 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

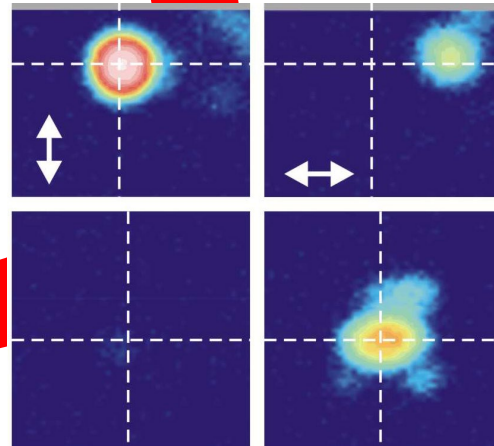
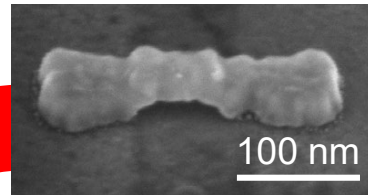


Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

Simulations



Nanofabrication



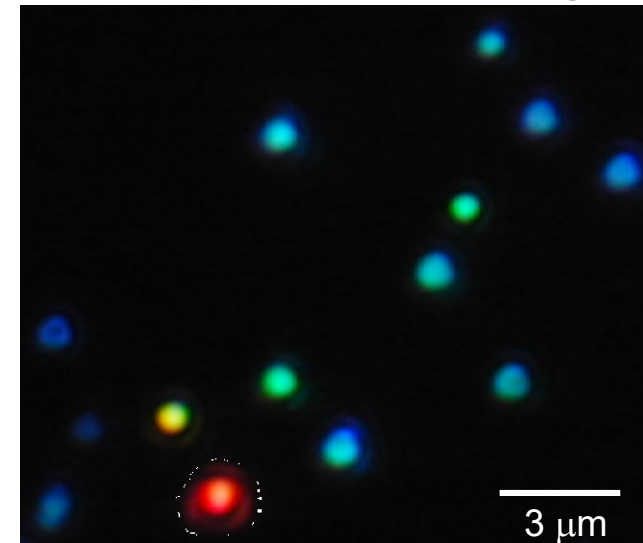
Caractérisation optique



Lingot d'argent

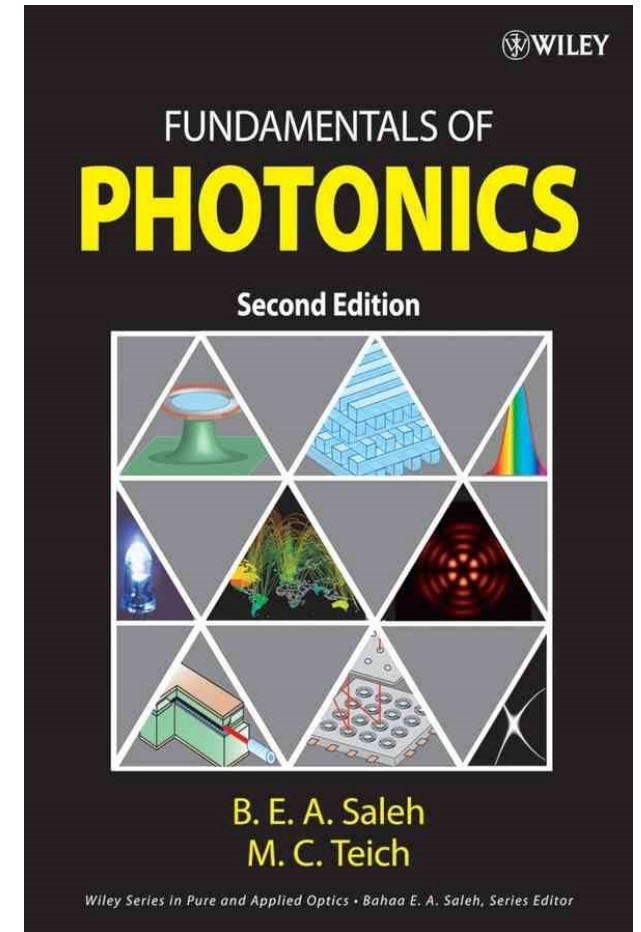


Nanostructures d'argent



Ingénierie optique – Introduction au cours

- Objectif: donner des notions d'optique moderne en mettant l'accent sur des applications via les travaux pratiques, tout en utilisant un formalisme précis
- Trois composantes: cours + exercices + TPs (pour MT)
- Polycopié:
 - Contient l'entier de la matière et des détails supplémentaires, à disposition sur moodle
- Moodle:
 - Clé d'inscription "Snell"
 - Exercices + solutions
 - Polycopié
 - Powerpoints (sans/avec annotations)
 - Vidéos après chaque cours
 - Ed Discussion
 - Bibliographie, en particulier *Fundamentals of photonics* de Saleh & Teich
- Deux Moodles séparés: un pour les cours + exercices et un pour les TPs



Travaux pratiques (MT)

- Prof. Karim Achouri
- 8 expériences:
 - Imaging
 - Detector noise
 - Sources
 - Diffraction
 - Aberrations
 - Interferometer
 - Multimode fibre
 - Spectrometer

- Articulation sur 6 séances:

Group A1	Group A2
Group B1	Group B2
Group C1	Group C2

Day	Date	TP No	13h-16h	16h-19h
Thursday	26.9	1	A1	A2
Friday	27.9		B1	B2
Thursday	3.10		C1	C2
Friday	4.10	2	A1	A2
Thursday	10.10		B1	B2
Friday	11.10		C1	C2
Thursday	17.10	3	A1	A2
Friday	18.10		B1	B2
Thursday	31.10		C1	C2

- Matériel à étudier avant la séance:
résumé de l'expérience, théorie, video
 - Advance report
 - Report
- } note

Travaux pratiques (MT)

- Reports:
 - Marqués sur 50 pts
- Advance report:
 - Marqués sur 12-15 pts suivant l'expérience (schematics, goal of experiment, theory)
 - Bonne préparation pour être efficace le jour du TP
- Note finale pour les TPs: somme des points pour tous les rapports, celles et ceux qui ont le maximum ont 6.0

- Articulation sur 6 séances:

Group A1	Group A2
Group B1	Group B2
Group C1	Group C2

Day	Date	TP No	13h-16h	16h-19h
Thursday	26.9	1	A1	A2
Friday	27.9		B1	B2
Thursday	3.10		C1	C2
Friday	4.10	2	A1	A2
Thursday	10.10		B1	B2
Friday	11.10		C1	C2
Thursday	17.10	3	A1	A2
Friday	18.10		B1	B2
Thursday	31.10		C1	C2

- Matériel à étudier avant la séance: résumé de l'expérience, théorie, video
 - Advance report
 - Report
- } note

Ingénierie optique – Examen

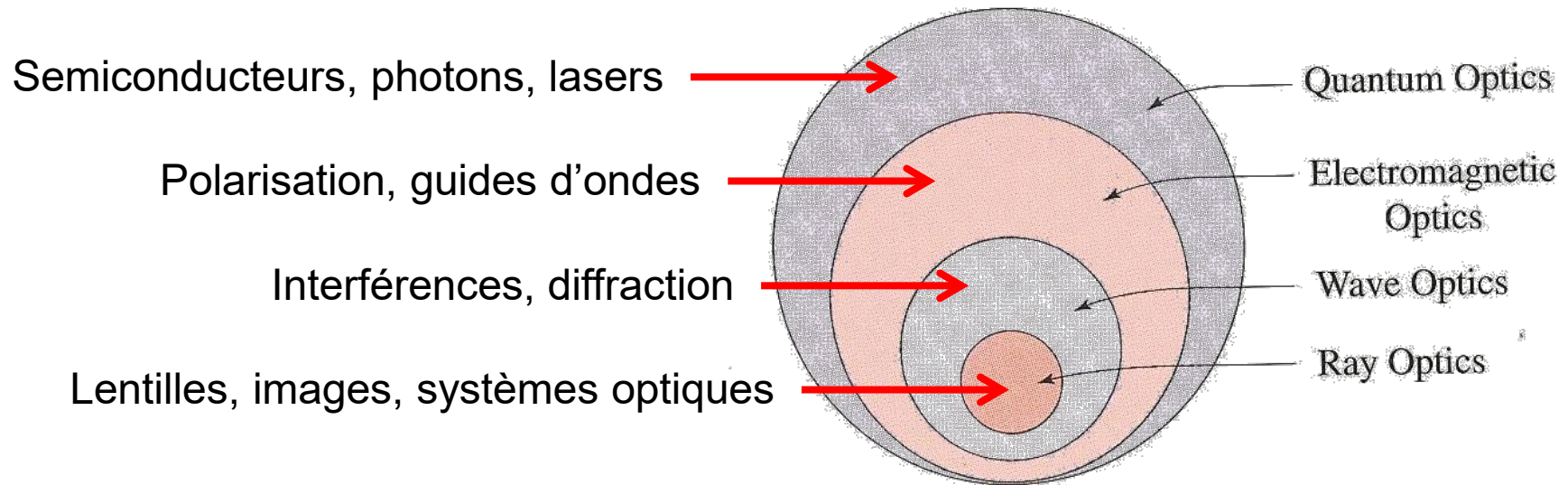
- Durant la session de janvier
- 2 heures
- Toute la matière du cours et les exercices
- Pour l'examen, les étudiants ont droit aux documents suivants:
 - Un résumé manuscrit du cours sur deux feuilles A4 recto-verso (4 pages en tout)
 - Un formulaire mathématique (livre)
 - Une calculatrice de poche
- Notes basées sur la performance de la classe
- Pour les étudiants qui font les TPs, la note finale est la moyenne des notes de l'examen et des TPs

Ingénierie optique

- Attention pour MT: il s'agit d'un gros bloc correspondant à 6 ECTS, soit 6 heures de travail hebdomadaire à l'EPFL **plus** 6 heures de travail supplémentaire individuel ☹
- Les exercices sont particulièrement importants pour bien maîtriser la matière et réussir l'examen
- Corrigés à disposition sur Moodle, discussion lors de la séance suivante ou sur Ed Discussion, n'hésitez-pas à poser/poster des questions et à profiter des assistants!

Optique – Menu du cours

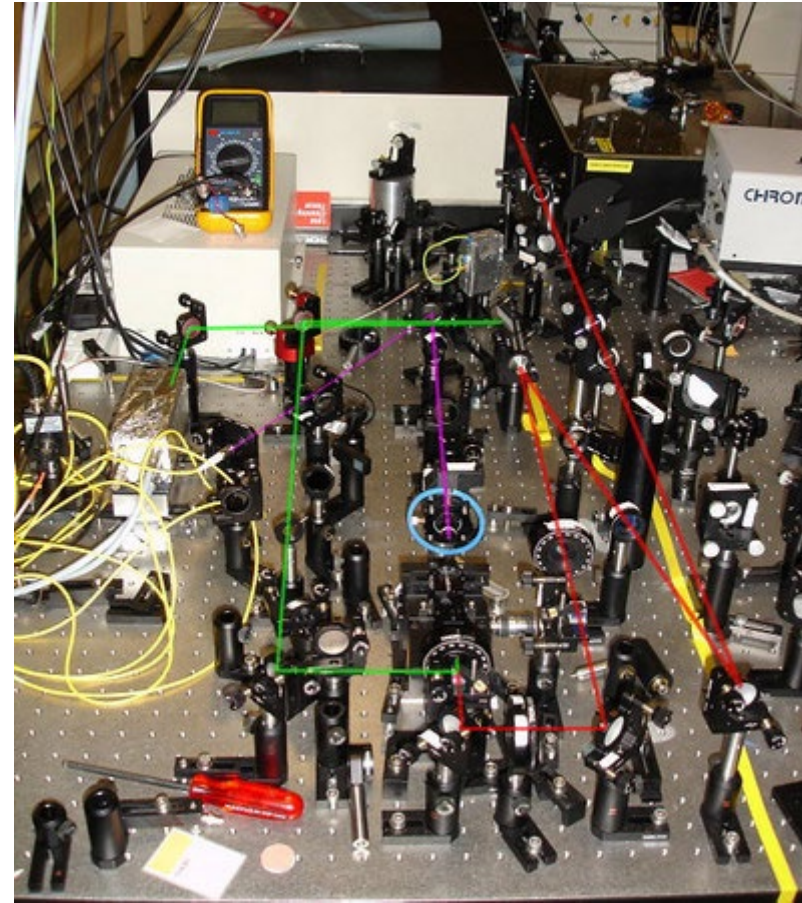
- Chaque chapitre de l'optique permet d'étudier des phénomènes nouveaux



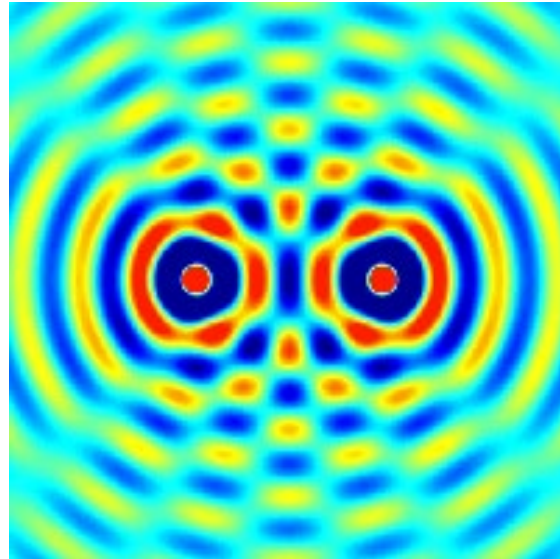
Menu du cours – Optique géométrique



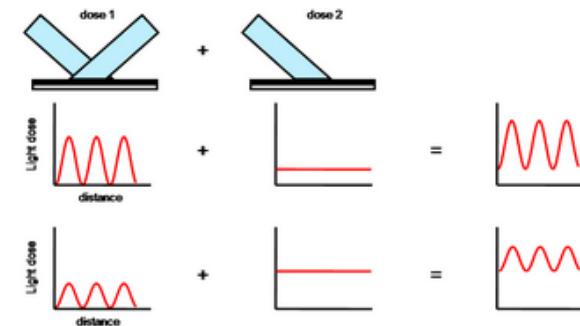
Microscope de Galilée (1609)



