

# Ingénierie optique

---

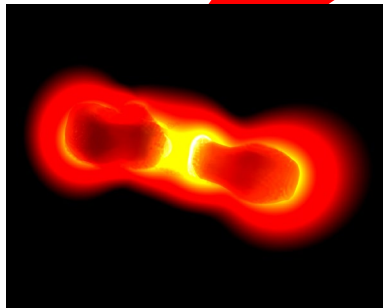
## Semaine 1 – partie 1

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

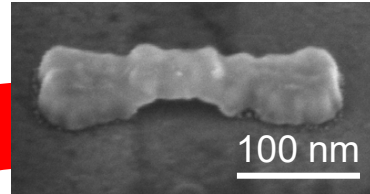


# Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

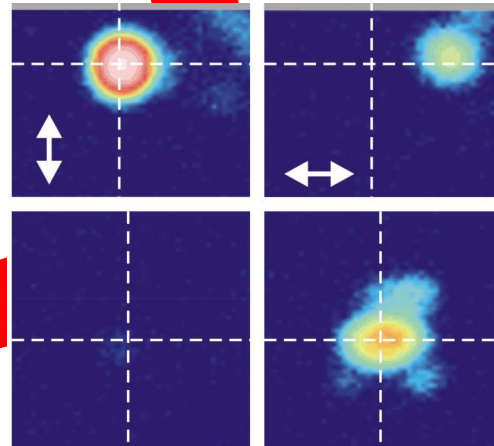
Simulations



Nanofabrication

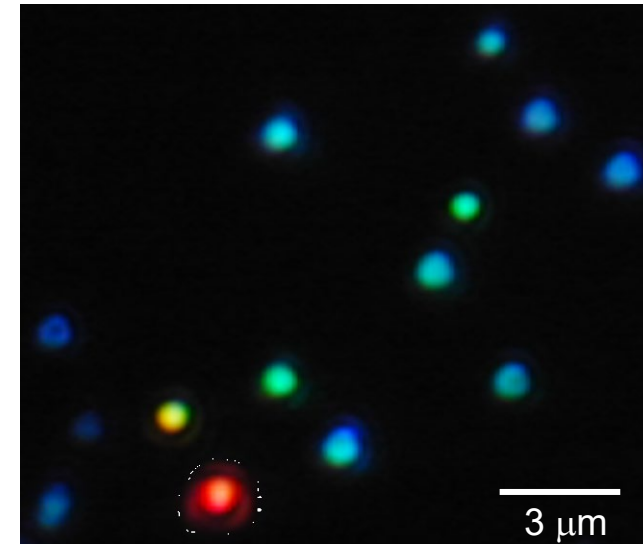


Lingot d'argent



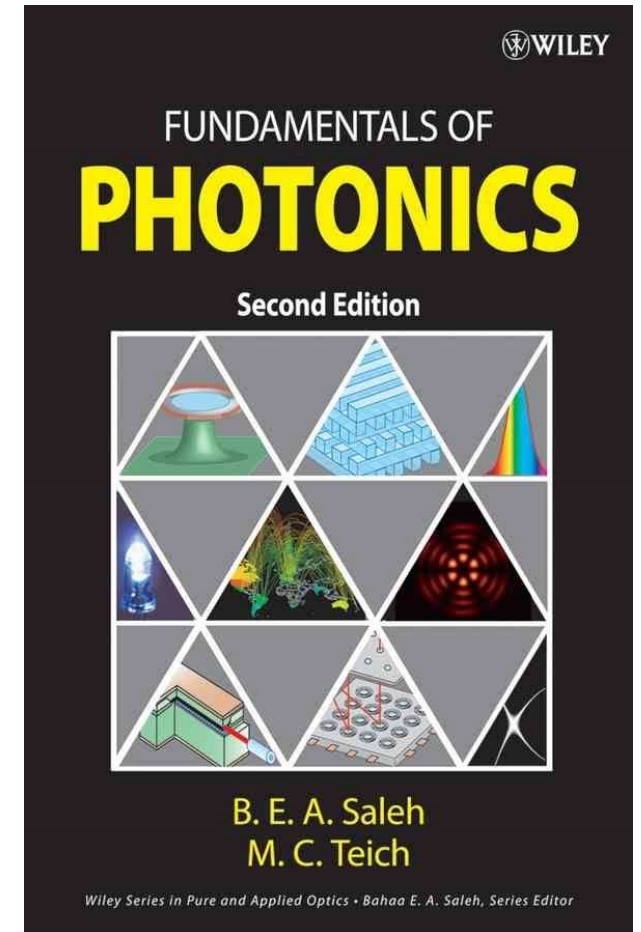
Caractérisation optique

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:
  - A disposition sur moodle, mais à considérer comme un supplément, les slides doivent suffire pour couvrir la matière
- 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 4 séances:

Group A1	Group A2
Group B1	Group B2

Day	Date	TP No	13h-16h	16h-19h
Thursday	2.10	1	A1	A2
Friday	3.10		B1	B2
Thursday	9.10	2	A1	A2
Friday	10.10		B1	B2
Thursday	16.10	3	A1	A2

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

## 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 4 séances:

Group A1	Group A2
Group B1	Group B2

Day	Date	TP No	13h-16h	16h-19h
Thursday	2.10	1	A1	A2
Friday	3.10		B1	B2
Thursday	9.10	2	A1	A2
Friday	10.10		B1	B2
Thursday	16.10	3	A1	A2

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

# Ingénierie optique – Examen

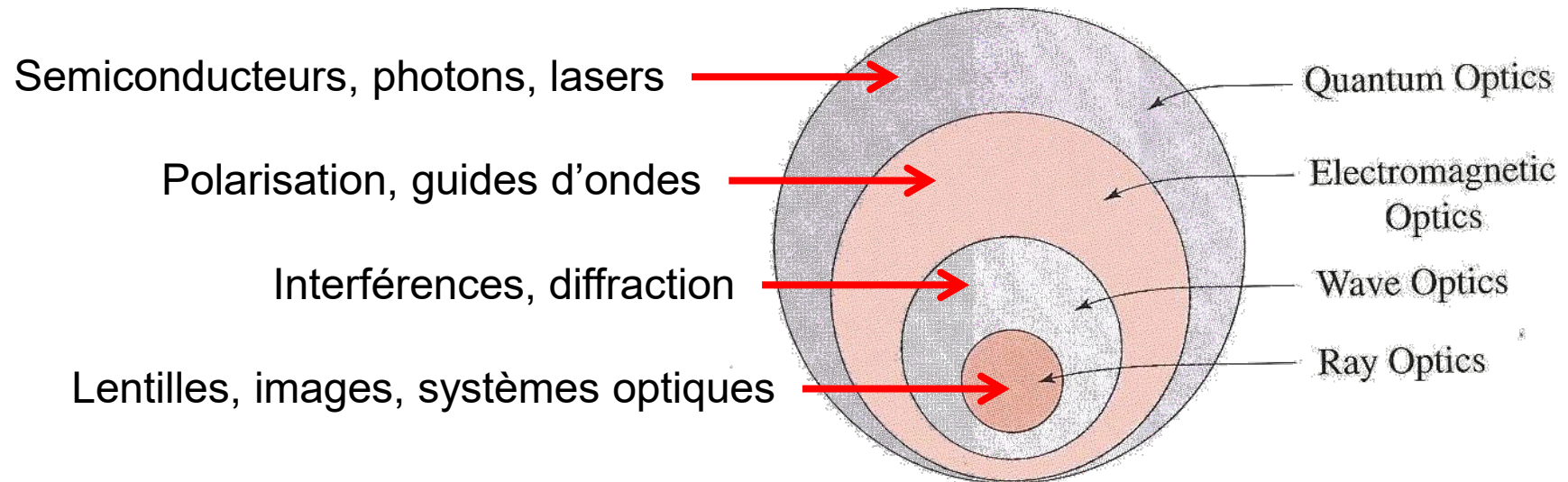
- Durant la session de janvier
- 2 heures
- Toute la matière du cours et les exercices
- Pour l'examen, les étudiants ont droit aux documents suivants:
  - Un résumé manuscrit du cours sur **deux feuilles A4** recto-verso (4 pages en tout)
  - Un formulaire mathématique (livre)
  - Une calculatrice de 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

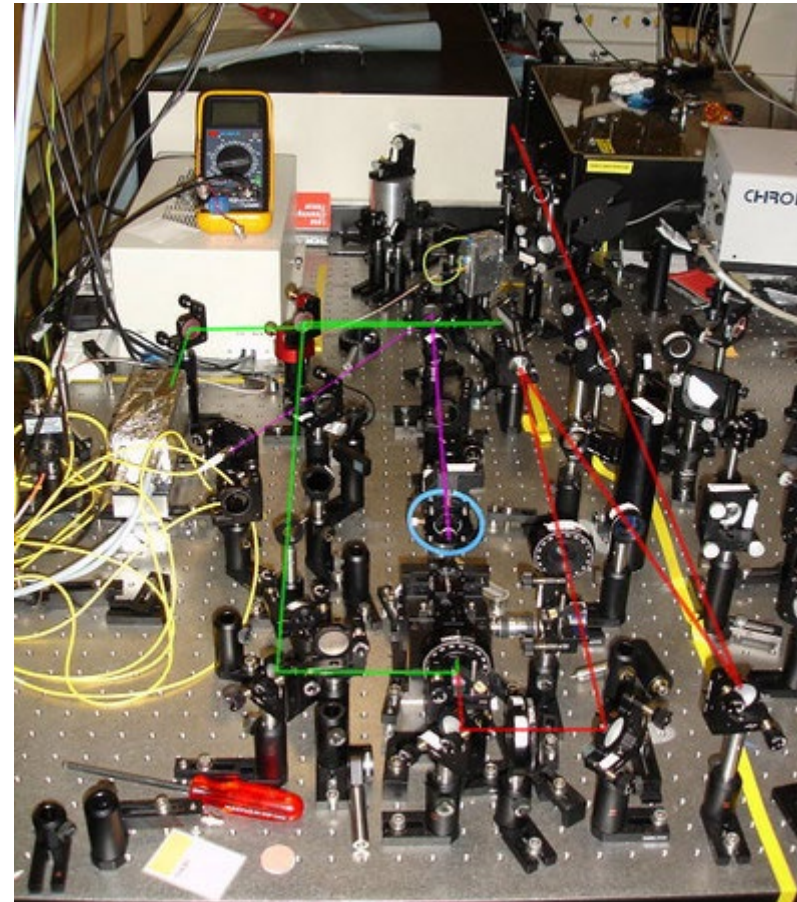
- Chaque chapitre de l'optique permet d'étudier des phénomènes nouveaux



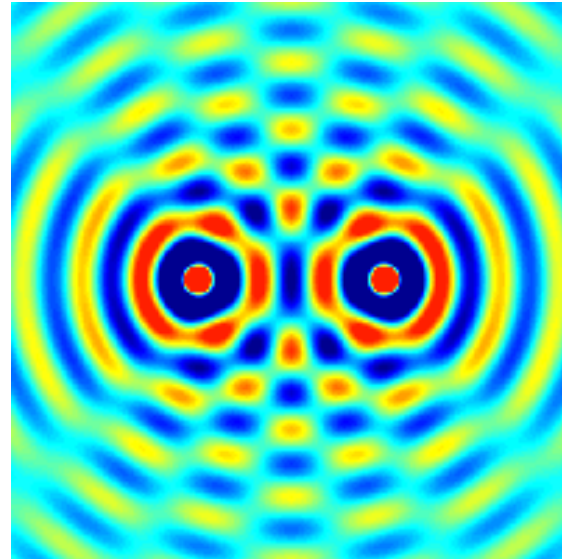
# Menu du cours – Optique géométrique



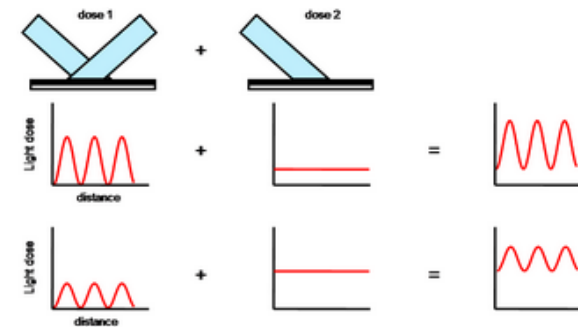
Microscope de Galilée (1609)