Menu du cours – Optique ondulatoire



wikipedia



UVII-HS Resist, 230 nm lines on 500 nm pitch

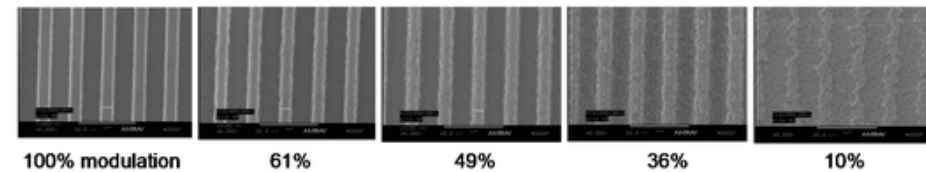
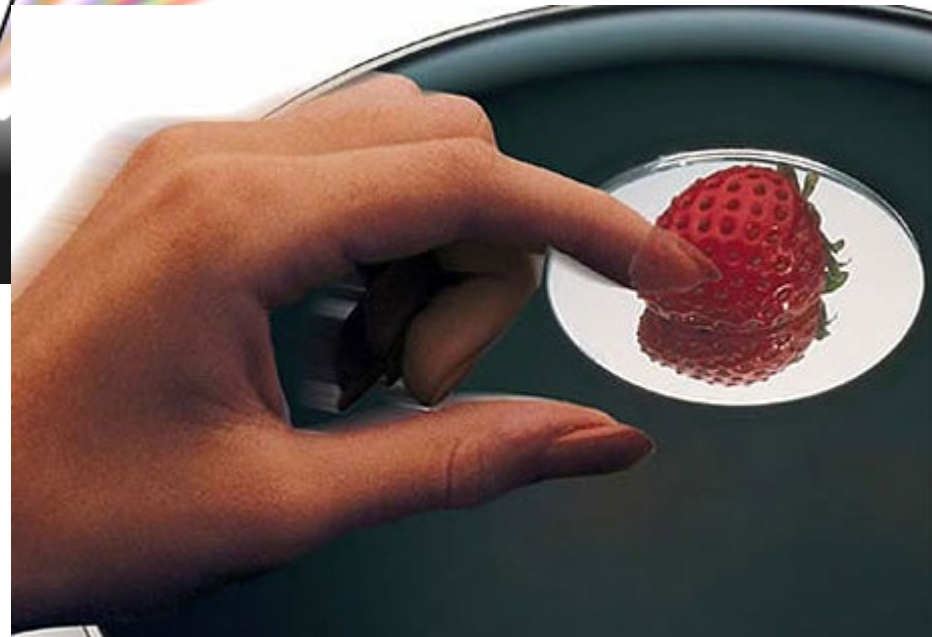
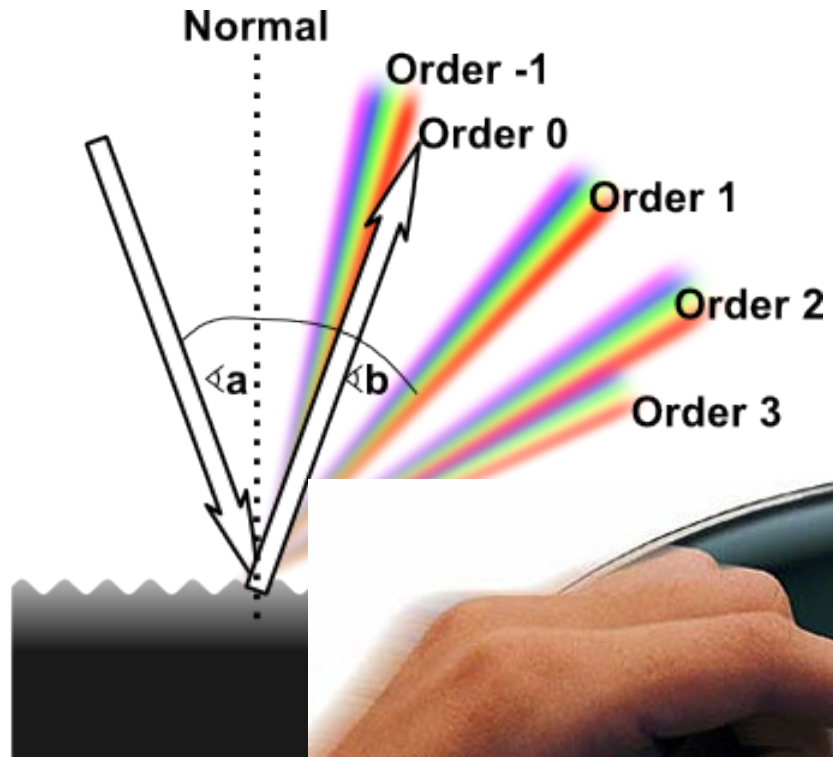
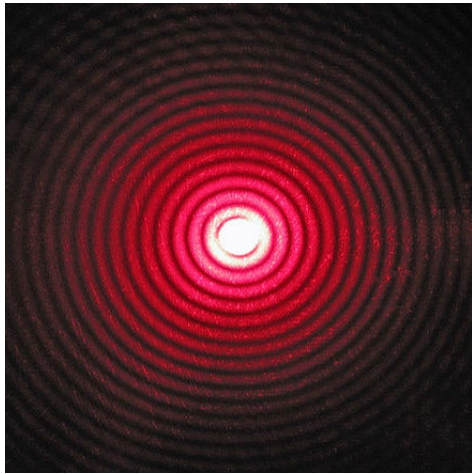


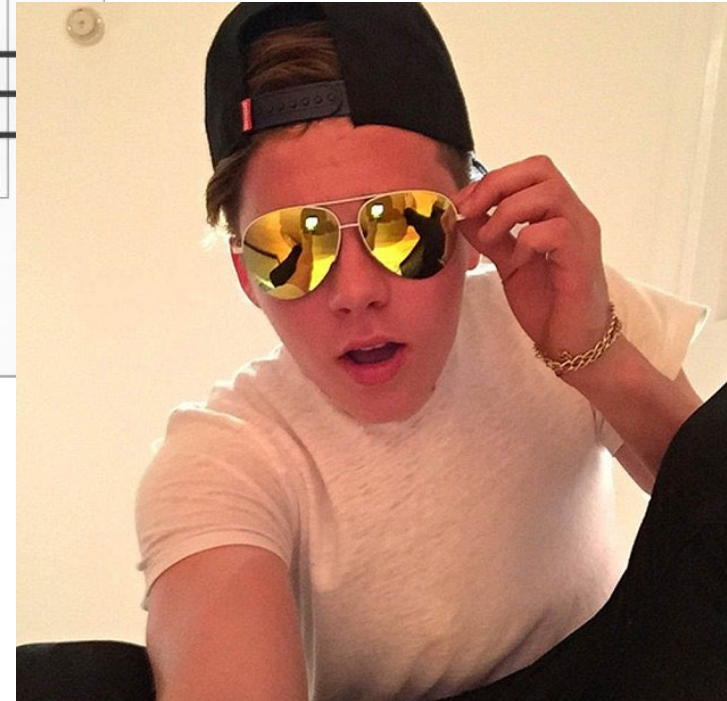
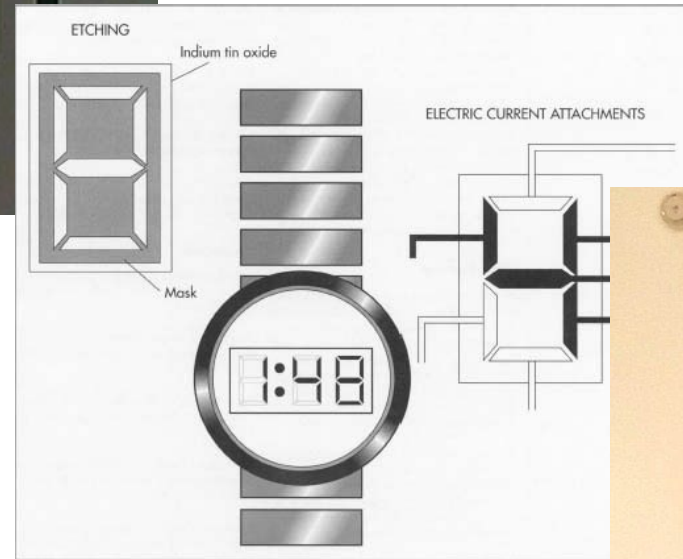
Figure 2. Control of aerial image contrast in interferometric lithography to test resist LER response

IBM Research Almaden

Menu du cours – Optique de Fourier



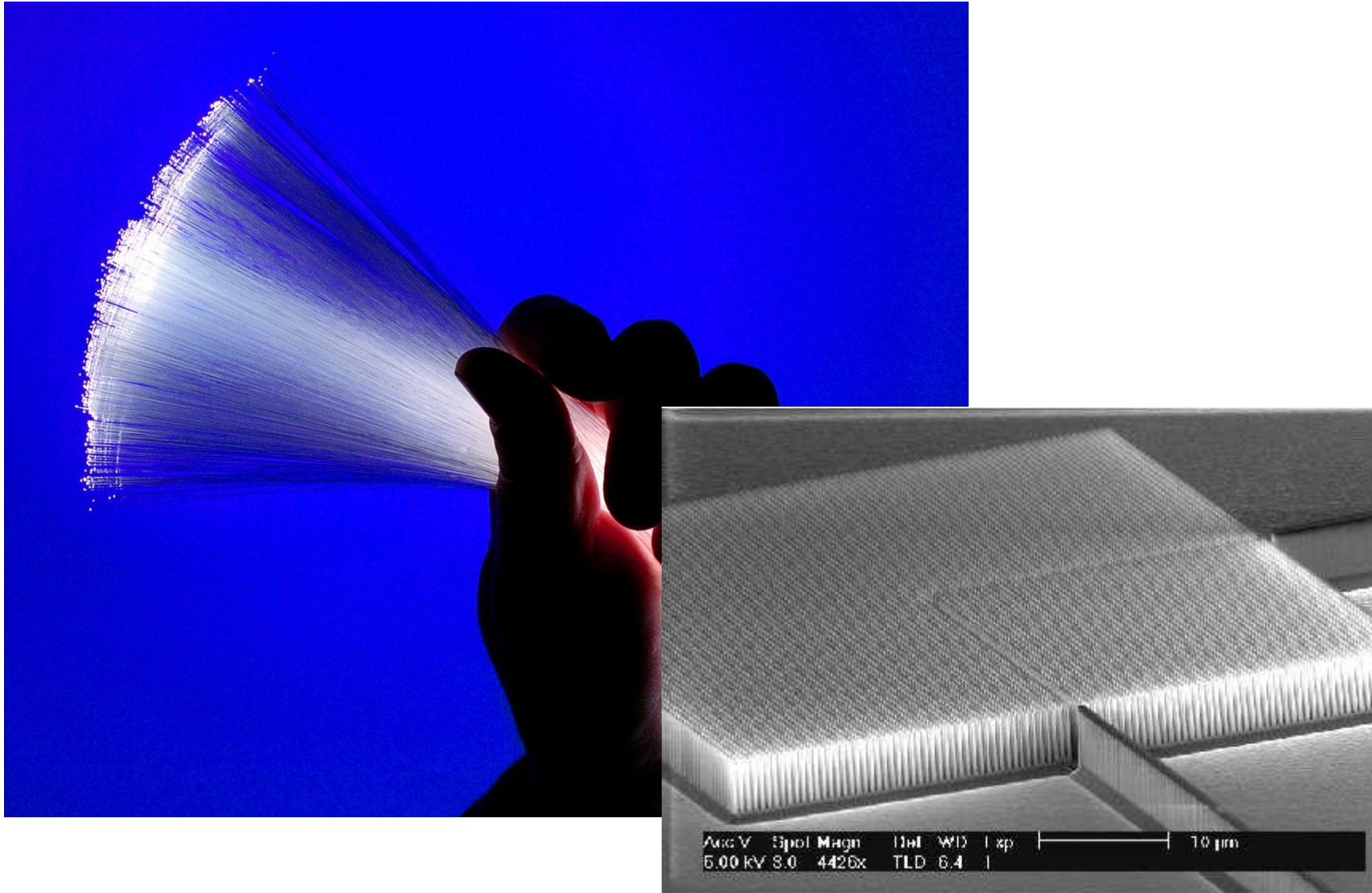
Menu du cours – Optique de Maxwell, polarisation



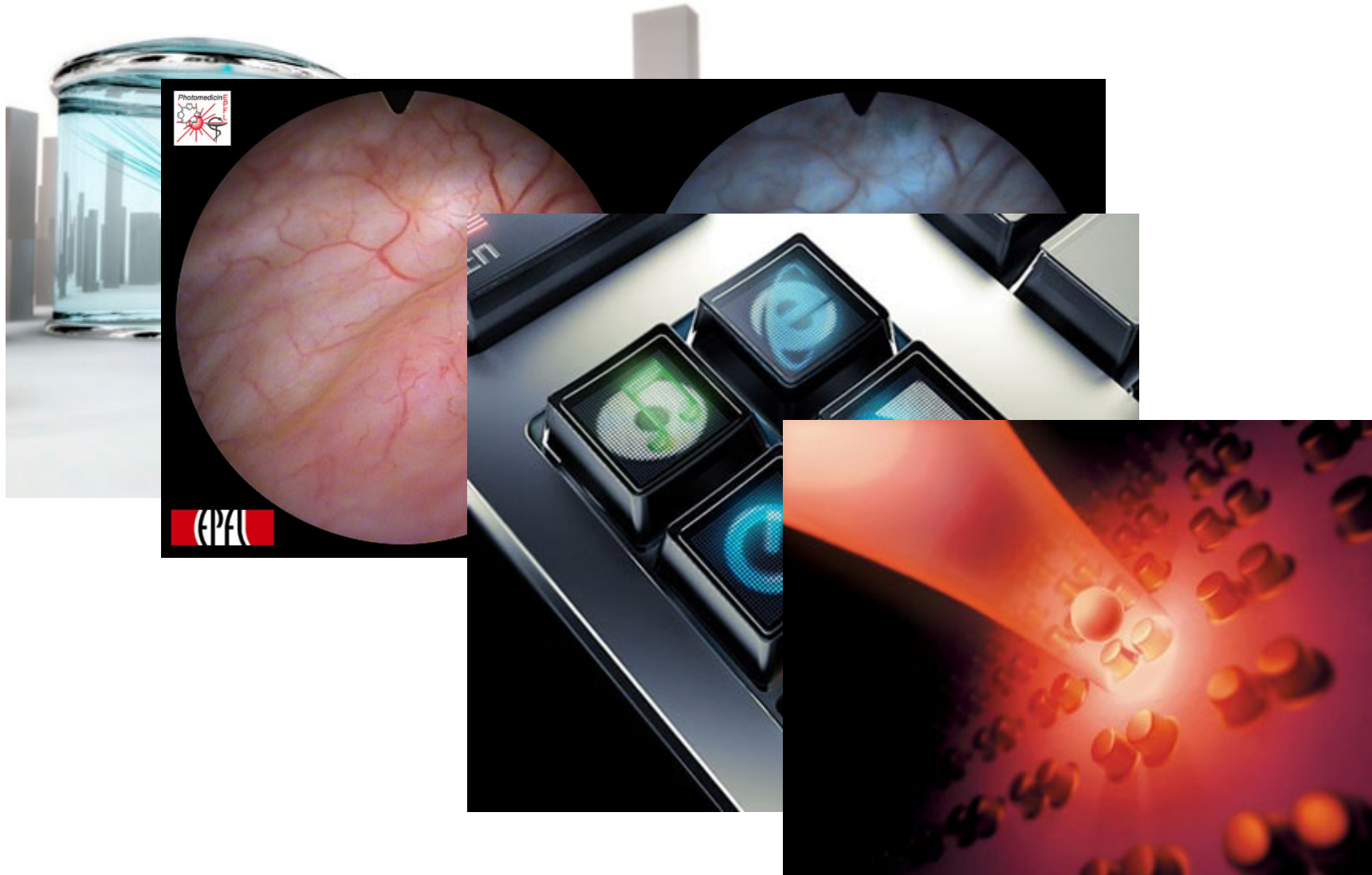
dailymail

Olivier J.F. Martin

Guides d'ondes



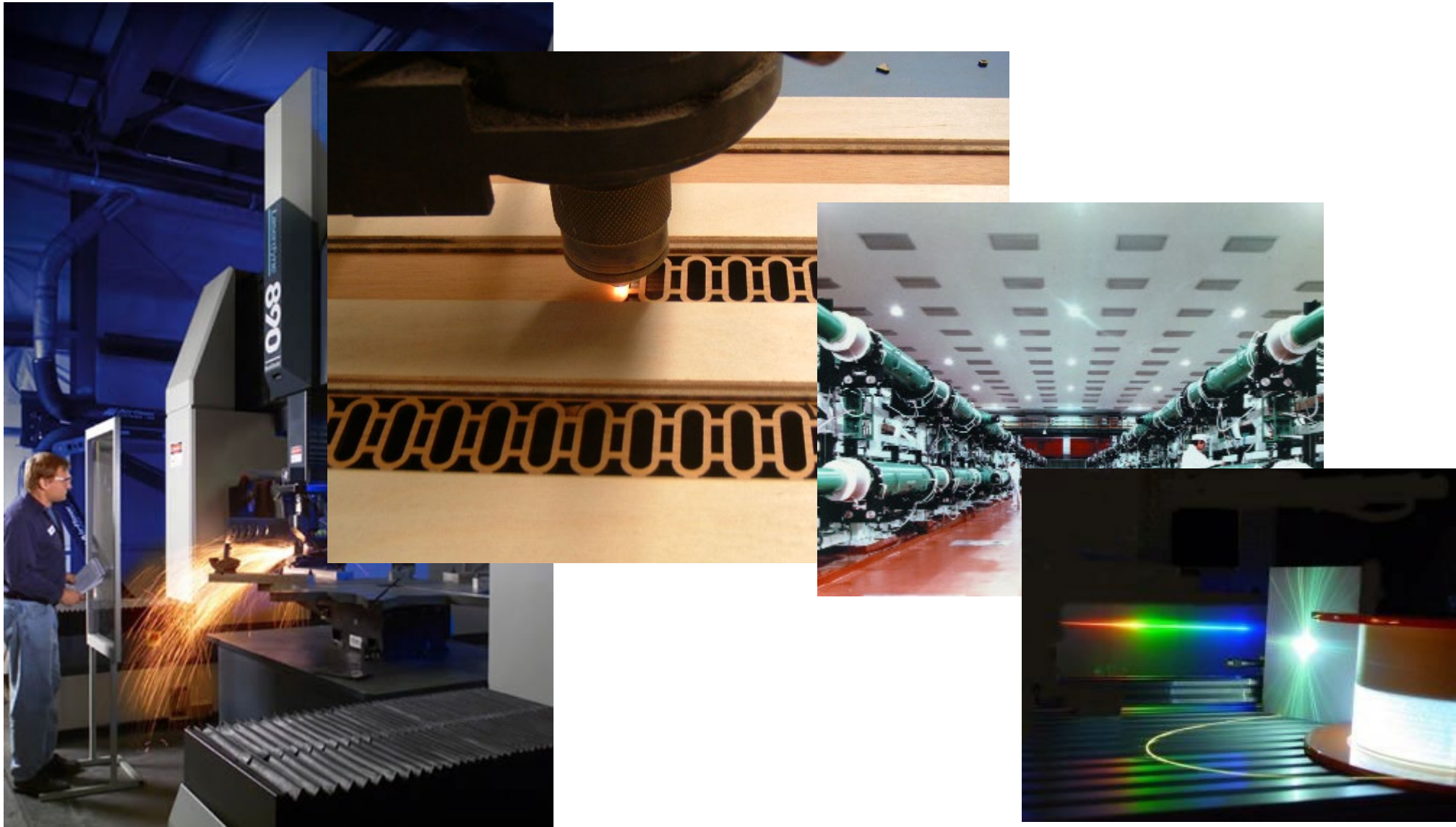
Photons



Geneva University; EPFL/CHUV; Optimus keyboard; Manchester University

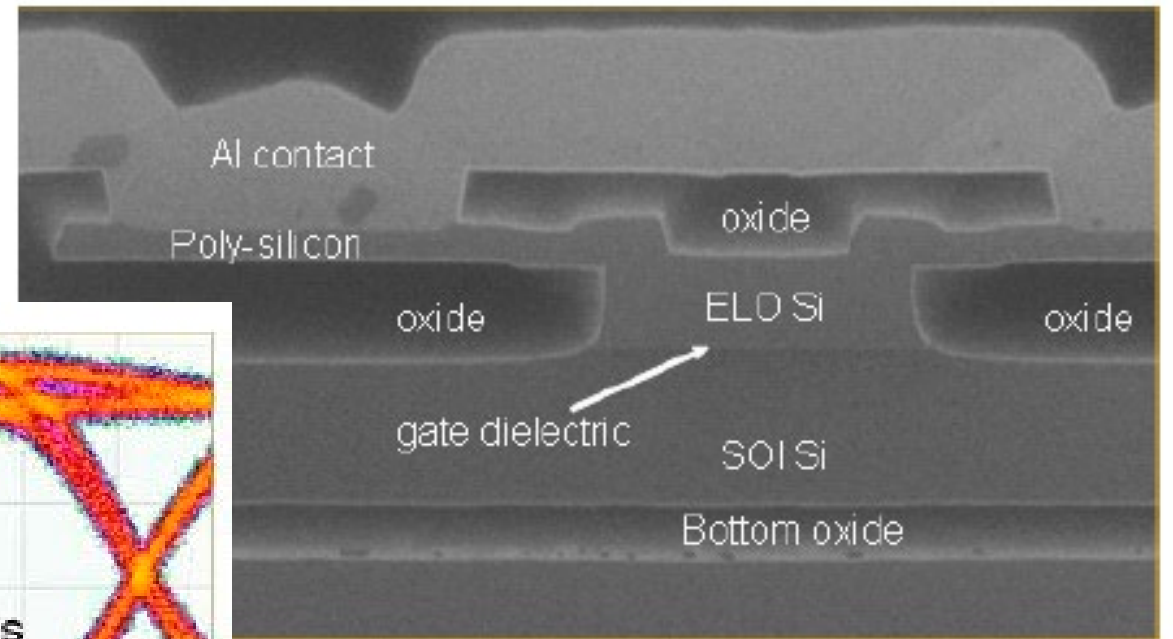
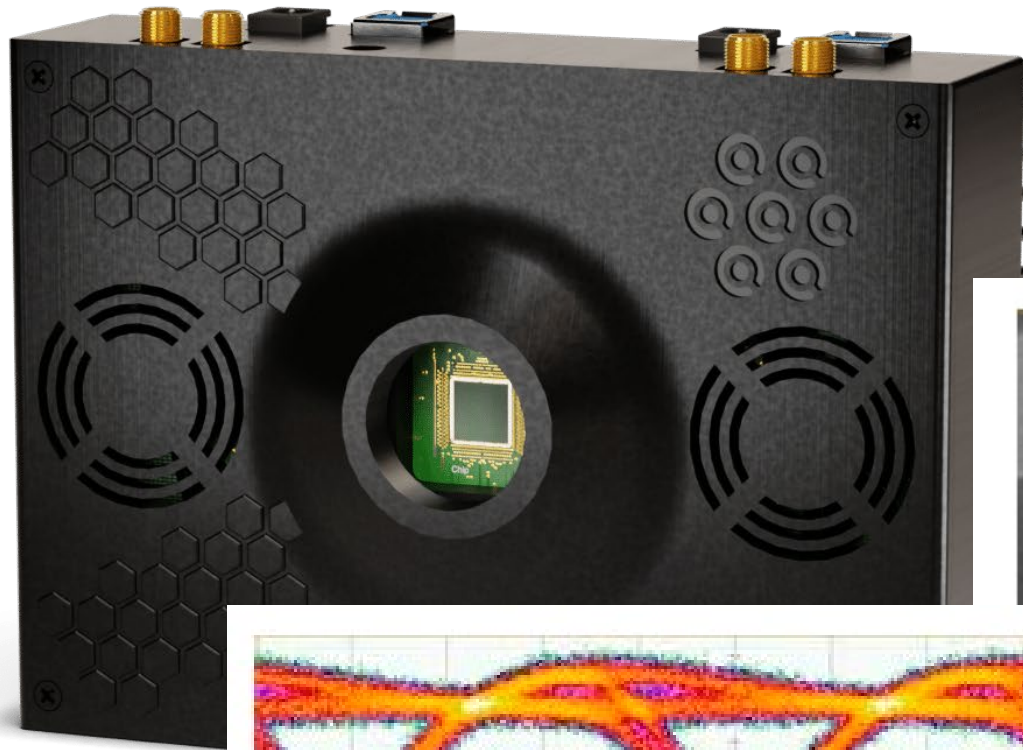
Olivier J.F. Martin

Lasers et sources lumineuses

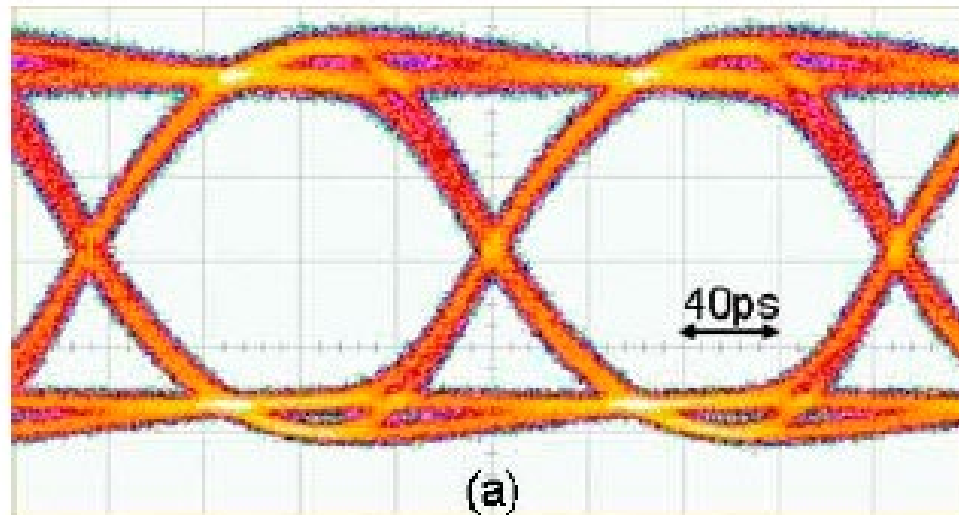


LAI International; Endmills; LMJ project; Fianium

Photodétecteurs et dispositifs optoélectroniques



A cross-section of the new phase shifter with ELO-Si rib.