# Menu du cours – Optique ondulatoire



wikipedia



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

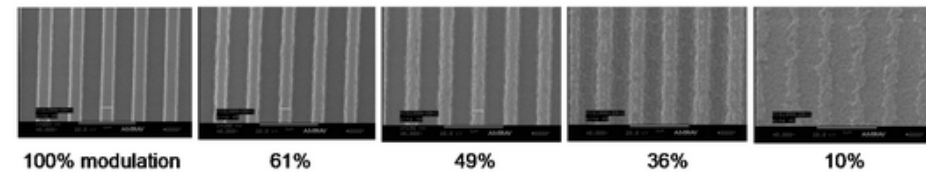
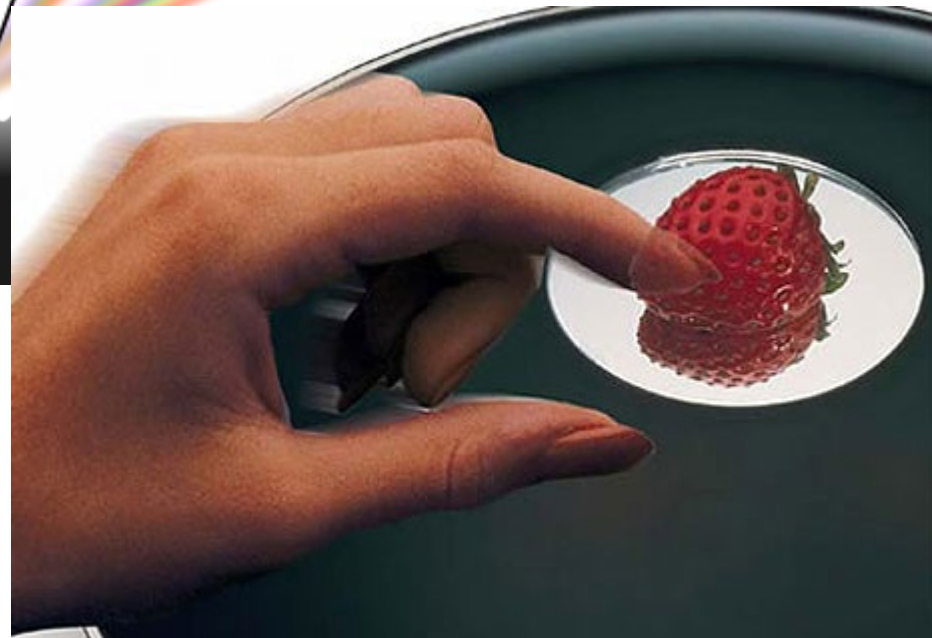
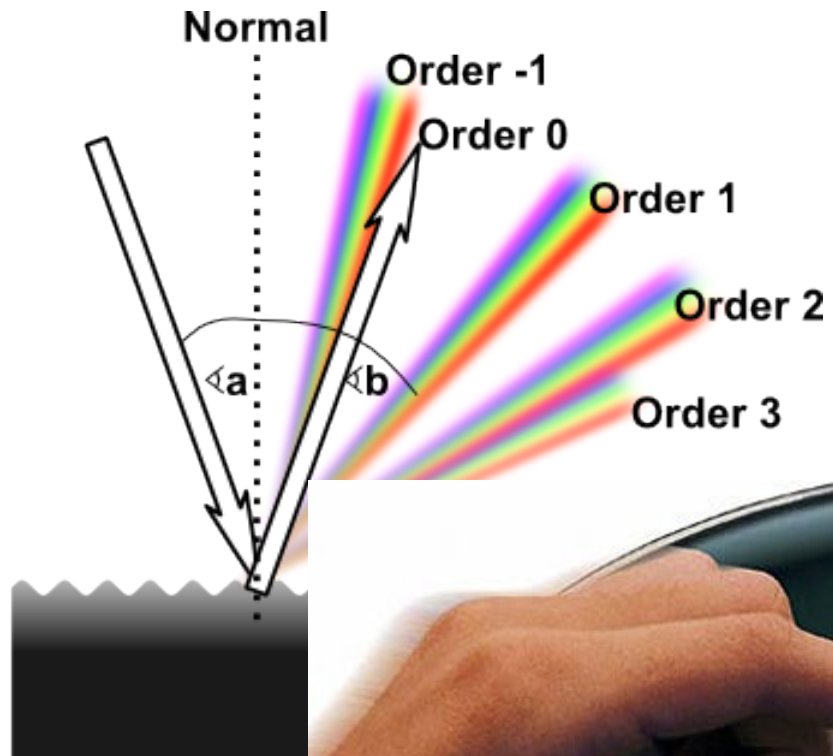
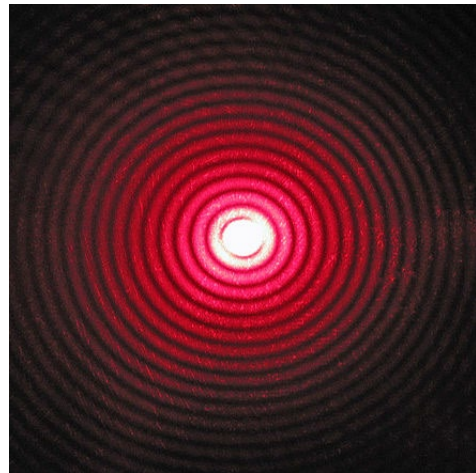


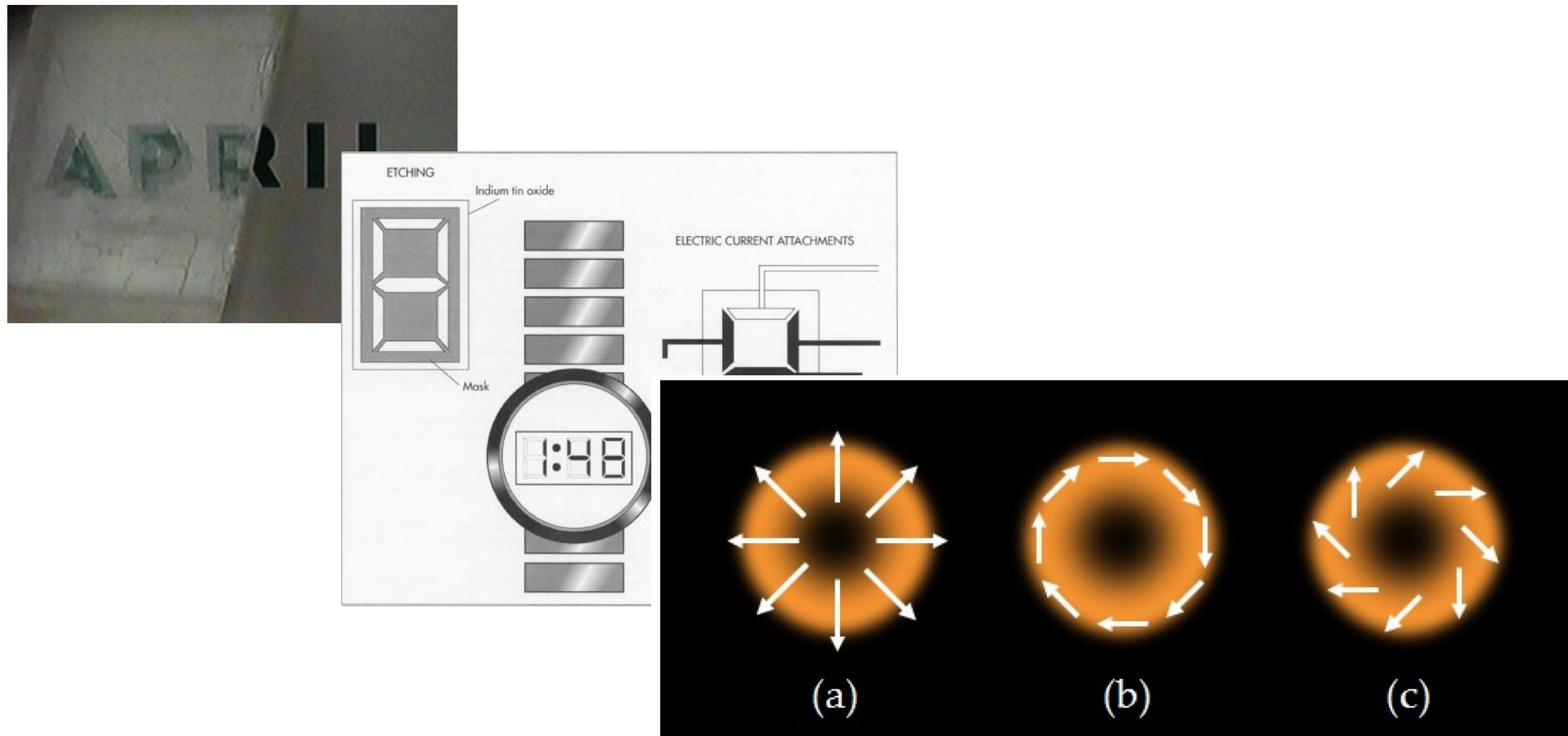
Figure 2. Control of aerial image contrast in interferometric lithography to test resist LER response