Ingénierie optique

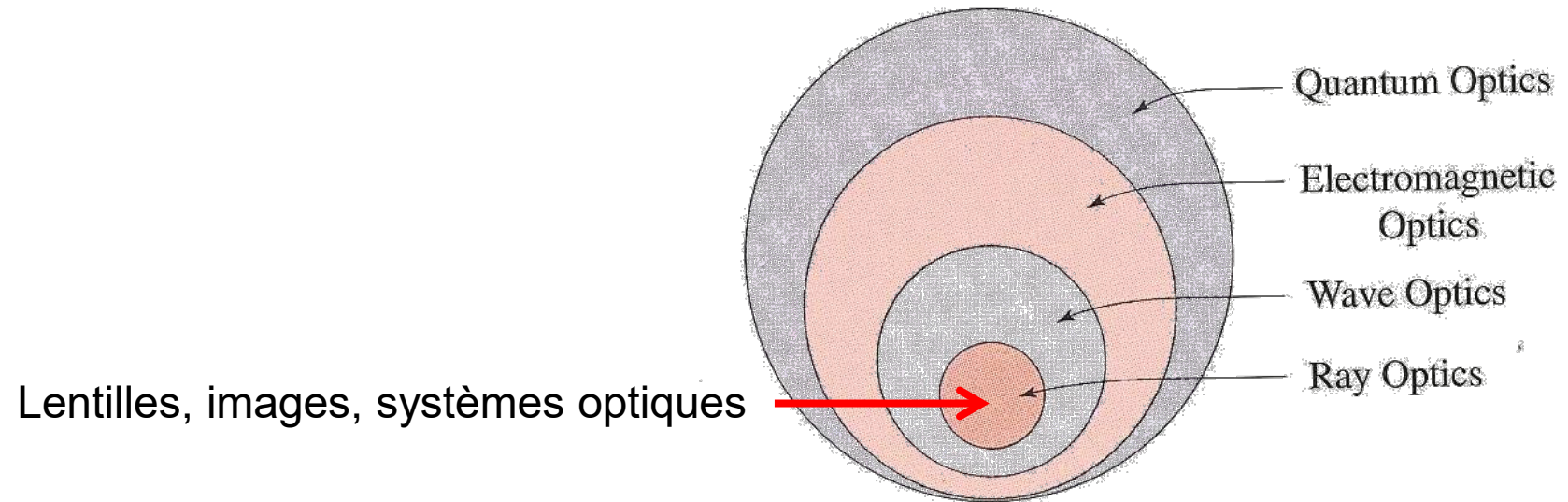
Semaine 1 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Optique – Menu du cours

- Chaque chapitre de l'optique permet d'étudier des phénomènes nouveaux



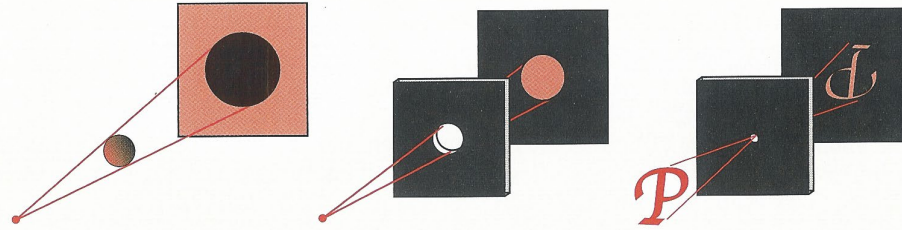
Postulats de l'optique géométrique

- Rayon: La lumière se propage sous forme de rayons. Ceux-ci sont émis par une source et peuvent être mesurés par un détecteur.
- Indice de réfraction: Tout milieu est caractérisé par un indice de réfraction n ; en général $n \geq 1$.
- L'indice représente le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide c_0 à la vitesse c dans le milieu: $n = c_0 / c$ ou $c = c_0 / n$
- Chemin optique:

$$L_{AB} = \int_A^B n(r) dr$$

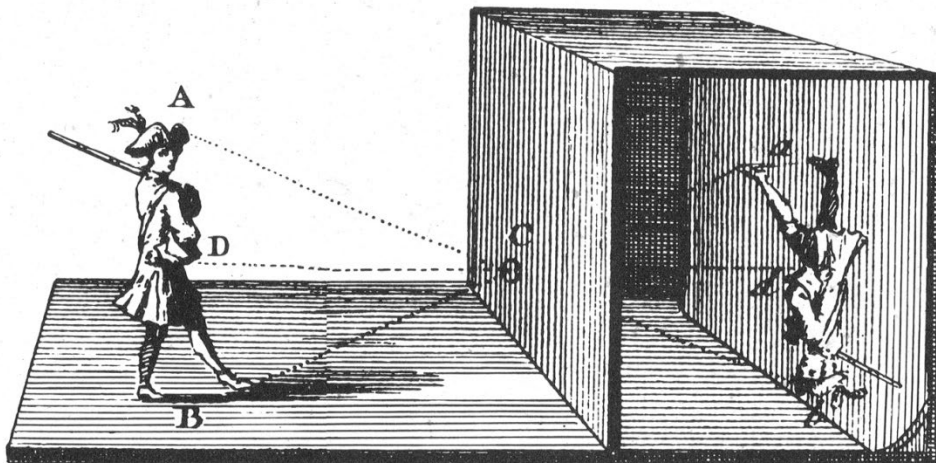
- Principe de Fermat: le chemin choisi est un extremum par rapport aux chemins voisins, en général le chemin le plus court

Postulats de l'optique géométrique



B.E.A. Saleh and M.C. Teich "Fundamentals of photonics"

- La lumière se propage en ligne droite
- Les ombres sont les projections des obstacles
- Attention aux effets "renversants"
- Camera obscura

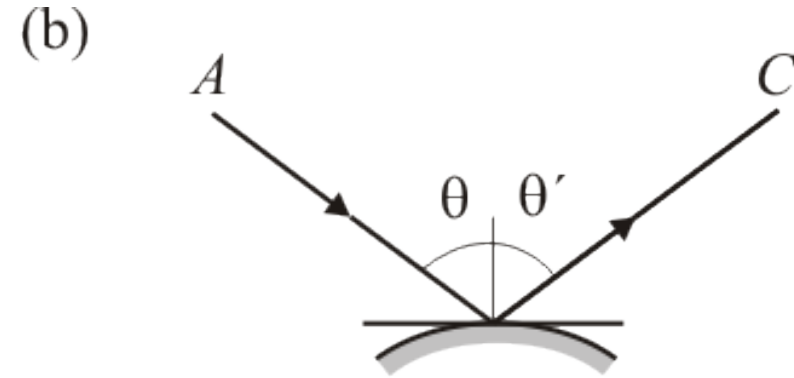
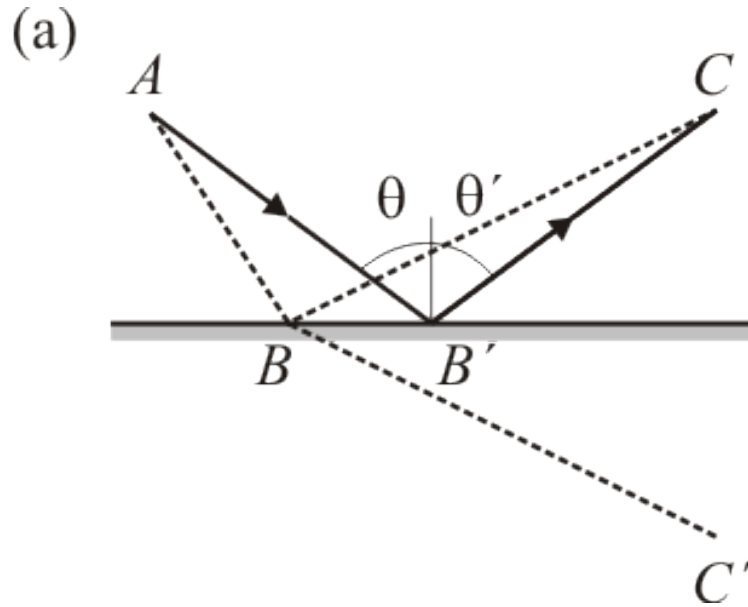


Wikimedia



Image du Palais Royal de Prague projetée dans le grenier d'une maison voisine (Wikimedia)

Postulats de l'optique géométrique



- Le fait que la lumière se propage en ligne droite détermine la réflexion sur un miroir
- Angles d'incidence et de réflexion égaux
- Pour un miroir courbe, on mesure l'angle par rapport à la normale

La lumière se propage-t-elle toujours en ligne droite?

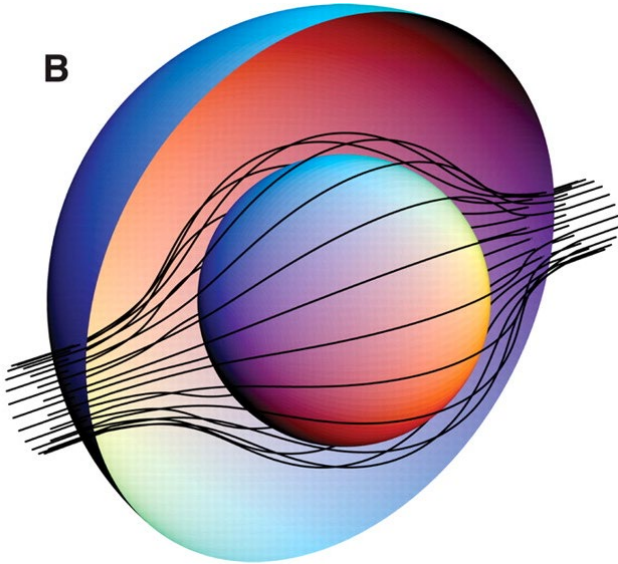


- Cape d'invisibilité:



La lumière se propage-t-elle toujours en ligne droite?

- Si on arrive à faire prendre à la lumière **un chemin courbe**, on peut cacher un objet le long du trajet lumineux



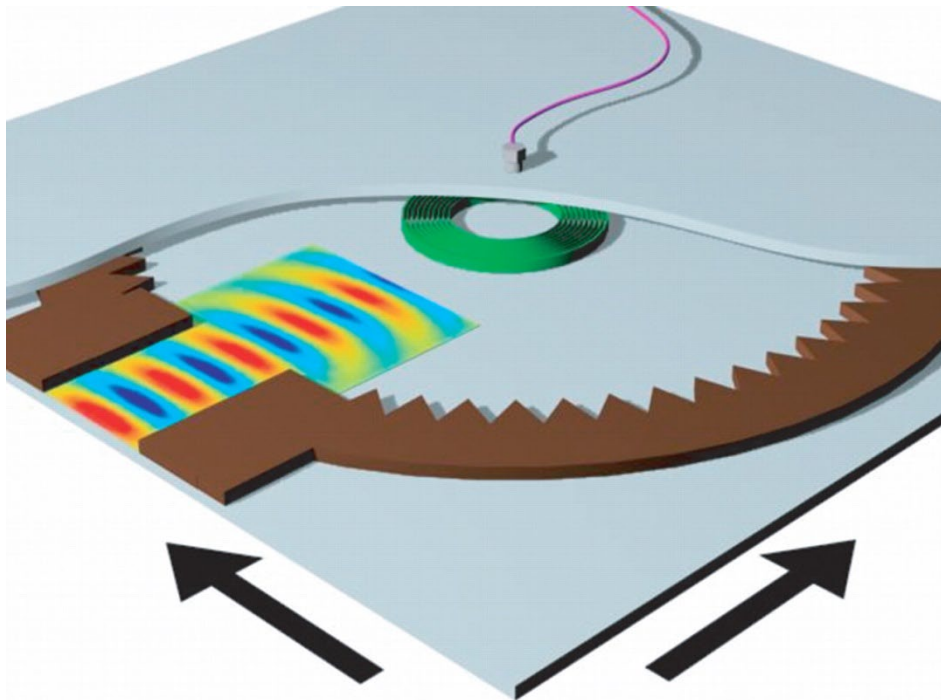
- Cape d'invisibilité:



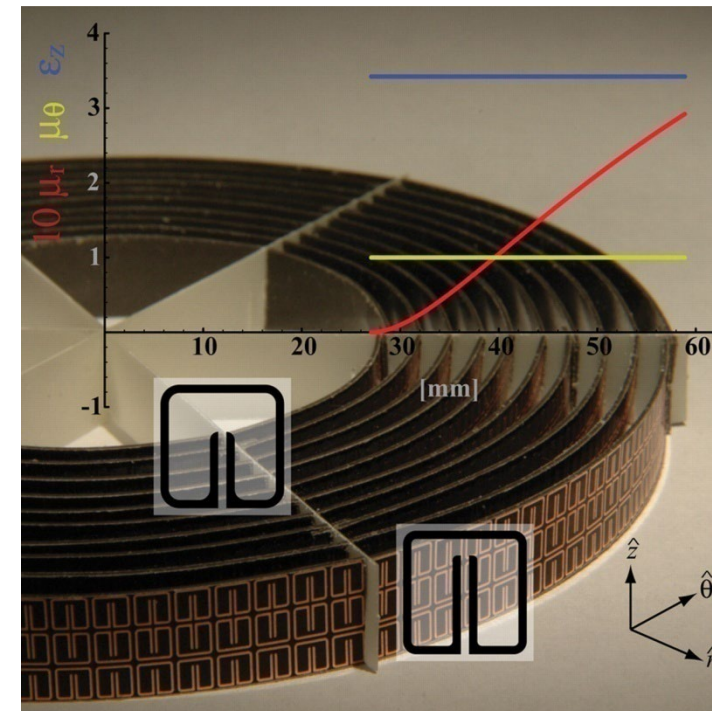
J.B. Pendry et al., Science vol. Vol. 312, p. 1780 (2006).