IBM Research Almaden

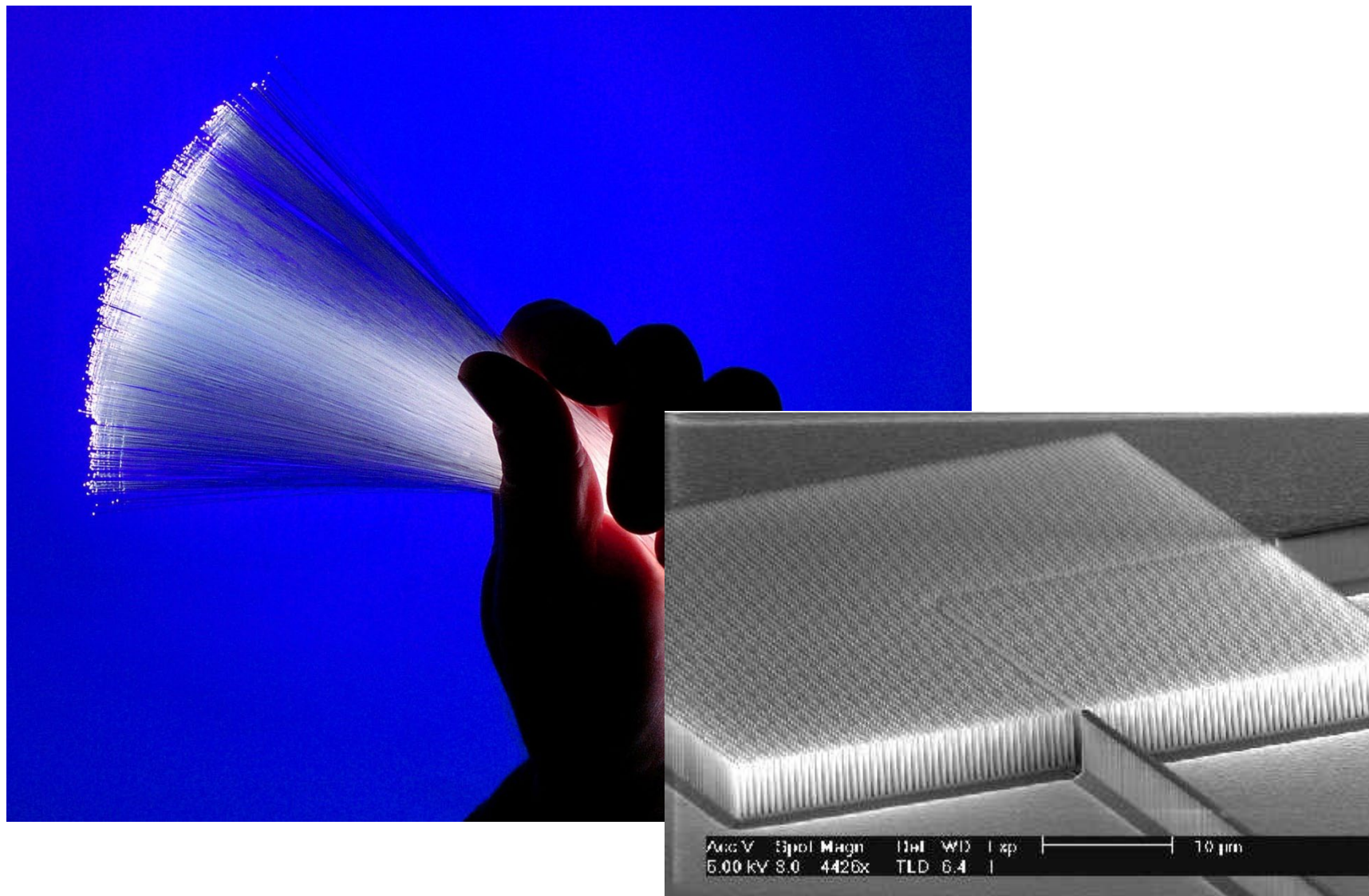
# Menu du cours – Optique de Fourier



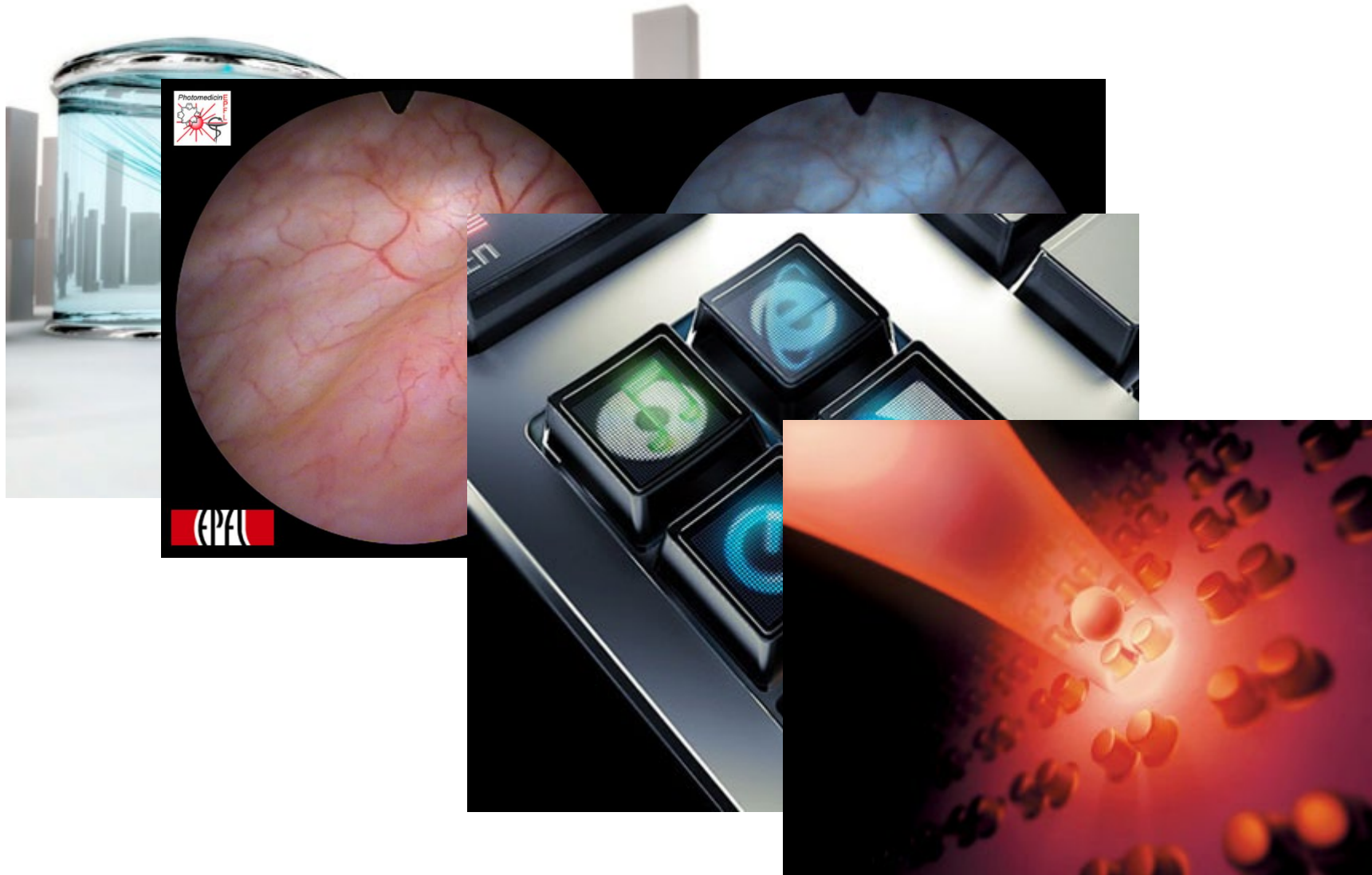
# Menu du cours – Optique de Maxwell, polarisation



# Guides d'ondes



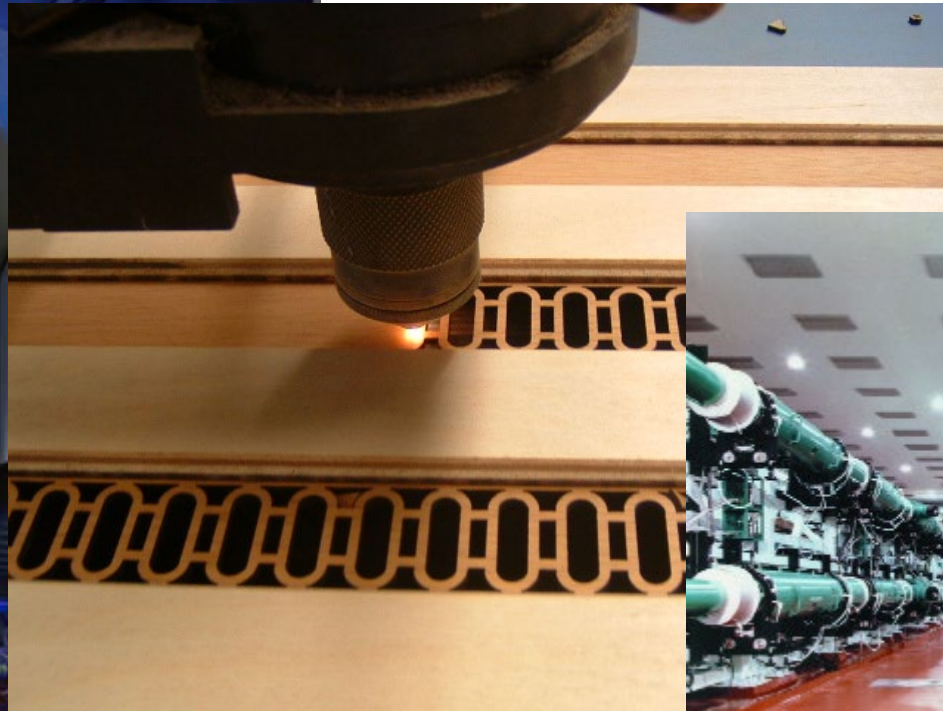
# Photons



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

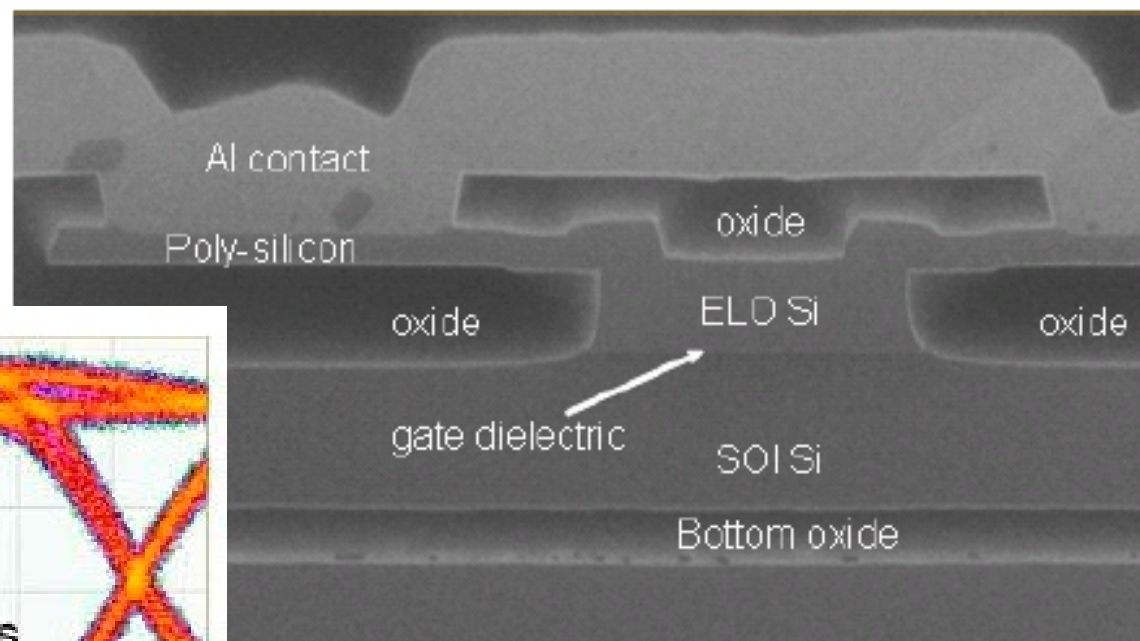
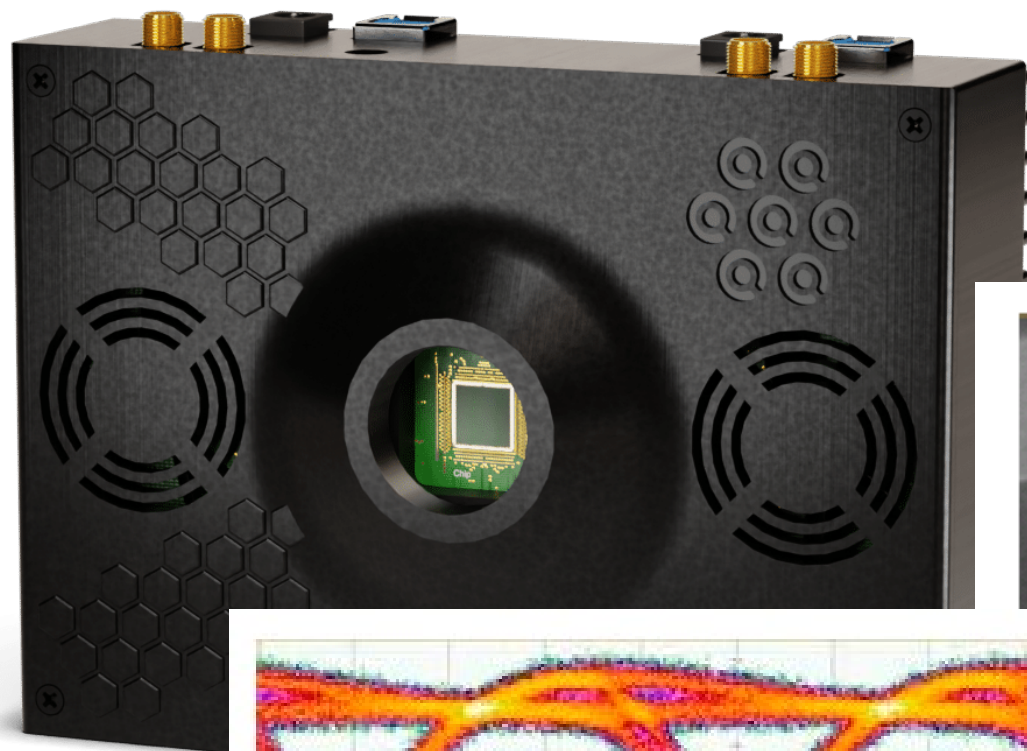
Olivier J.F. Martin

# Lasers et sources lumineuses

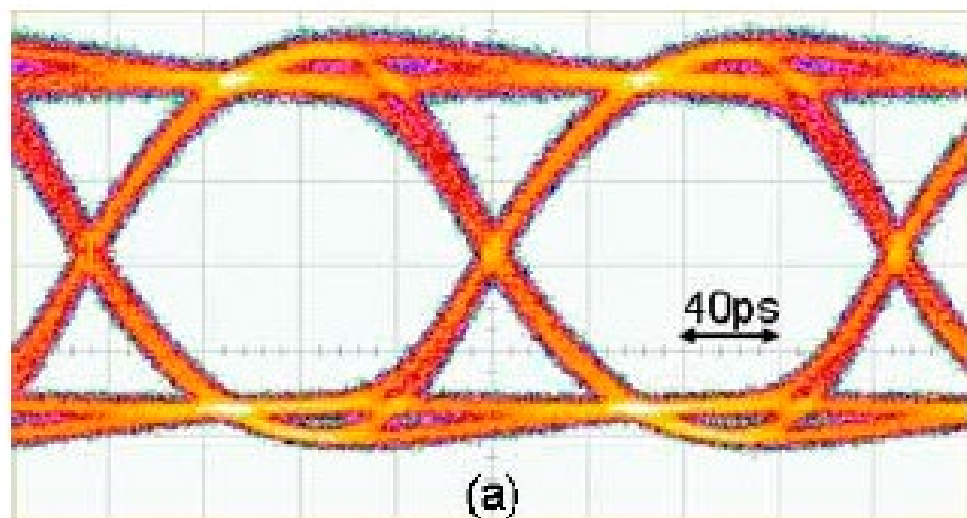


*LAI International; Endmills; LMJ project; Fianium*

# Photodétecteurs et dispositifs optoélectroniques



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



# Ingénierie optique

---

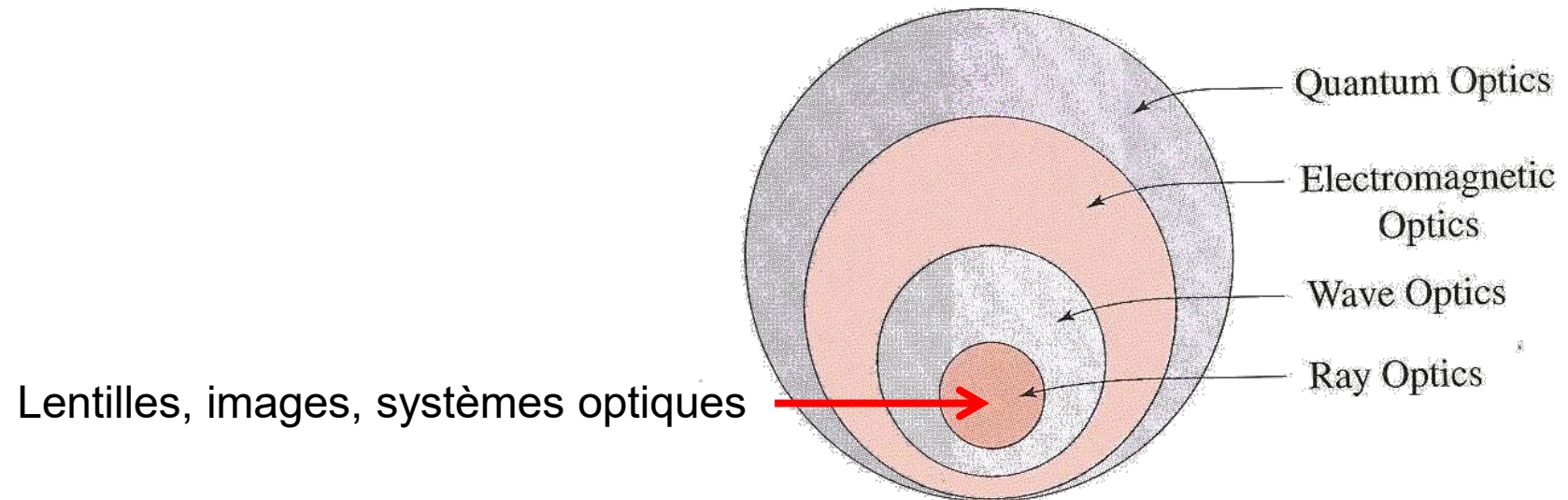
## Semaine 1 – partie 2

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



# Optique – Menu du cours

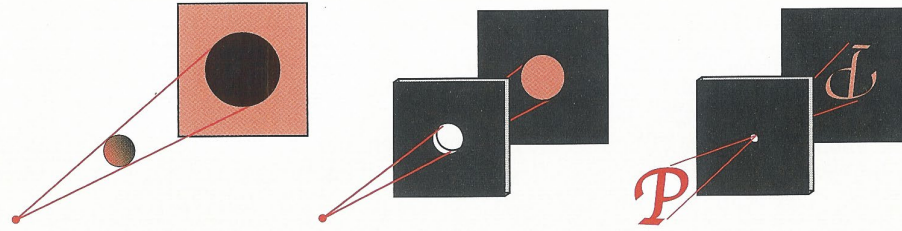
- Chaque chapitre de l'optique permet d'étudier des phénomènes nouveaux



## Postulats de l'optique géométrique

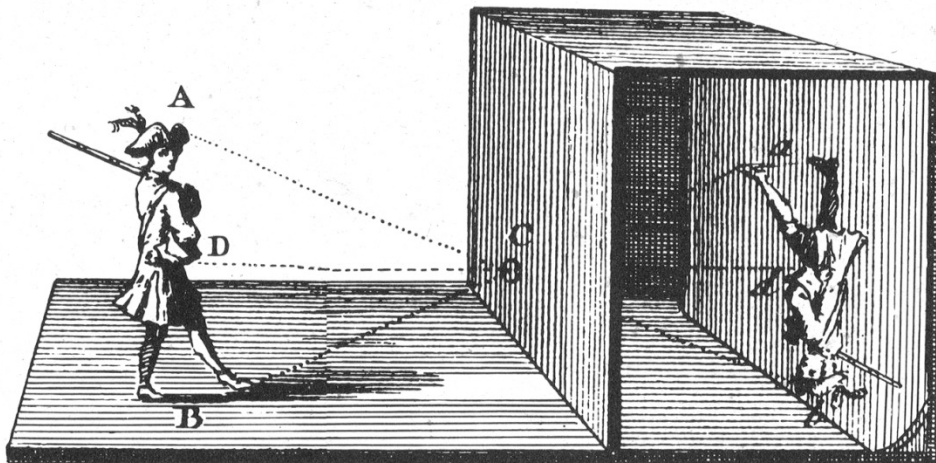
- Rayon: La lumière se propage sous forme de rayons. Ceux-ci sont émis par une source et peuvent être mesurés par un détecteur.
- Indice de réfraction: Tout milieu est caractérisé par un indice de réfraction  $n$  ; en général  $n \geq 1$ .
- L'indice représente le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide  $c_0$  à la vitesse  $c$  dans le milieu:  $n = c_0 / c$  ou  $c = c_0 / n$
- Principe de Fermat: le chemin choisi par la lumière est un extremum par rapport aux chemins voisins, en général le chemin le plus court (= le plus rapide)

# 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



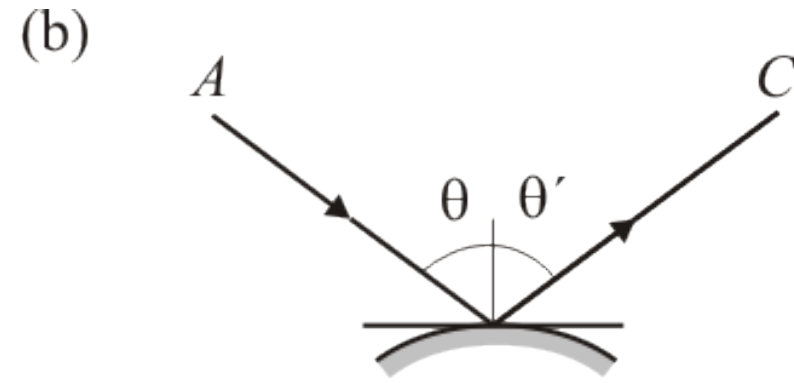
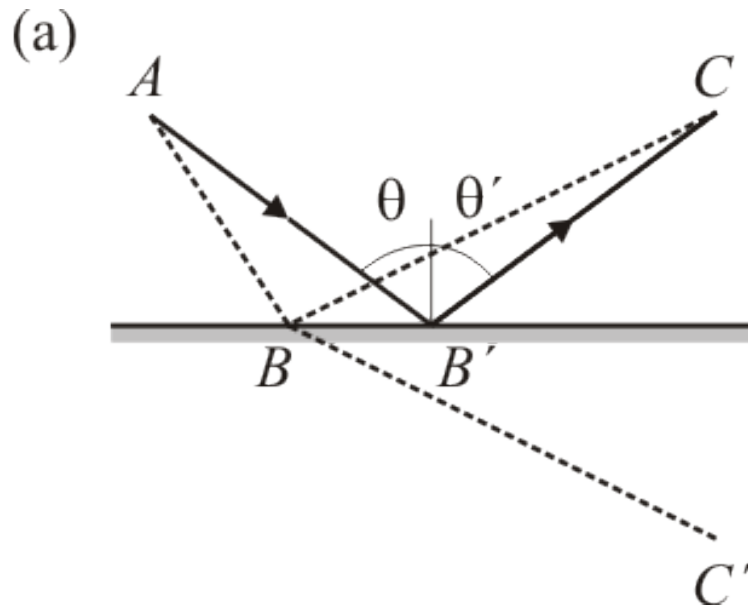
*Wikimedia*



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

Olivier J.F. Martin

# 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?

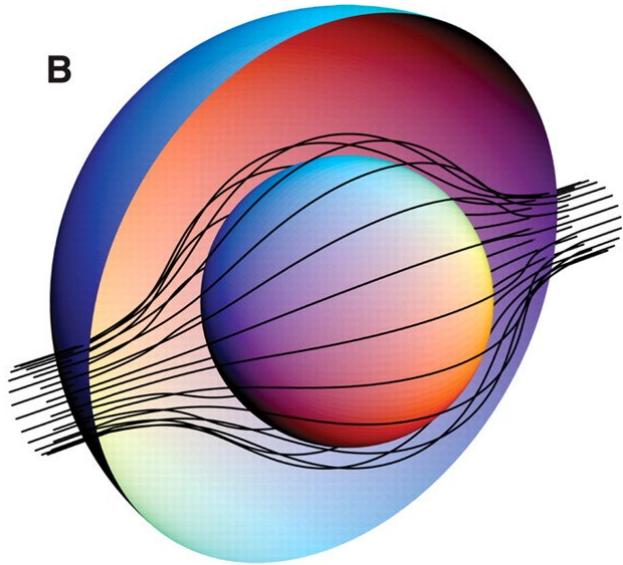


- Cape d'invisibilité:



## 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



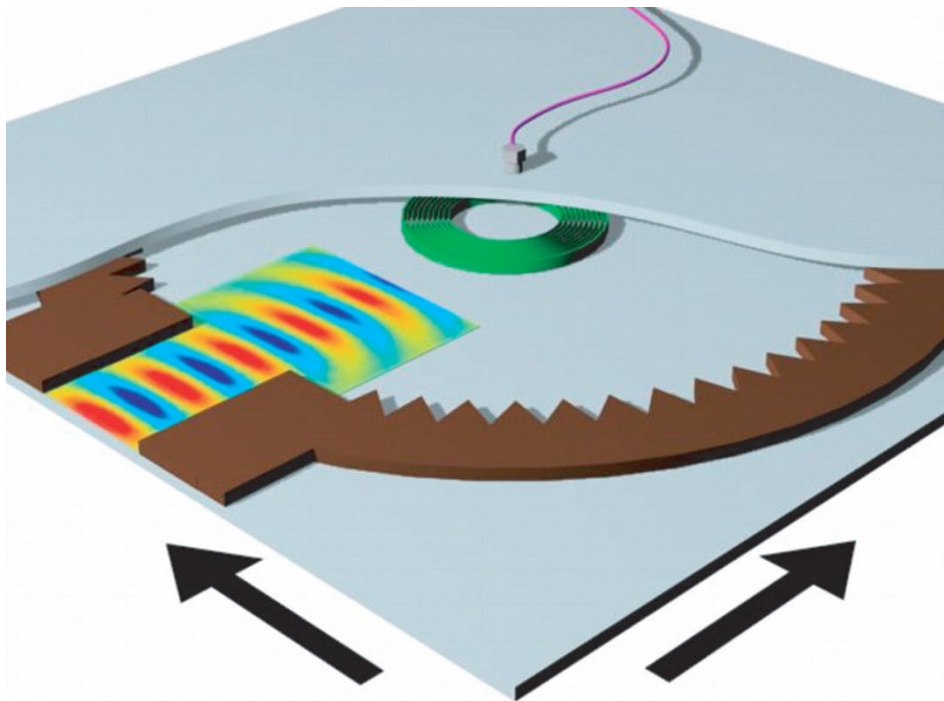
- Cape d'invisibilité:



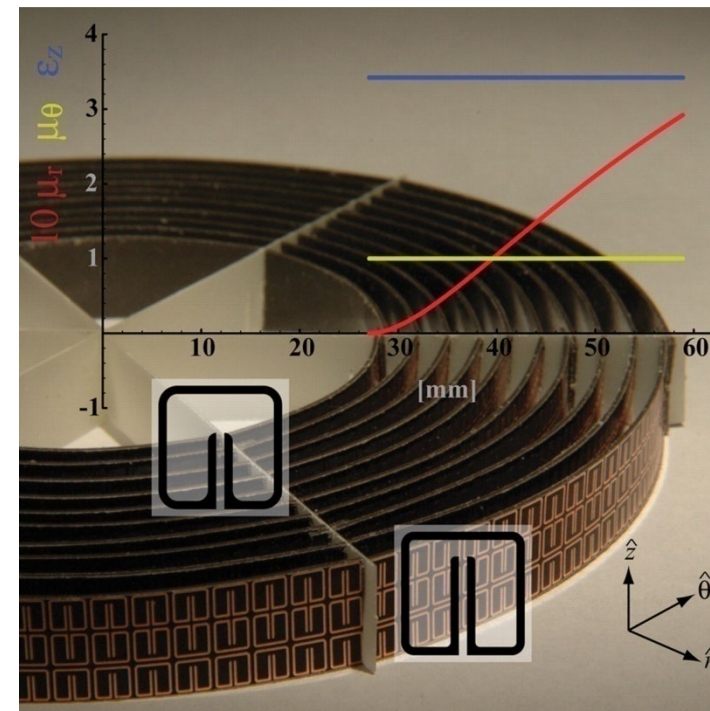
*J.B. Pendry et al., Science vol. Vol. 312, p. 1780 (2006).*