Cape d'invisibilité

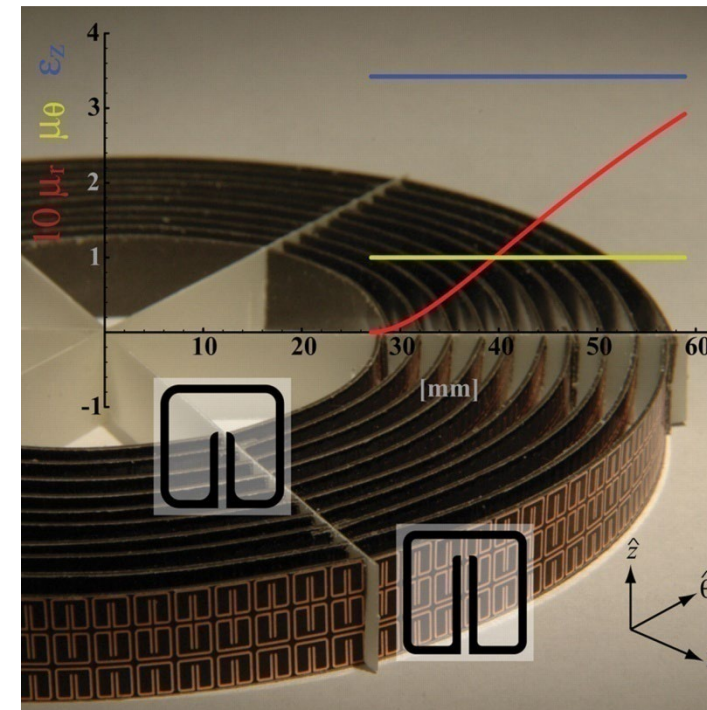
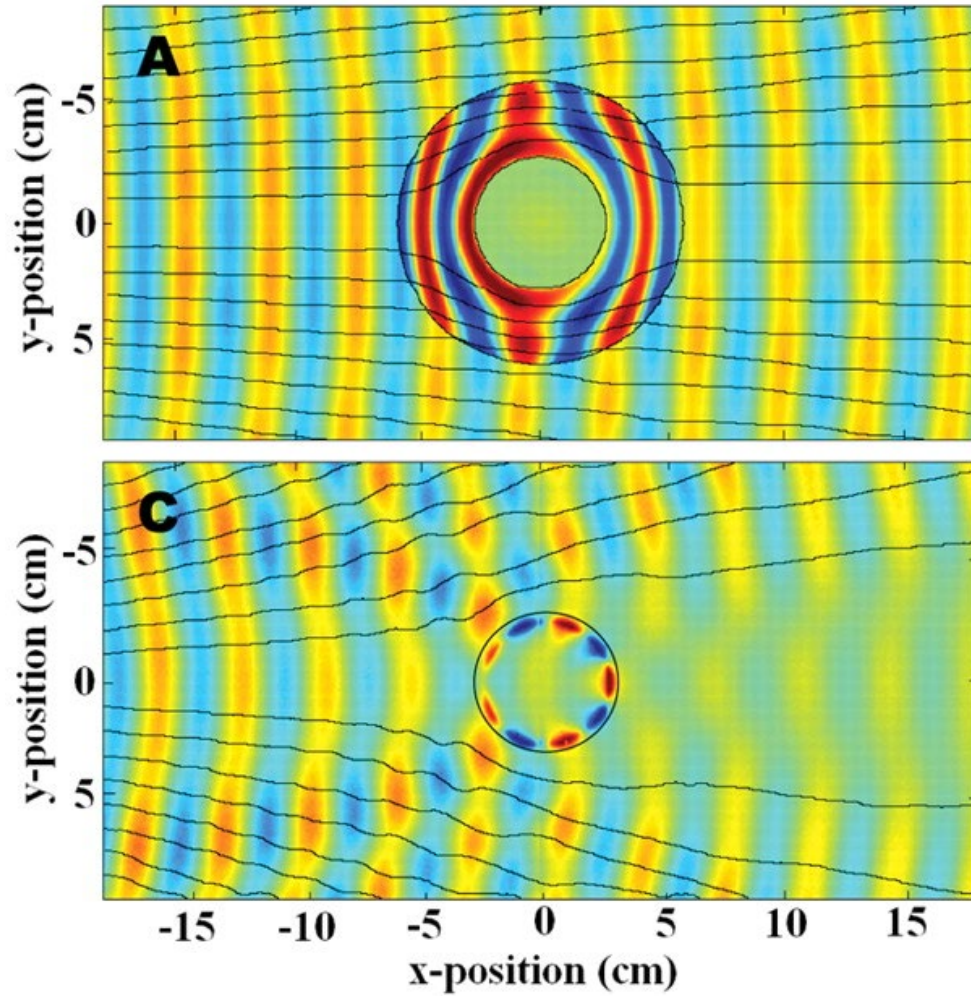
- Nécessite des variations très compliquées de l'indice de réfraction
- Comme les principes de l'optique peuvent s'appliquer sur l'entier du spectre électromagnétique, on peut transposer une expérience d'optique aux fréquences micro-ondes, où la longueur d'onde est beaucoup plus grande et l'expérience plus facile à réaliser



D. Shurig et al., Science vol. 314, p. 977 (2006).



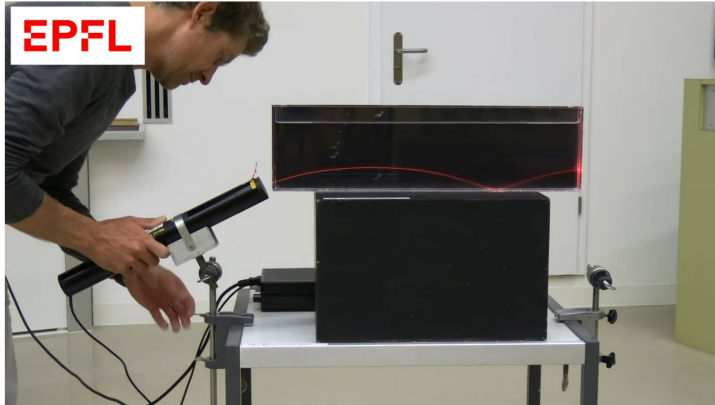
Cape d'invisibilité – Démonstration aux fréquences micro-ondes



D. Shurig et al., Science vol. 314, p. 977 (2006).

La lumière se propage-t-elle toujours en ligne droite?

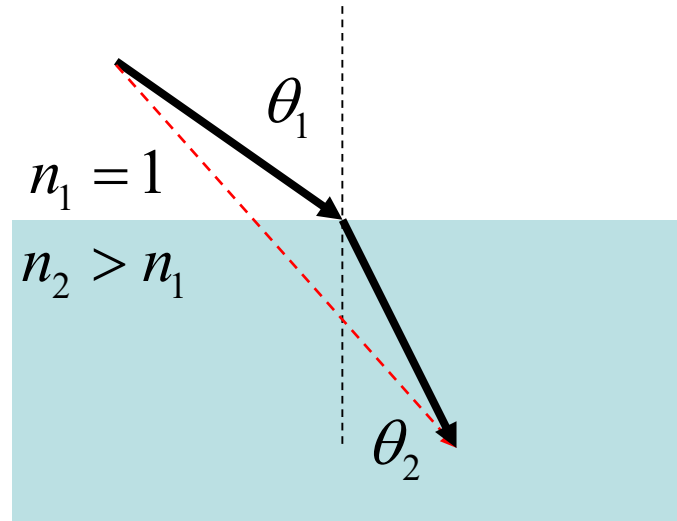
- Cuve à onde (eau $n=1.33$, glycérine $n=1.47$)



- Le rayon est toujours courbé dans le sens du gradient d'indice

Postulats de l'optique géométrique

- Principe de Fermat: le chemin choisi est un extremum par rapport aux chemins voisins, en général le chemin le plus court (le plus rapide):



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Le chemin optique dépend de la longueur du trajet et de l'indice de réfraction:

$$\overleftrightarrow{d}$$

$n = 1$

$$L_{AB} = d$$

$$L_{AB} = \int_A^B n(r) dr$$

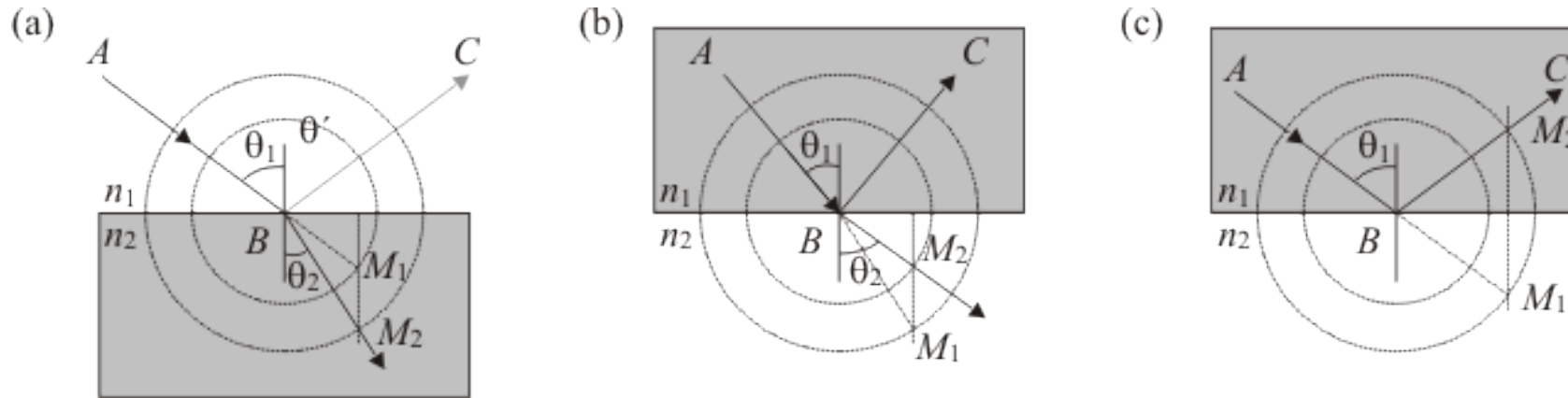
$$\overleftrightarrow{d}$$

$n > 1$

$$L_{AB} = n d$$

Réfraction – Construction géométrique

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



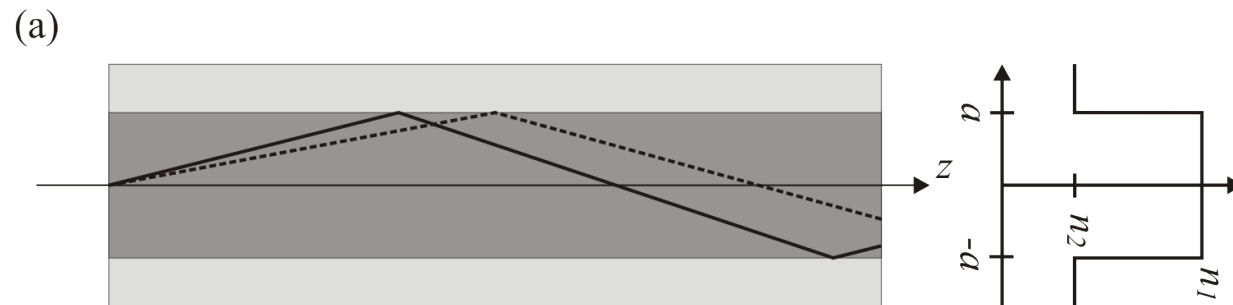
- Réflexion interne totale (depuis un milieu d'indice élevé, vers un milieu d'indice plus petit):

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

- L'optique géométrique ne permet pas de déterminer les amplitudes des ondes réfléchies et transmises
- Principe de base des guides d'ondes et des fibres optiques

Fibres optiques

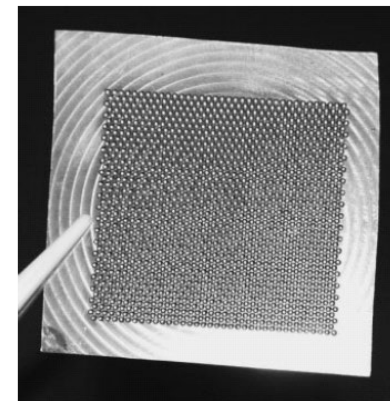
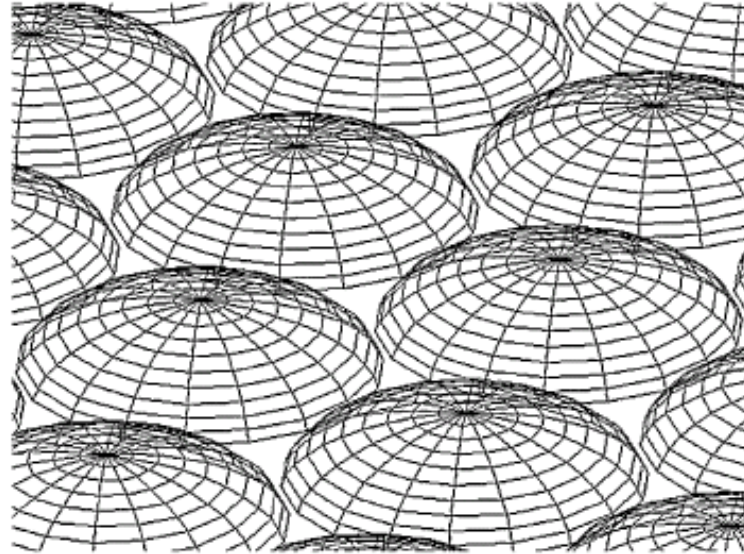
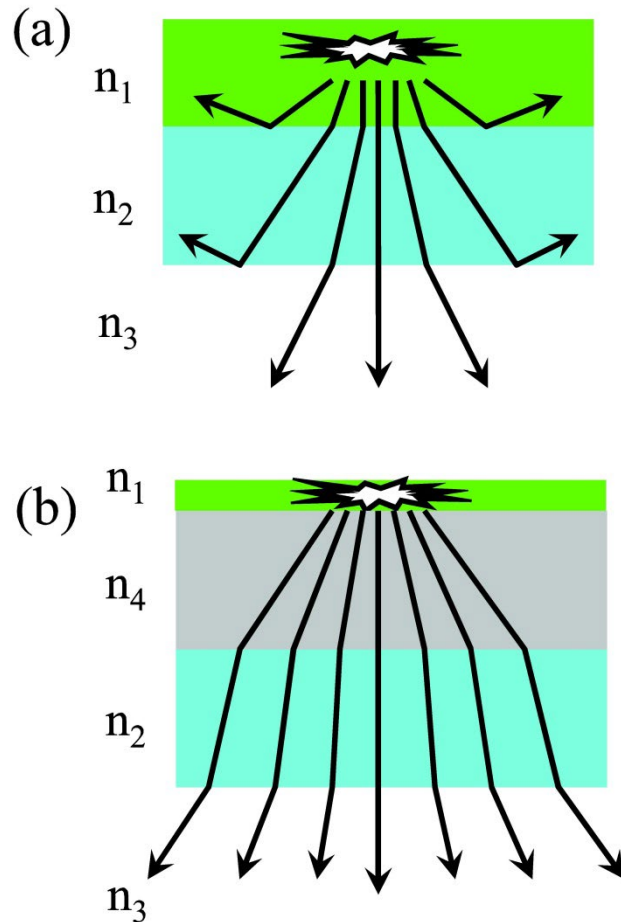
- Permet de guider la lumière sur de grandes distances en faisant des réflexions internes totales à l'interface entre le cœur et le manteau de la fibre
- L'indice de réfraction du cœur doit être plus important que celui du manteau
- Plus le contraste d'indice est important, meilleur est le guidage