## Cape d'invisibilité

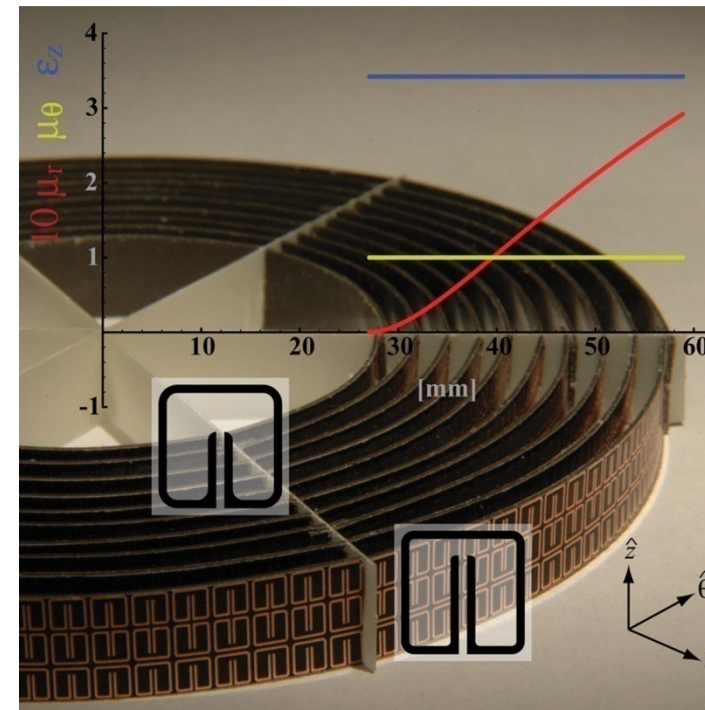
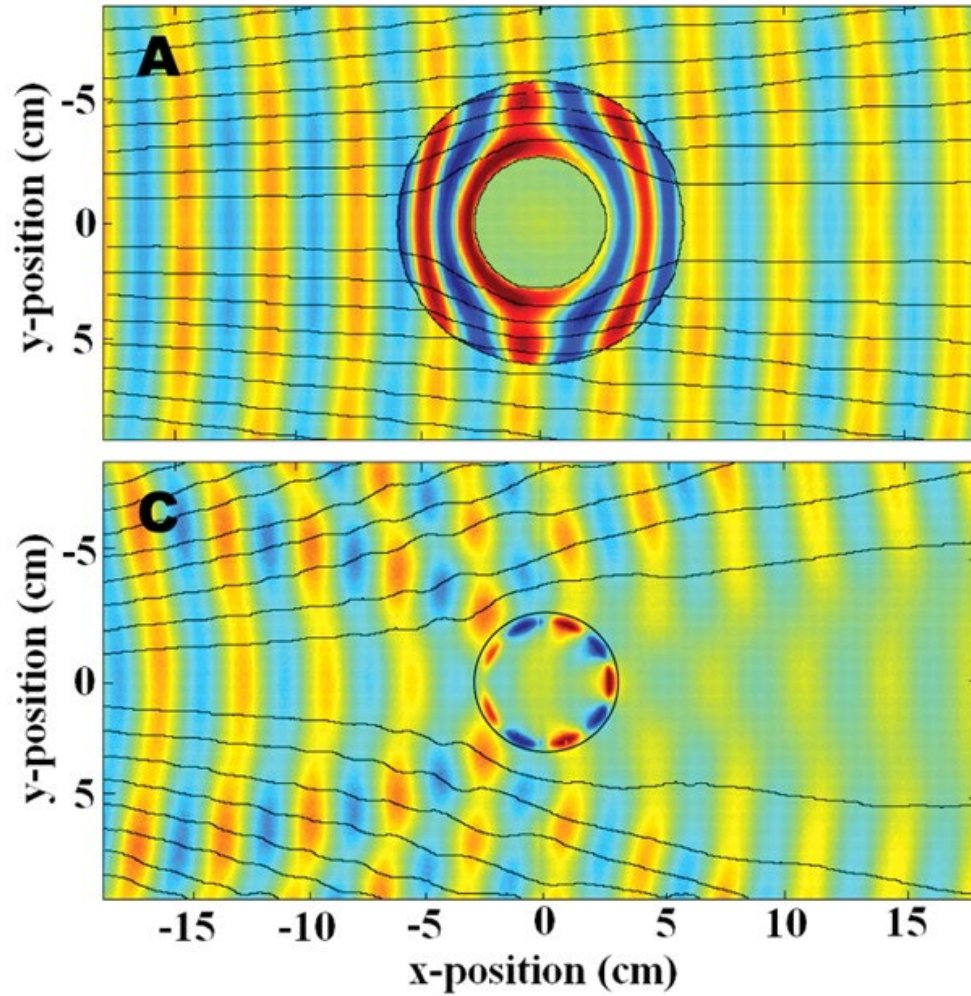
- Nécessite des variations très compliquées de l'indice de réfraction
- Comme les principes de l'optique peuvent s'appliquer sur l'entier du spectre électromagnétique, on peut transposer une expérience d'optique aux fréquences micro-ondes, où la longueur d'onde est beaucoup plus grande et l'expérience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



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



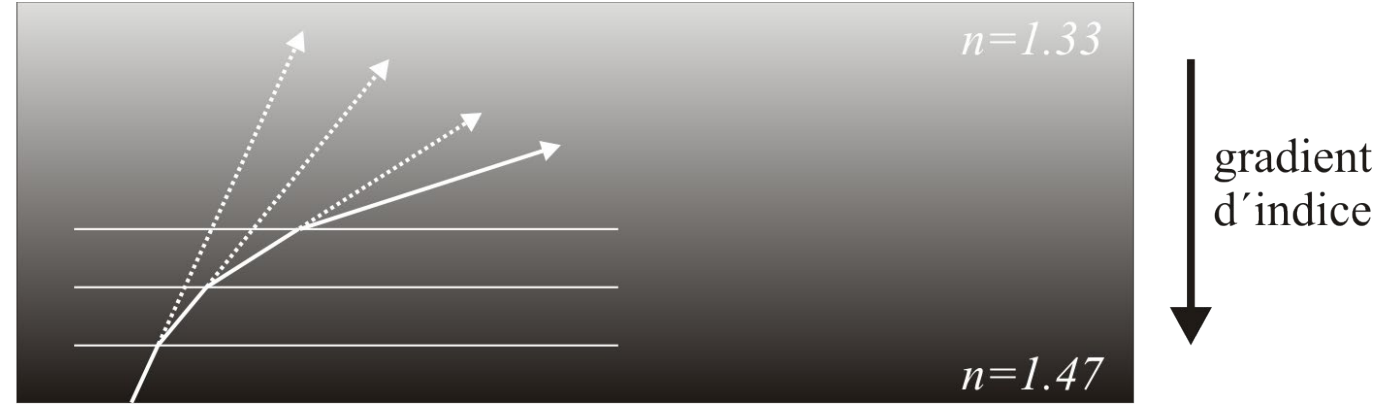
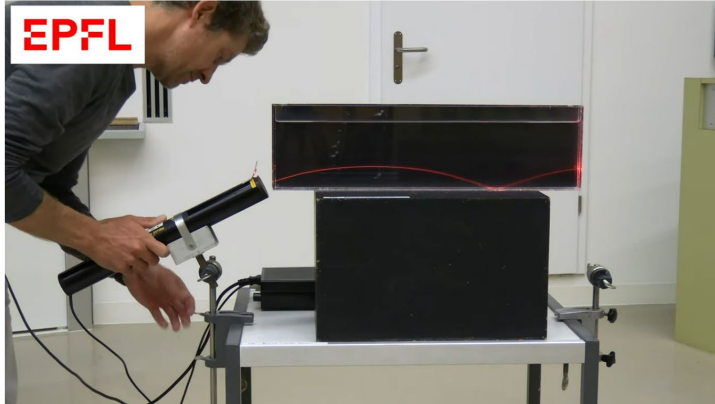
# Cape d'invisibilité – Démonstration aux fréquences micro-ondes



*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  $n=1.47$ )

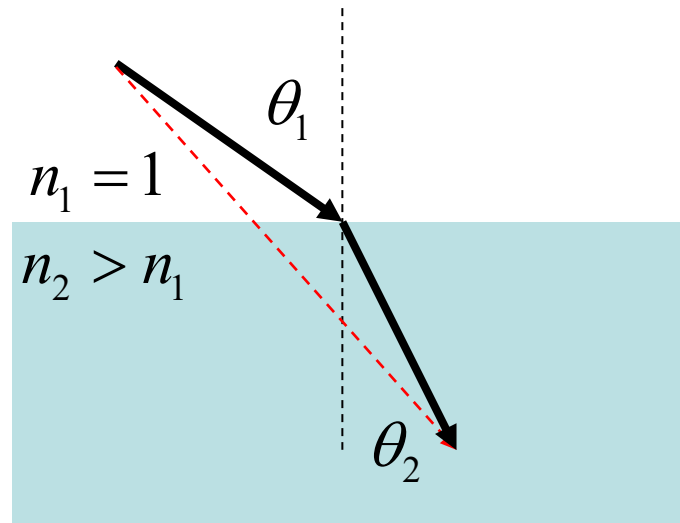


- Le rayon est toujours courbé dans le sens du gradient d'indice

## Postulats de l'optique géométrique

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

Réfraction:



Loi de Snell:

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

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

$d$

$n = 1$

$L_{AB} = d$

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

$d$

$n > 1$

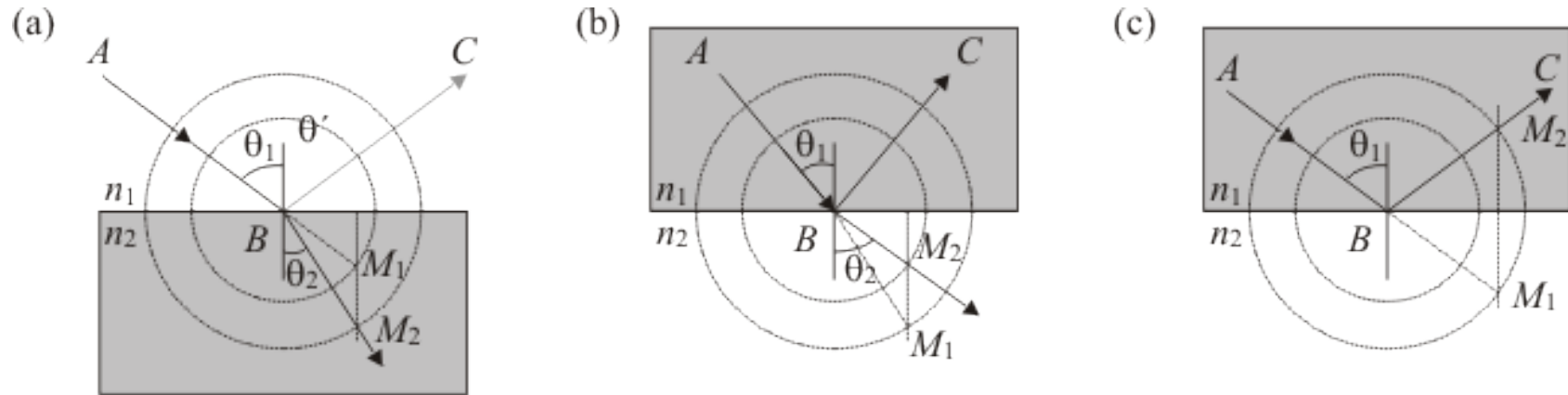
$L_{AB} = n d$

## Réfraction – Construction géométrique

- On construit des cercles dont les rayons sont proportionnels aux indices  $n_1, n_2$ :

Loi de Snell:

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



- L'optique géométrique ne permet pas de déterminer les amplitudes des ondes réfléchies et transmises, on le fera avec l'optique de Maxwell
- Réflexion interne totale (depuis un milieu d'indice élevé, vers un milieu d'indice plus petit), angle critique:

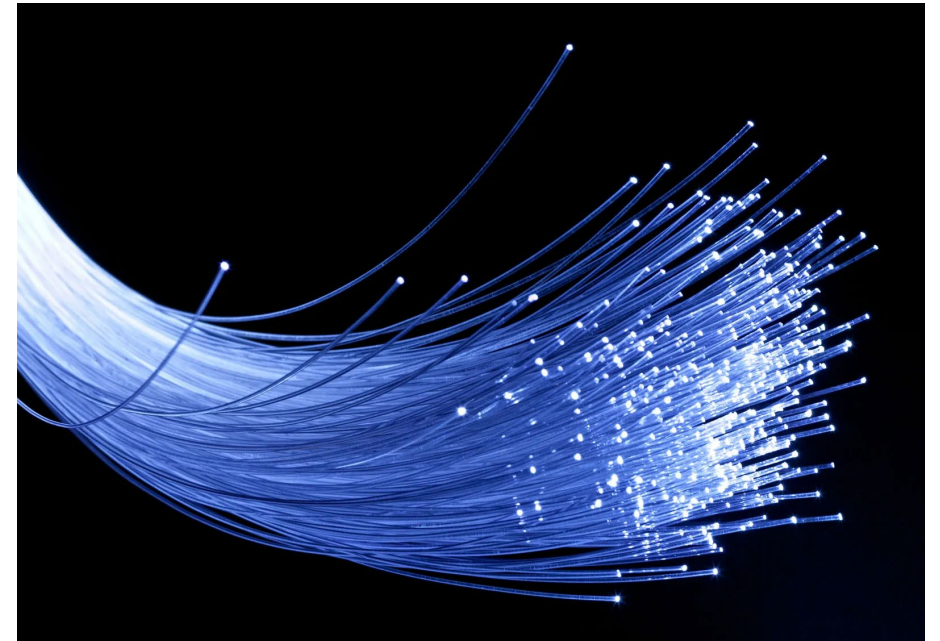
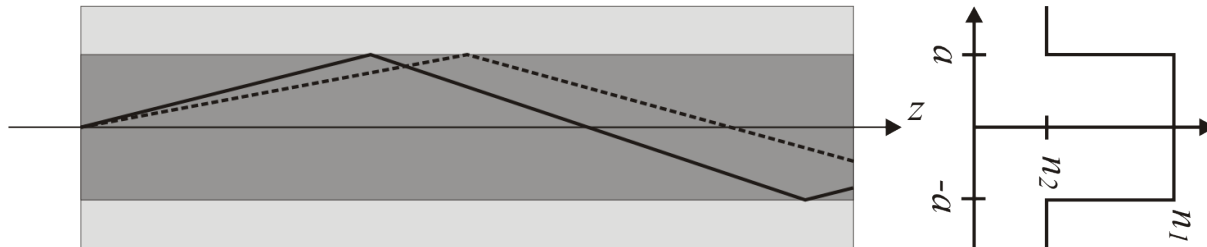
$$\theta_c = \arcsin(n_2 / n_1)$$

- 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

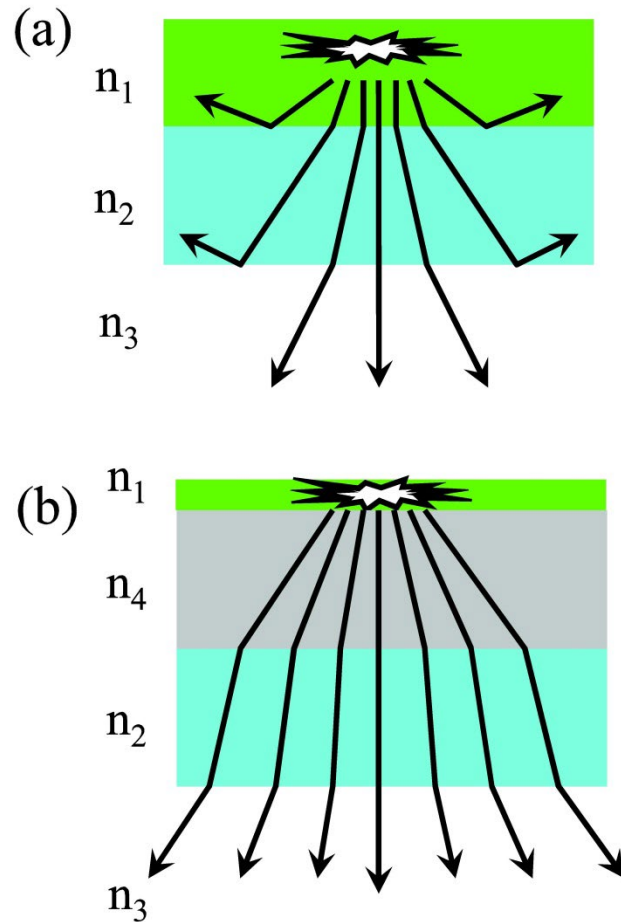
(a)



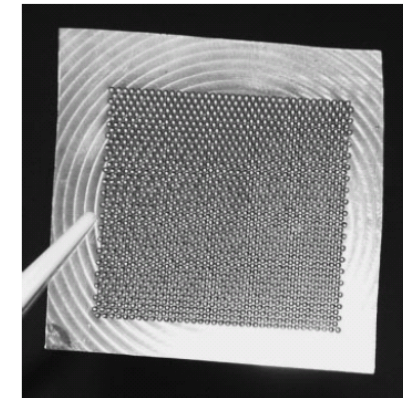
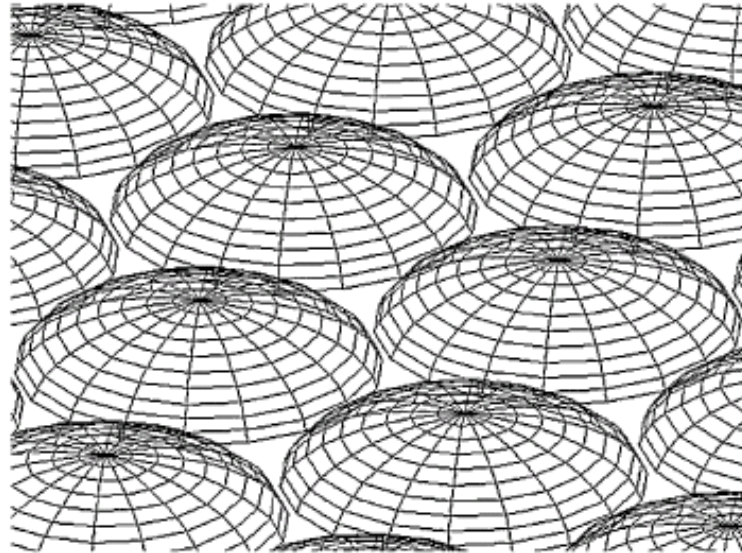
*Britannica.com*

## Extraction de la lumière d'une LED

- Tous les dispositifs optoélectroniques ont un indice de réfraction plus important que l'air ( $\rightarrow$  possibilité de réflexion interne totale)
- Une partie importante de la lumière reste piégée à l'intérieur du dispositif



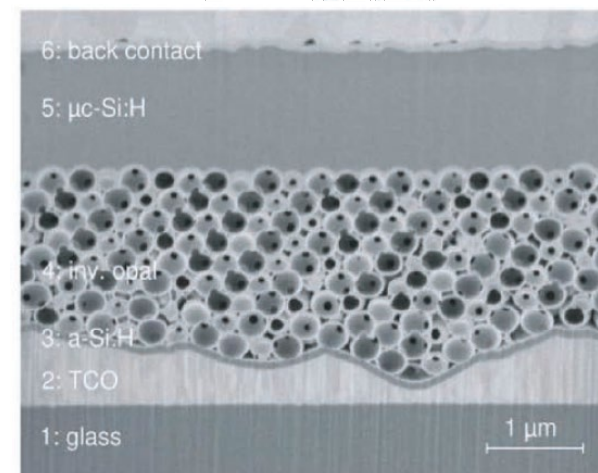
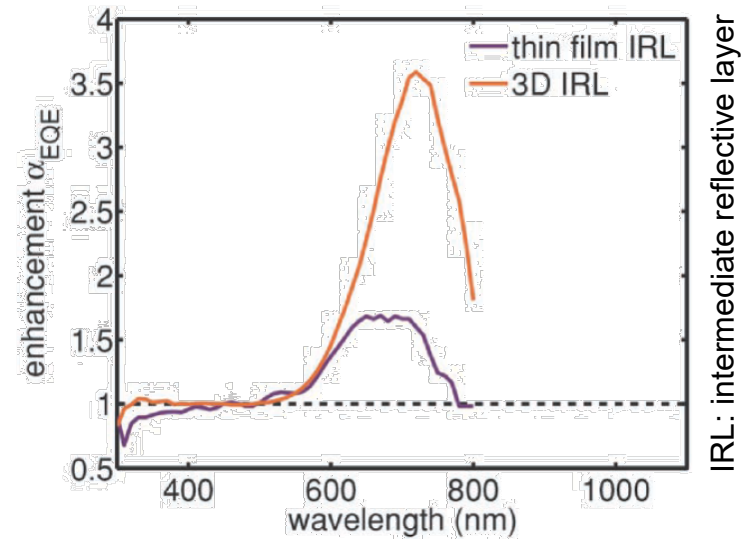
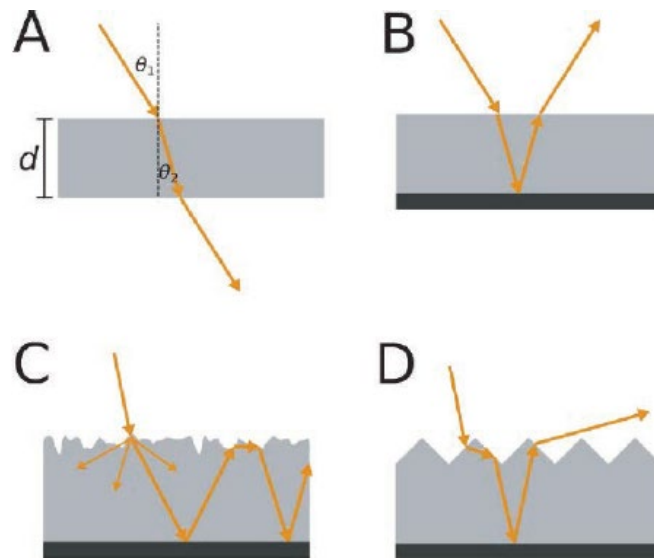
- On peut l'éviter en structurant la surface:



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

# Piégeage de la lumière dans une cellule solaire

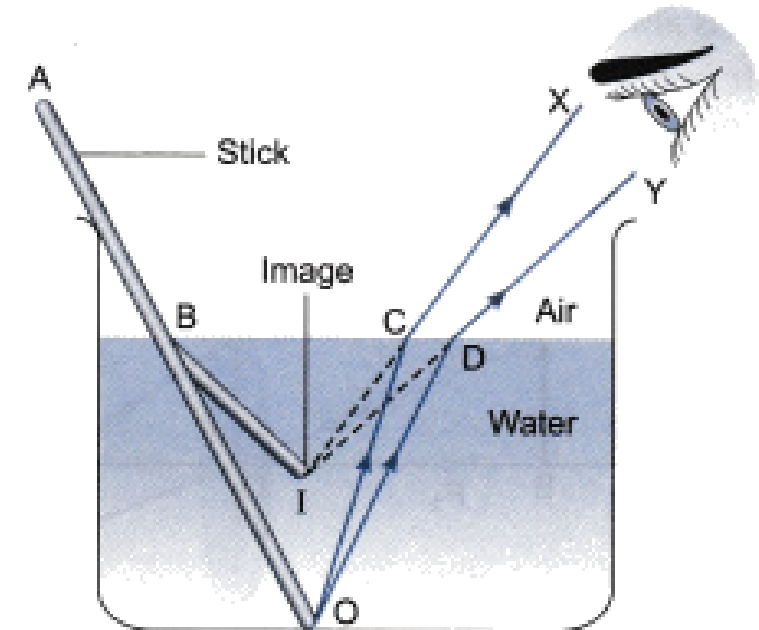
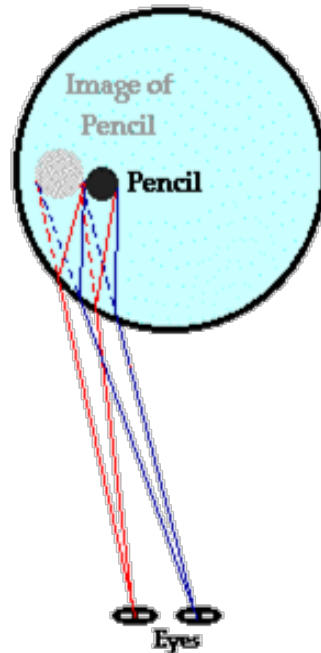
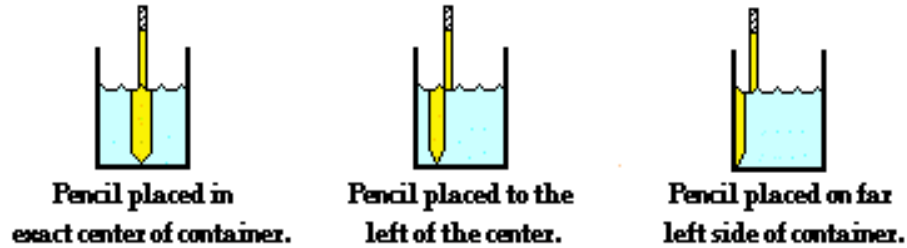
- Une problématique similaire (mais inverse!) existe dans les cellules solaires pour lesquelles on essaie de piéger la lumière en structurant la surface



# 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

---

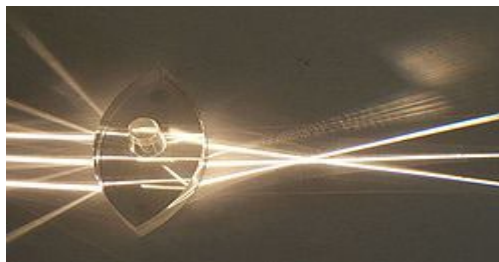
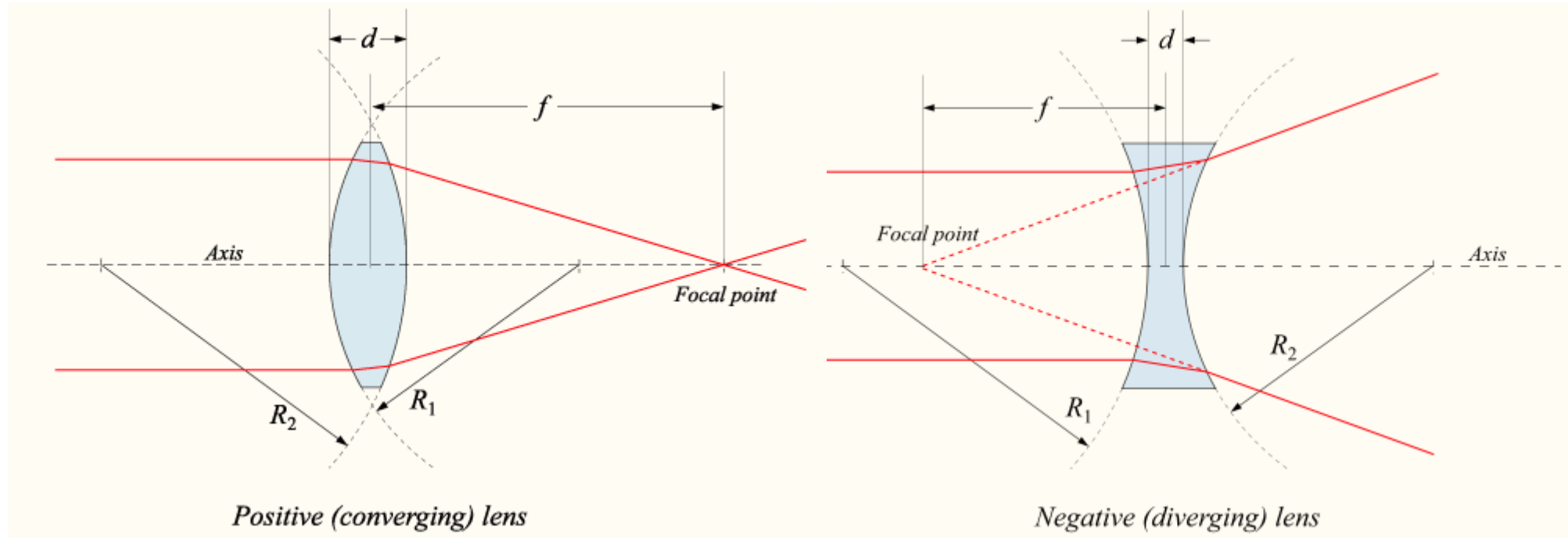
## Semaine 1 – partie 3