Britannica.com

Extraction de la lumière d'une LED

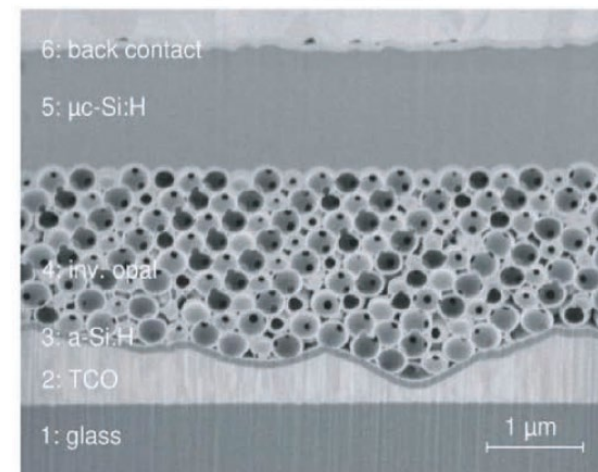
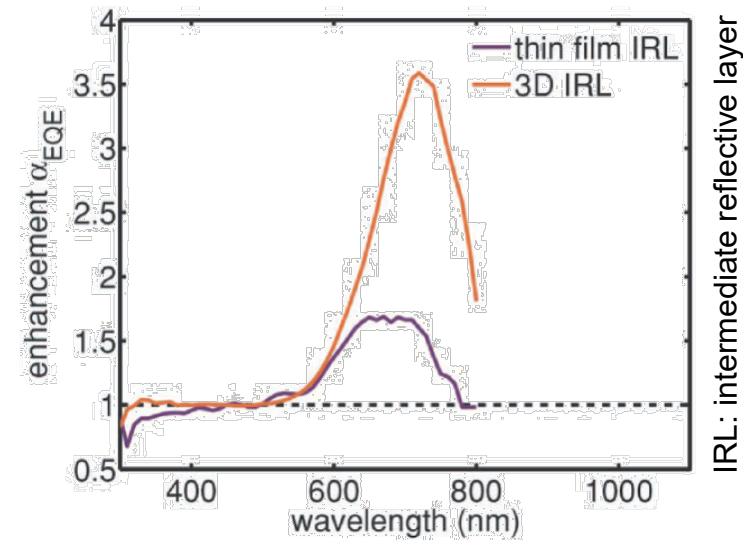
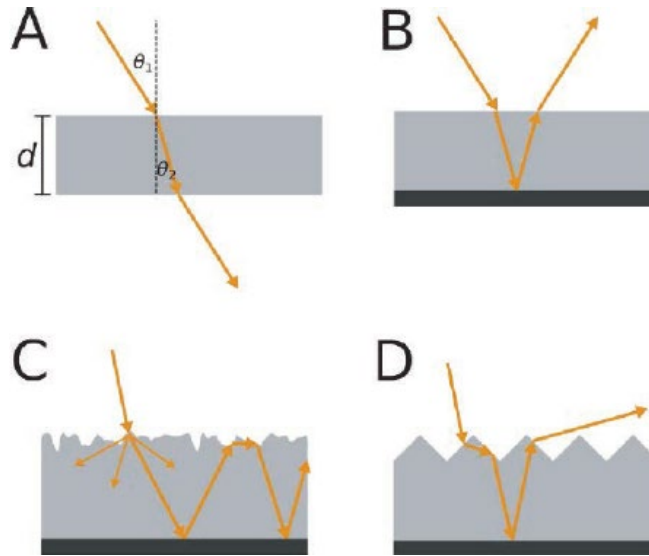
- Une partie importante de la lumière reste piégée à l'intérieur de la structure par réflexion interne totale



*H. Greiner,
Jap. J. Appl. Phys.
vol. 46, p. 4125 (2007)*

Piégeage de la lumière dans une cellule solaire

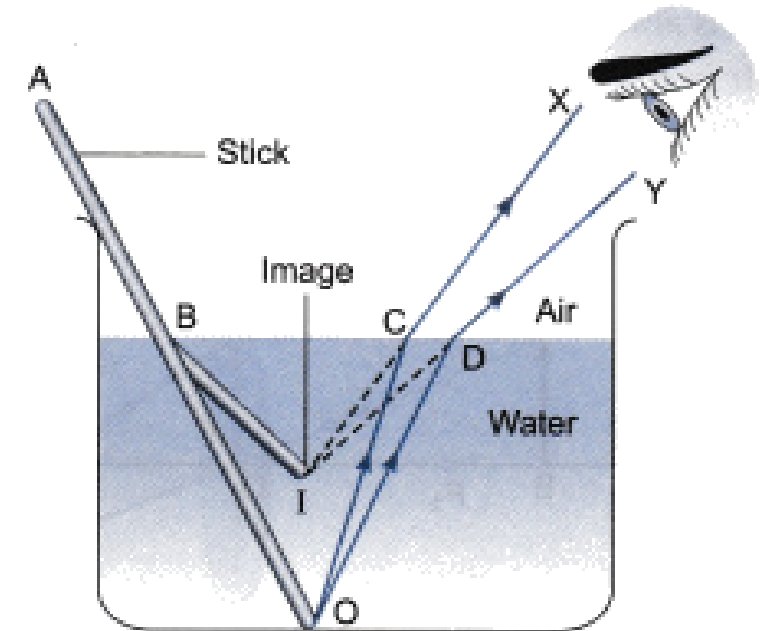
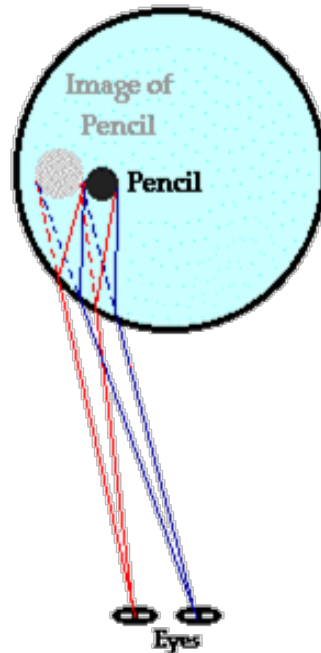
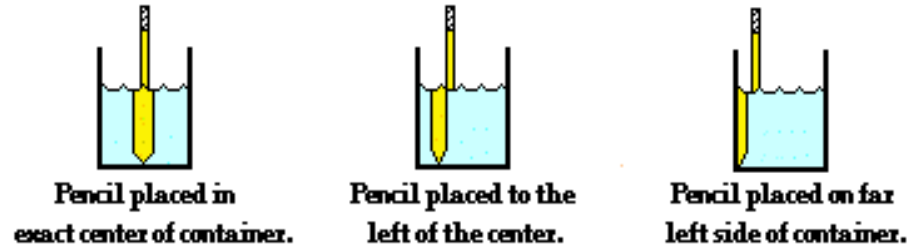
- Une problématique similaire (mais inverse!) existe dans les cellules solaires pour lesquelles on essaie de piéger la lumière en structurant la surface



Réfraction – Loi de Snell

- Notre œil suppose que la lumière se propage en ligne droite → l'objet doit être cassé sous la surface de l'eau!

The Broken Pencil Observation



Ingénierie optique

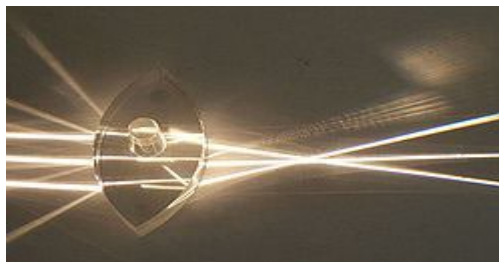
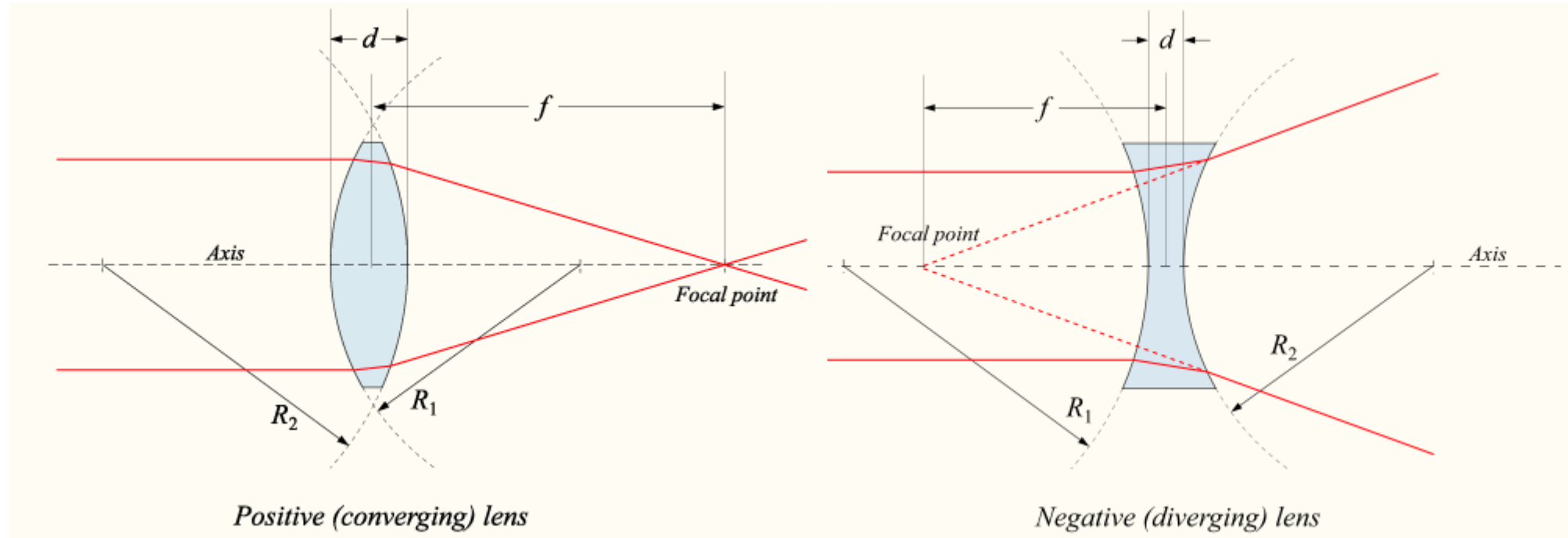
Semaine 1 – partie 3

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Lentilles sphériques

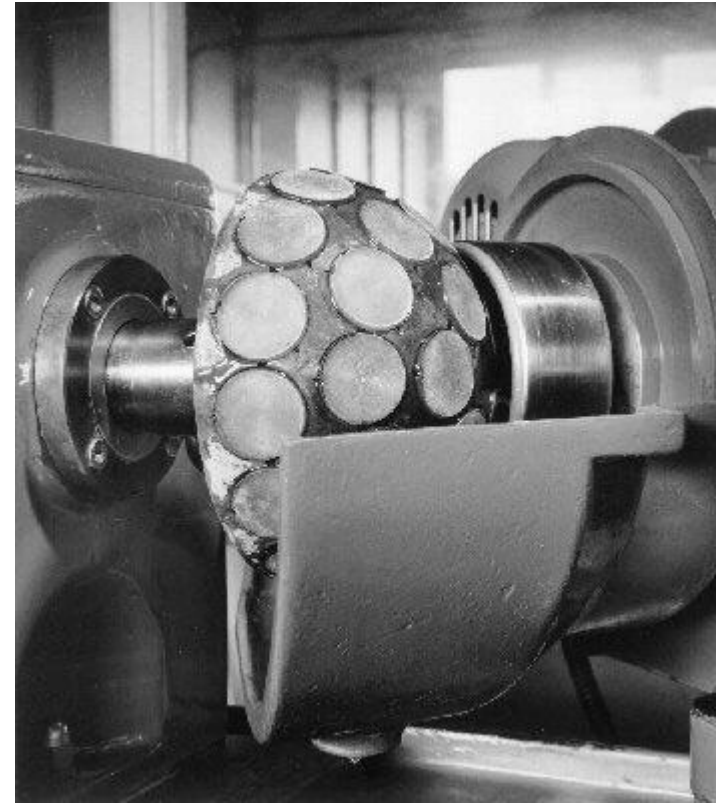
- Comme les surfaces sont sphériques, la lentille est caractérisée par les rayons définissant ces surfaces sphériques:



Polissage d'une lentille



Schneider OM, Germany (2008)

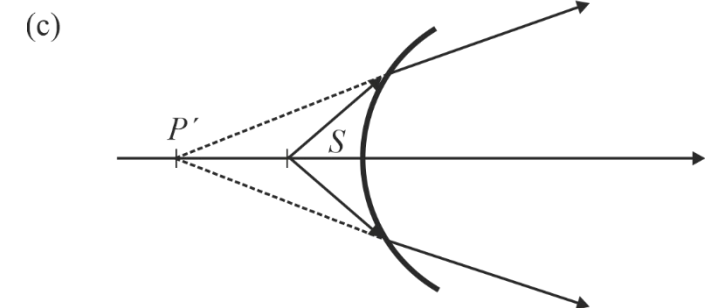
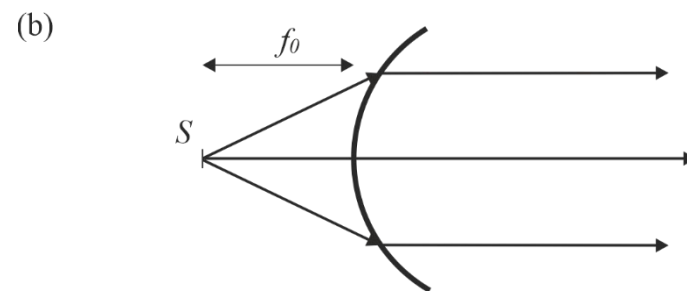
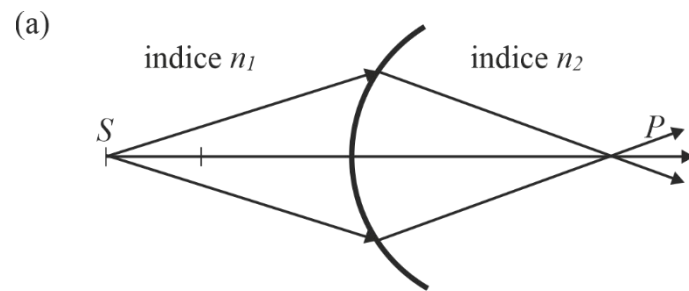


Rollei company, Braunschweig, Germany (1959)

Mells Griot

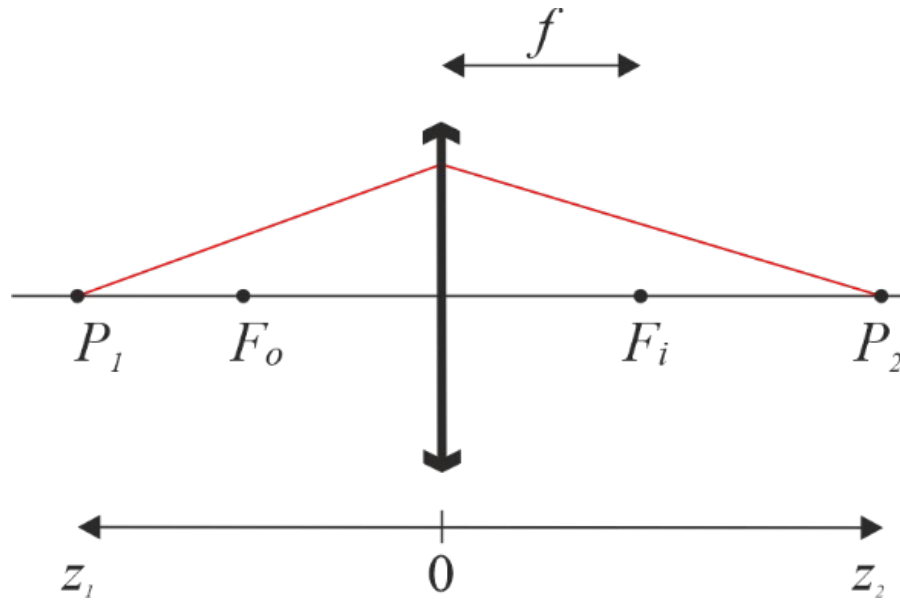
Lentilles minces

- Une lentille permet de faire une image d'un objet. On introduit donc les distances par rapport au centre de la lentille pour l'objet s_o et pour l'image s_i
- Un dioptre, qui sépare deux régions de l'espace par une surface sphérique permet déjà de comprendre le fonctionnement des lentilles en fonction de la position de l'objet



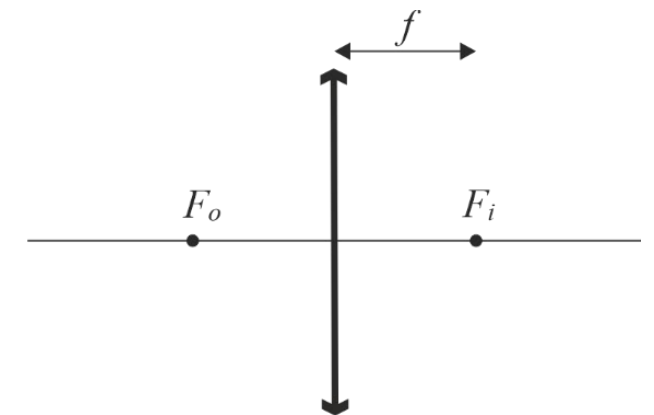
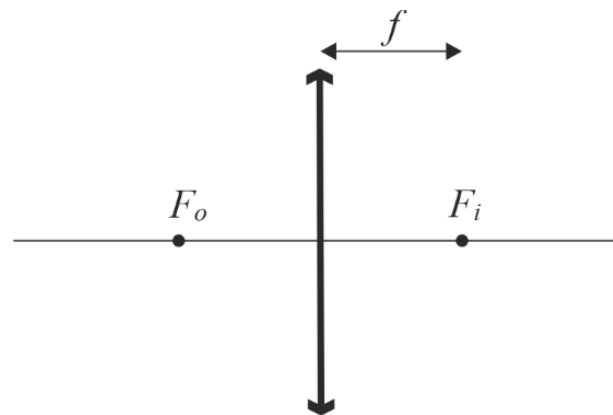
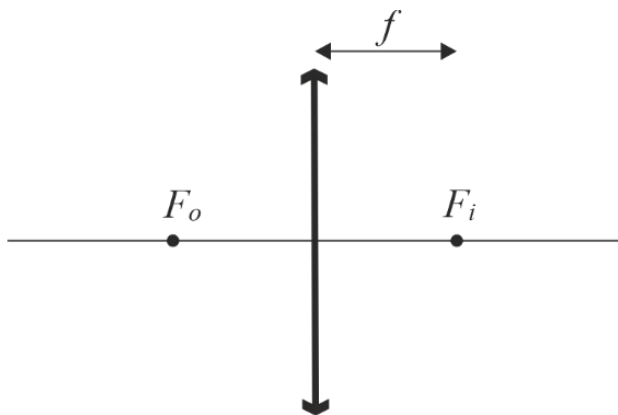
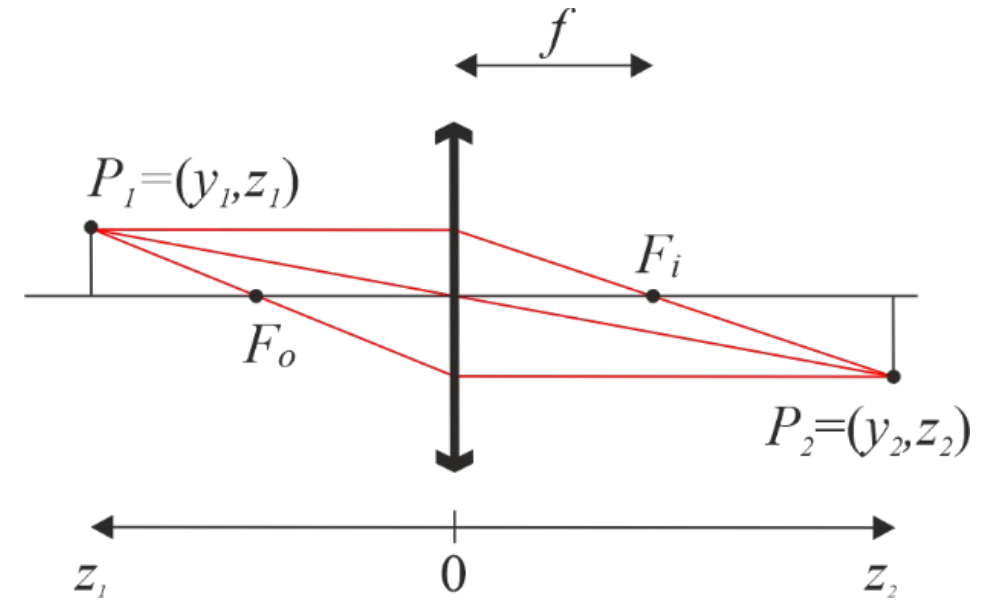
Lentilles minces

- Formule de conjugaison des lentilles (condition d'image):



$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f}$$

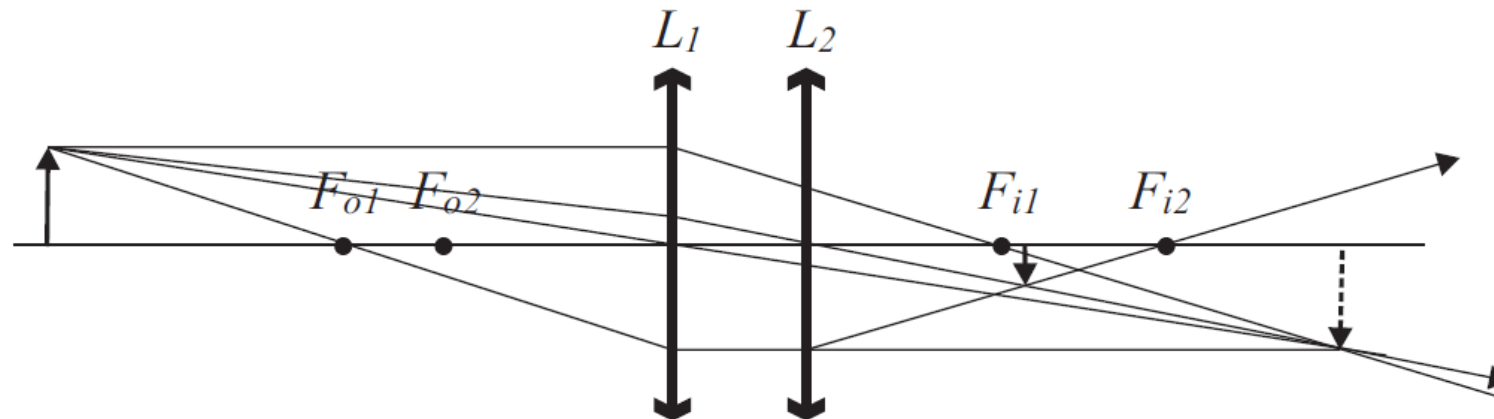
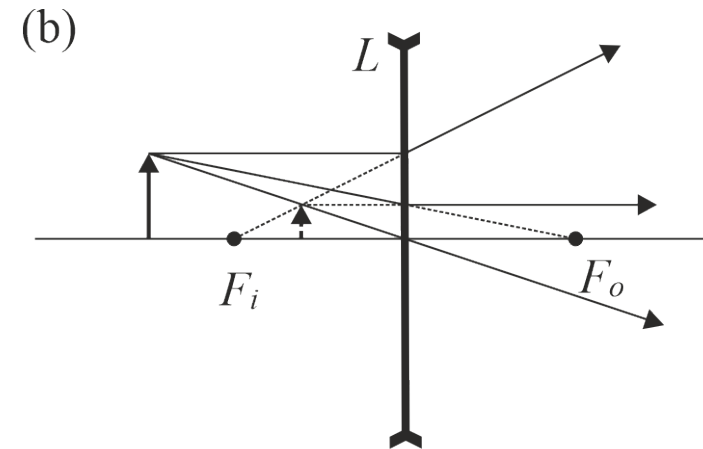
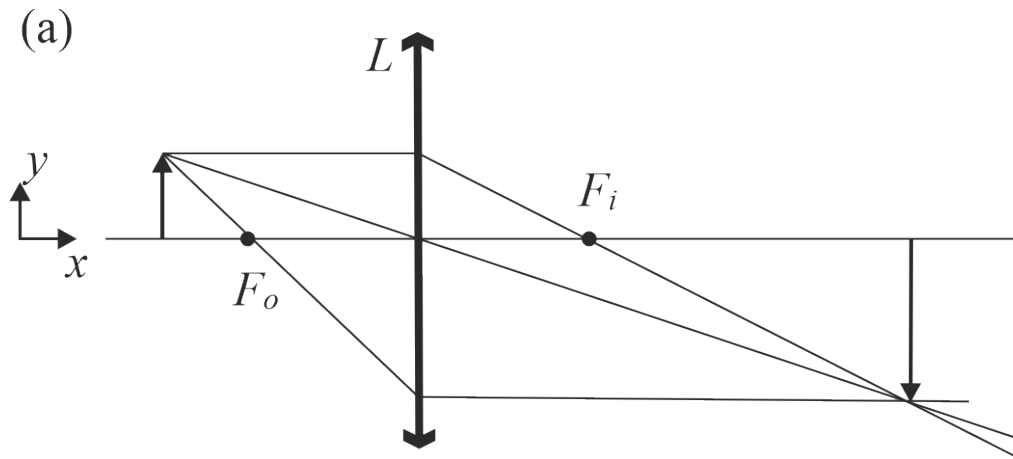
$$y_2 = -\frac{z_2}{z_1} y_1$$



Tracé des rayons

- Construction des images:

- Un rayon parallèle $\rightarrow$ foyer image
- Un rayon par le centre $\rightarrow$ tout droit



Tracé des rayons

- Pour pouvoir utiliser les différentes formules des lentilles, il faut respecter un certain nombre de conventions sur les signes:

Table 1.2 – Conventions de signes supplémentaires pour le tracé des rayons (la lumière vient de la gauche)

Symbole	Convention
x_o	positif à gauche de F_o
x_i	positif à droite de F_i
y_o, y_i	positif au dessus de l'axe optique

Table 1.3 – Conventions de signes pour les paramètres des lentilles minces

Quantité	Signe +	Signe -
s_o	objet réel	objet virtuel
s_i	image réelle	image virtuelle
f	lentille convergente	lentille divergente
y_o	objet droit	objet renversé
y_i	image droite	image renversés
M_T	image droite	image renversée

Ingénierie optique

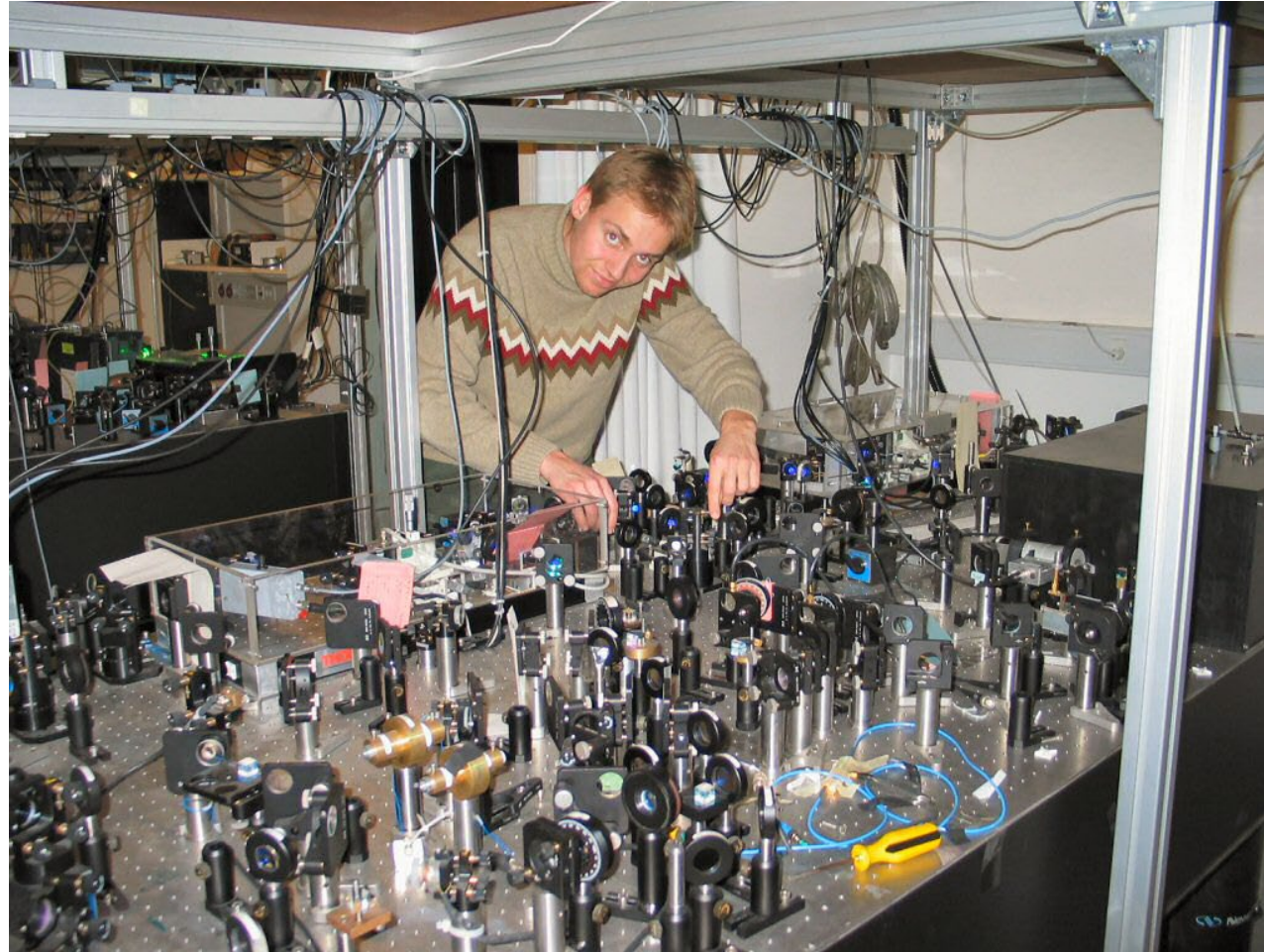
Semaine 1 – partie 4

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



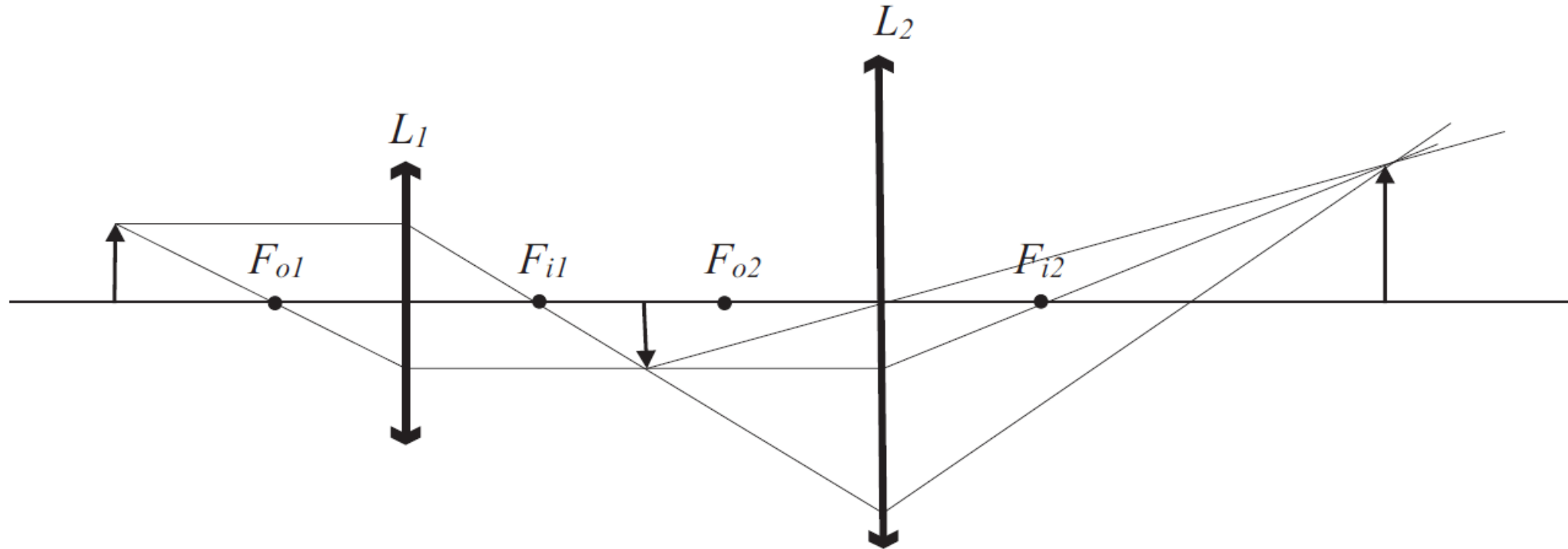
Méthode matricielle ABCD

- Souvent on doit combiner un grand nombre de lentilles !



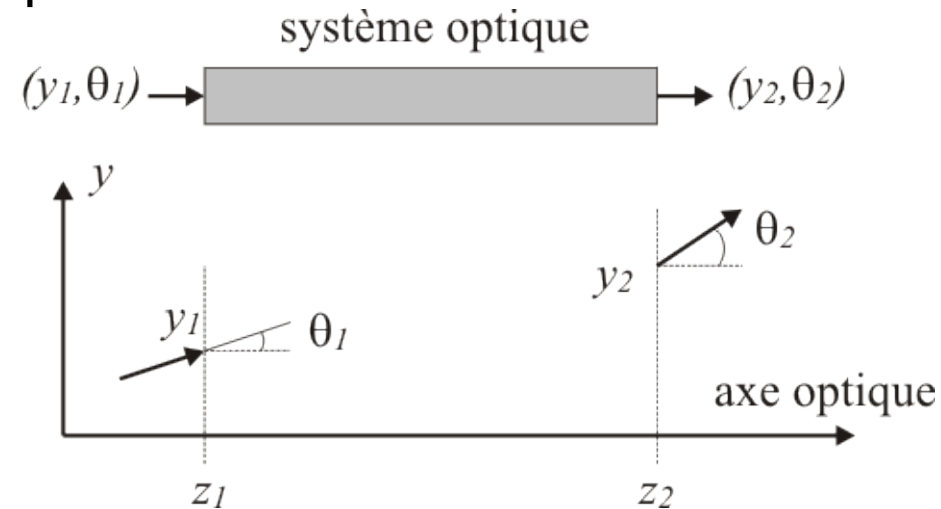
Méthode matricielle ABCD

- Le tracé des rayons deviant vite compliqué:



Méthode matricielle ABCD

- On représente un système optique comme une "boîte noire" qui produit un rayon output pour un rayon input:



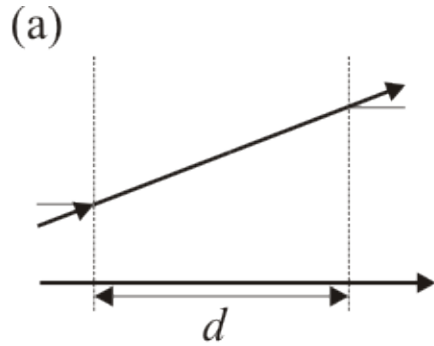
- Chaque rayon est déterminé par son ordonnée y et son angle θ
- On suppose une relation linéaire (optique paraxiale, $\sin \theta \simeq \theta$):

$$y_2 = Ay_1 + B\theta_1$$

$$\theta_2 = Cy_1 + D\theta_1$$

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

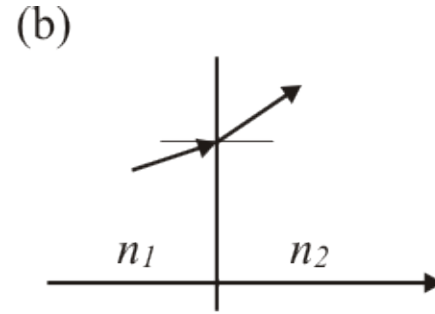
Méthode matricielle ABCD - Exemples



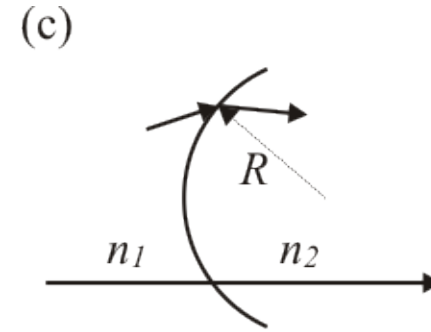
$$y_2 = y_1 + \theta_1 d \text{ et } \theta_2 = \theta_1 \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

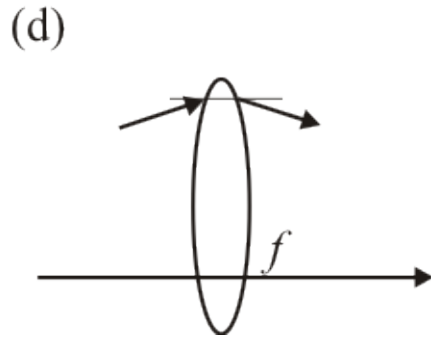


$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$$



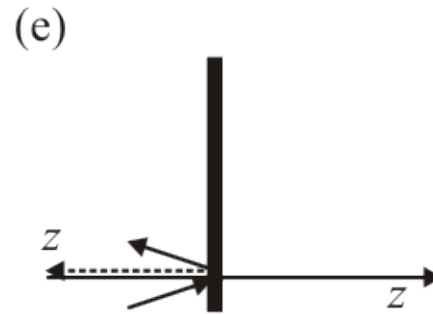
$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$$

Méthode matricielle ABCD - Exemples

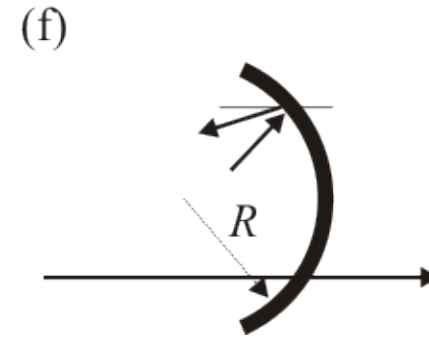


$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

($f > 0$ pour une lentille convexe,
 $f < 0$ pour une lentille concave)



$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix}$$

$R > 0$ pour un miroir convexe
 $R < 0$ pour un miroir concave

Méthode matricielle – Elements en série



- La méthode matricielle permet de combiner les éléments en série
- Attention à l'ordre des matrices: $M = M_N M_{N-1} \cdots M_2 M_1$
- En général les matrices ne commutent pas! (si on inverse l'ordre de deux lentilles dans un système optique, le trajet de la lumière est différent)

Pas de cours la semaine prochaine!

- Jeûne fédéral...