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:

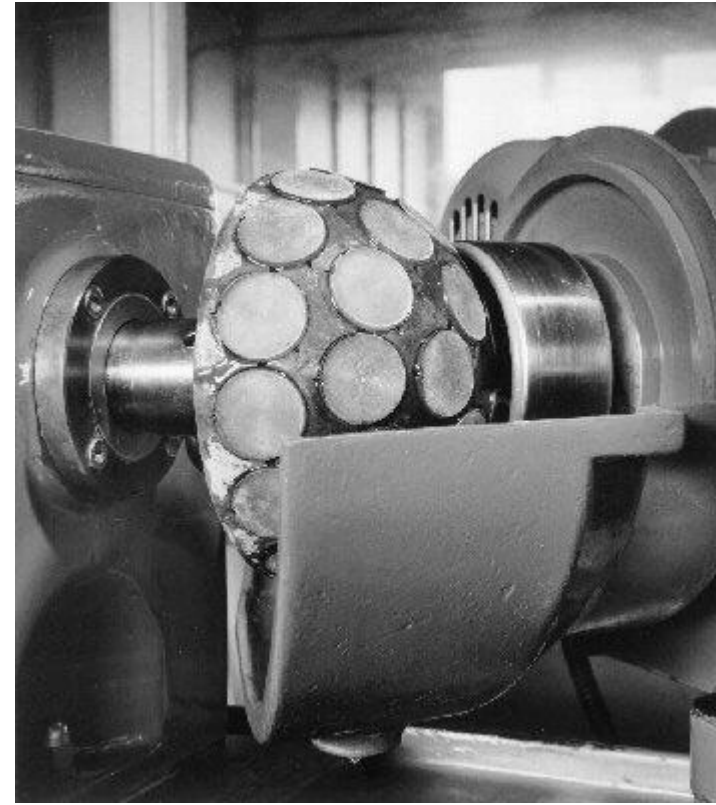
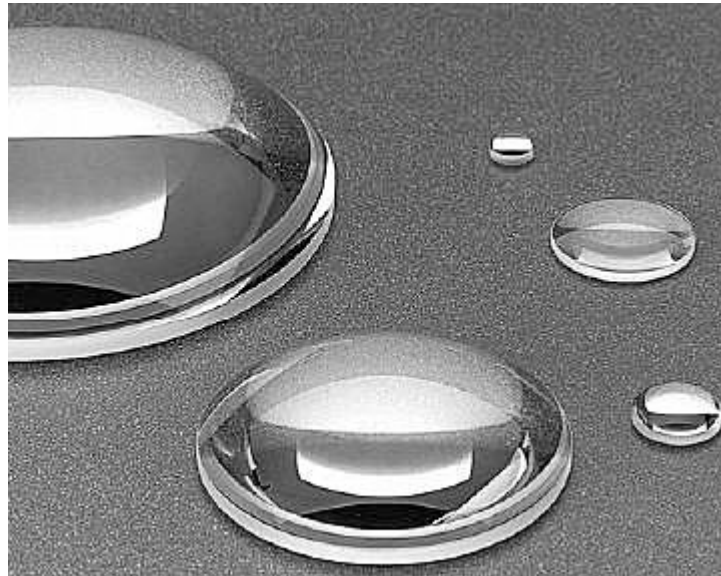


[en.wikipedia.org/wiki/Lens\\_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Lens_(optics))

## Polissage d'une lentille



*Schneider OM, Germany (2008)*

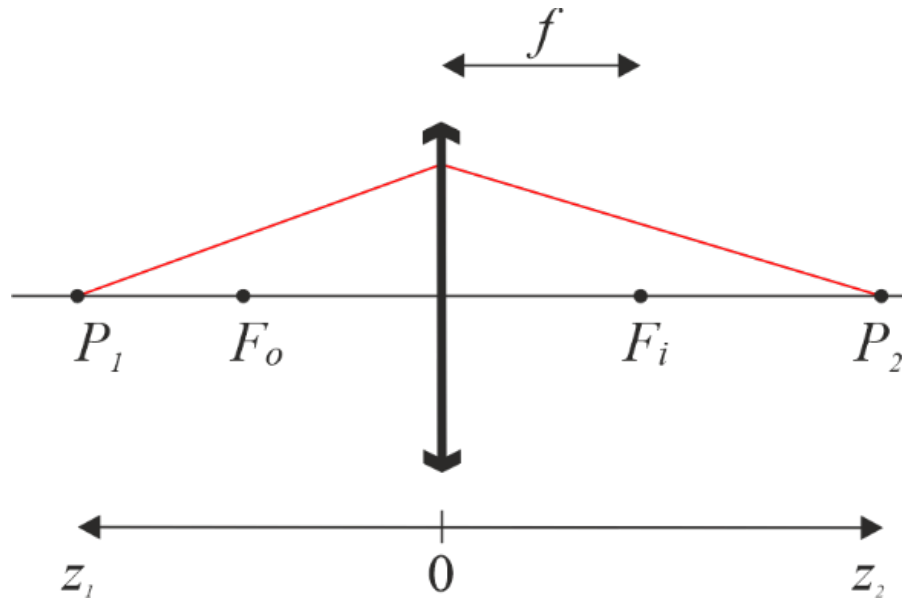


*Rollei company, Braunschweig, Germany (1959)*

*Mells Griot*

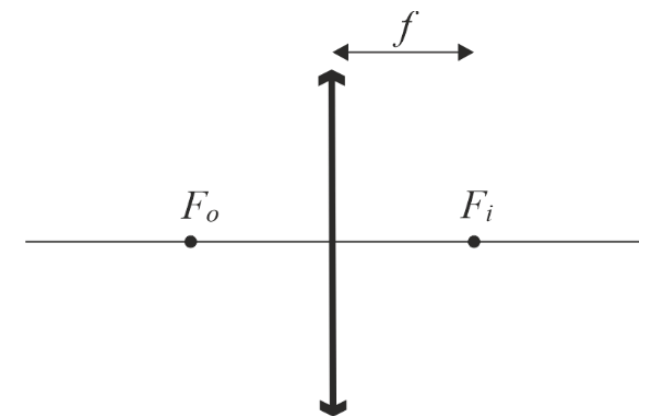
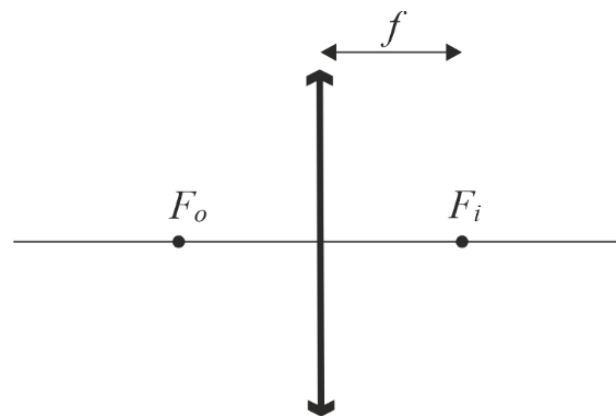
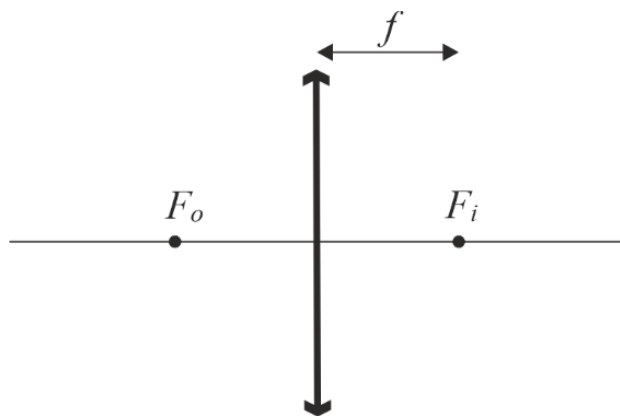
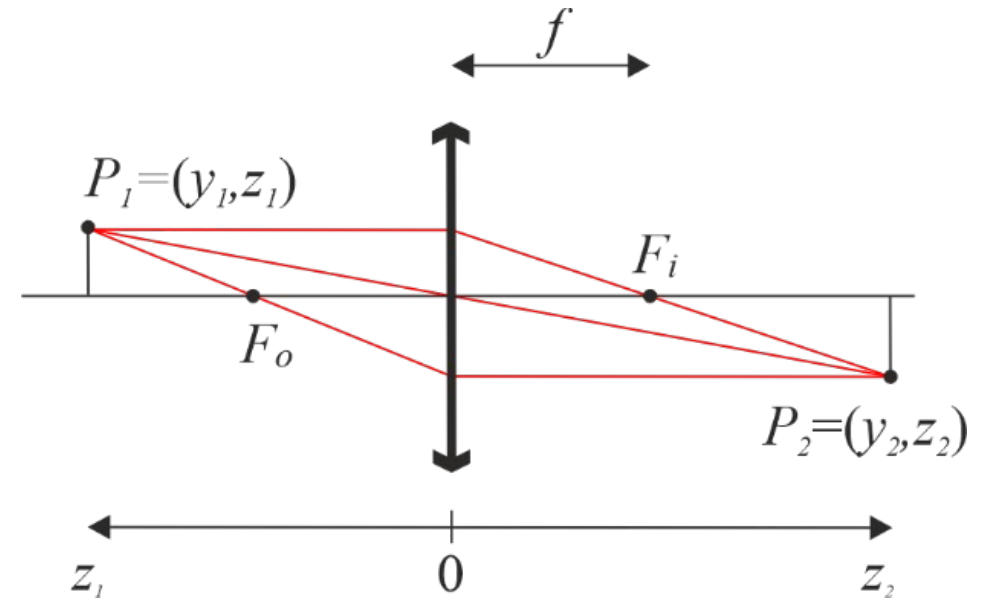
# Lentilles minces

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



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

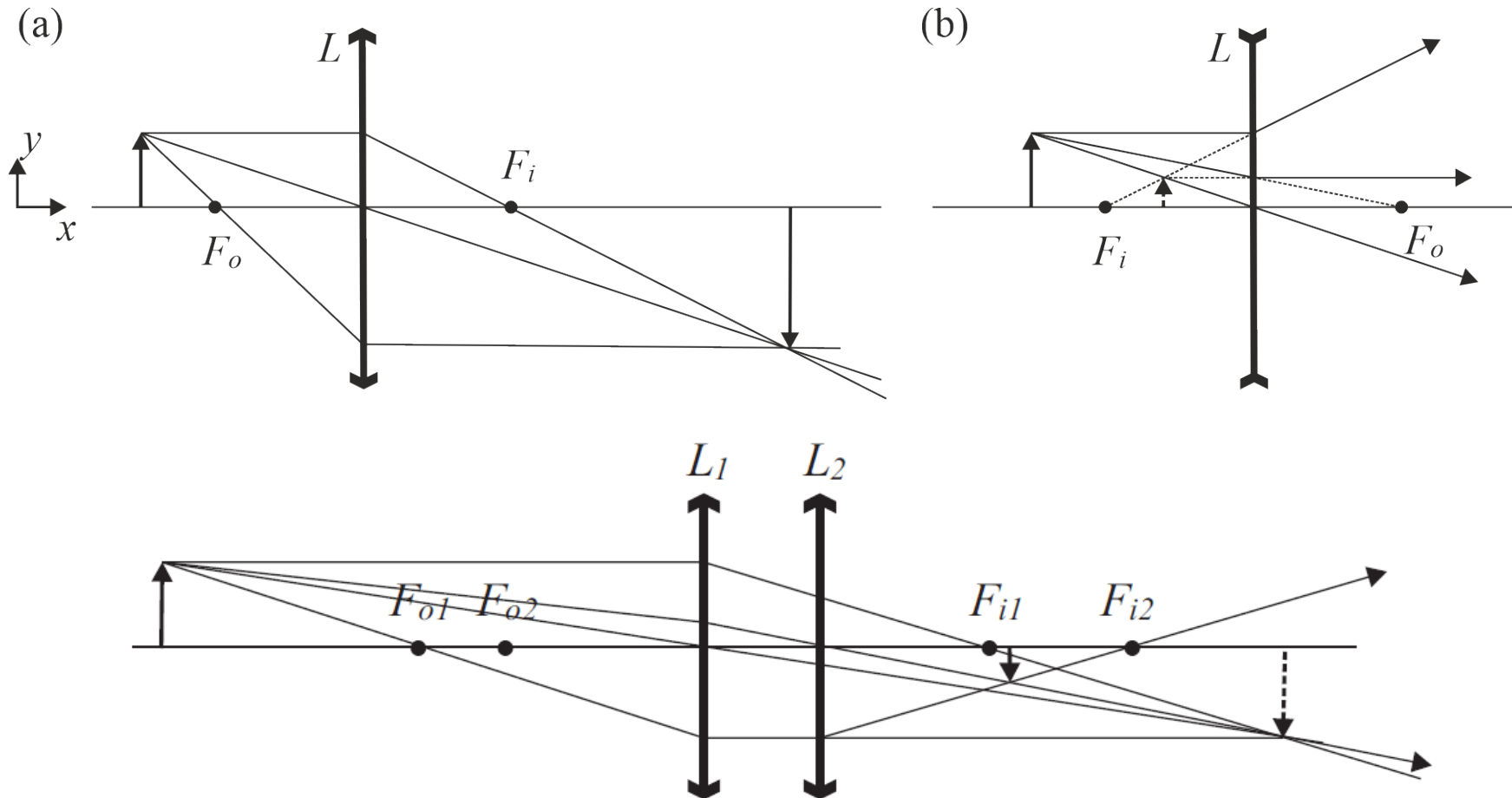
$$y_2 = -\frac{z_2}{z_1} y_1$$



# Tracé des rayons

- Construction des images:

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



# Ingénierie optique

---

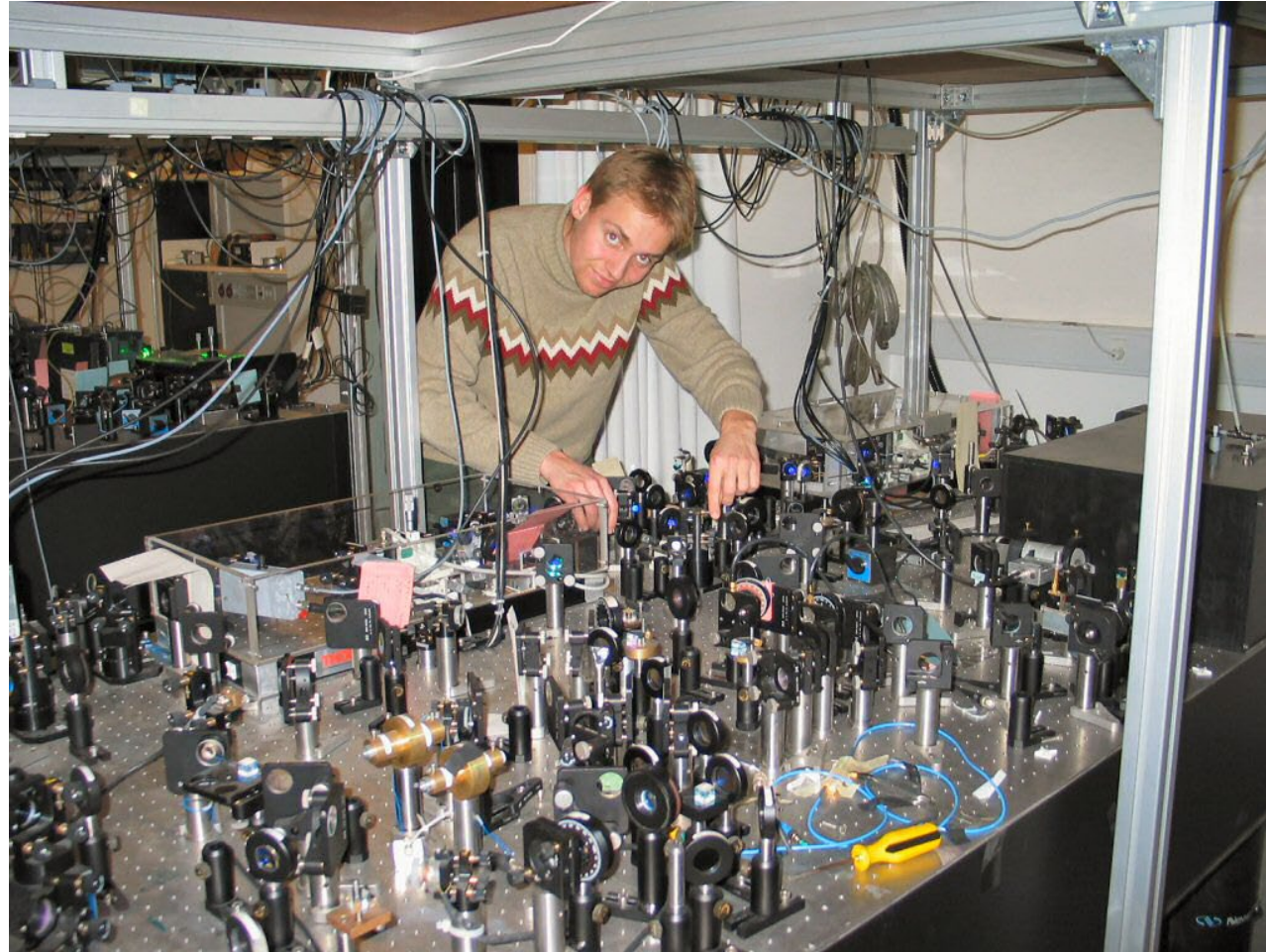
## Semaine 1 – partie 4

Olivier J.F. Martin  
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



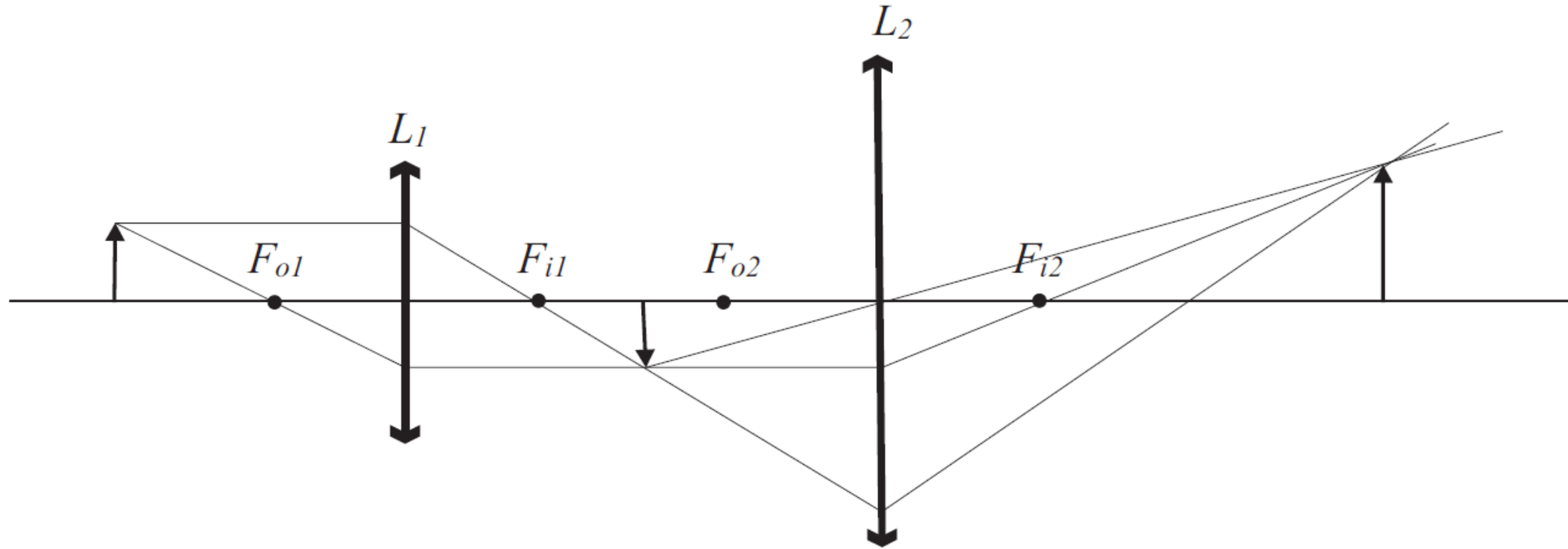
## Méthode matricielle ABCD

- Souvent on doit combiner un grand nombre de lentilles !



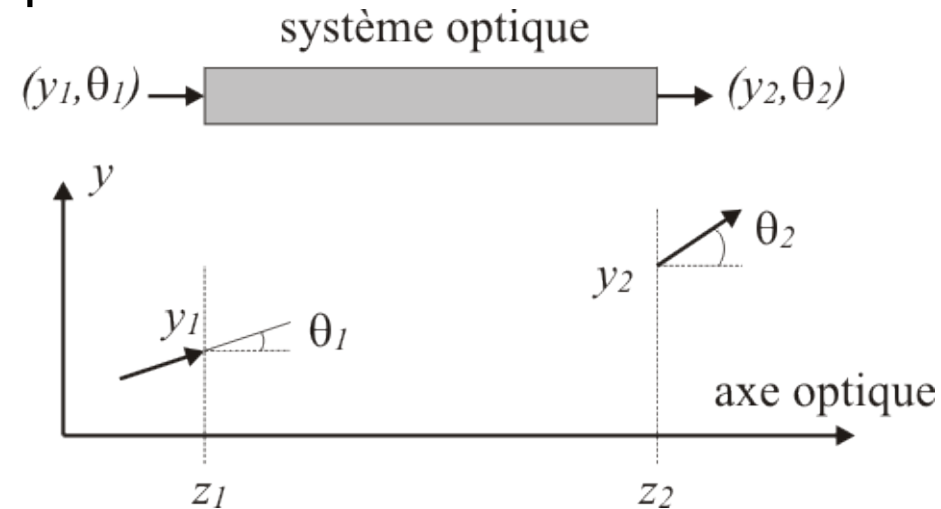
# Méthode matricielle ABCD

- Le tracé des rayons devient 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  $\theta$
- On suppose une relation linéaire (optique paraxiale,  $\sin \theta \simeq \theta$ ):

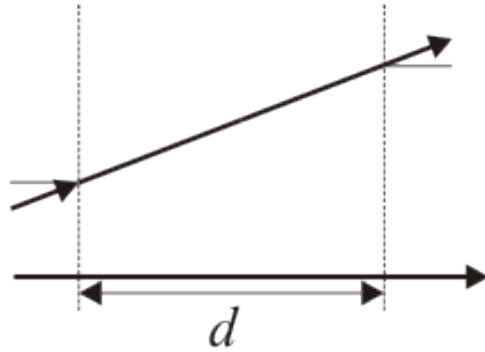
$$y_2 = Ay_1 + B\theta_1$$

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

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

# Méthode matricielle ABCD - Exemples

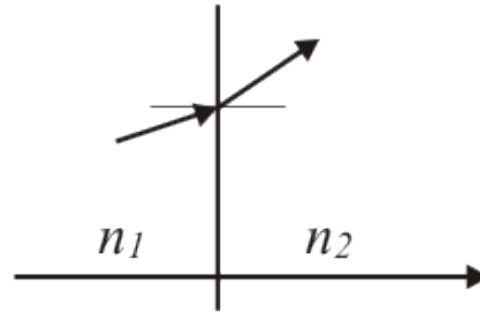
(a)



$$y_2 = y_1 + \theta_1 d \text{ et } \theta_2 = \theta_1$$

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

(b)

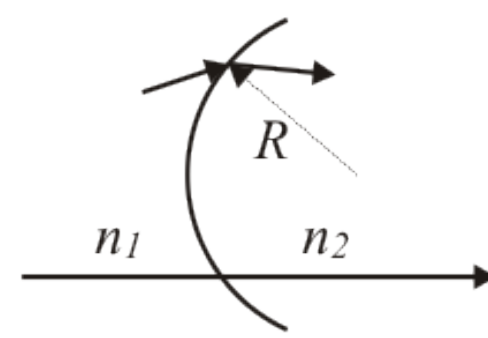


$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

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

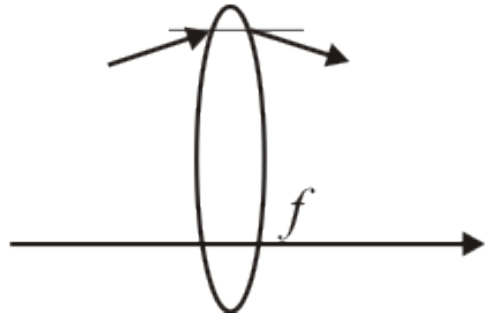
(c)



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

## Méthode matricielle ABCD - Exemples

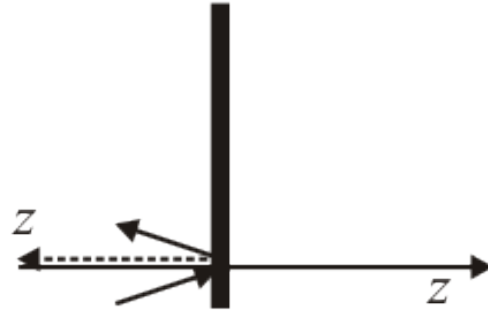
(d)



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

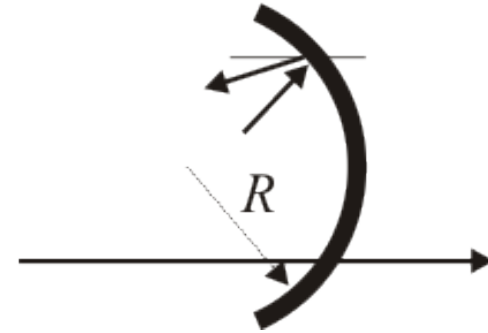
( $f > 0$  pour une lentille convexe,  
 $f < 0$  pour une lentille concave)

(e)



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

(f)



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

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

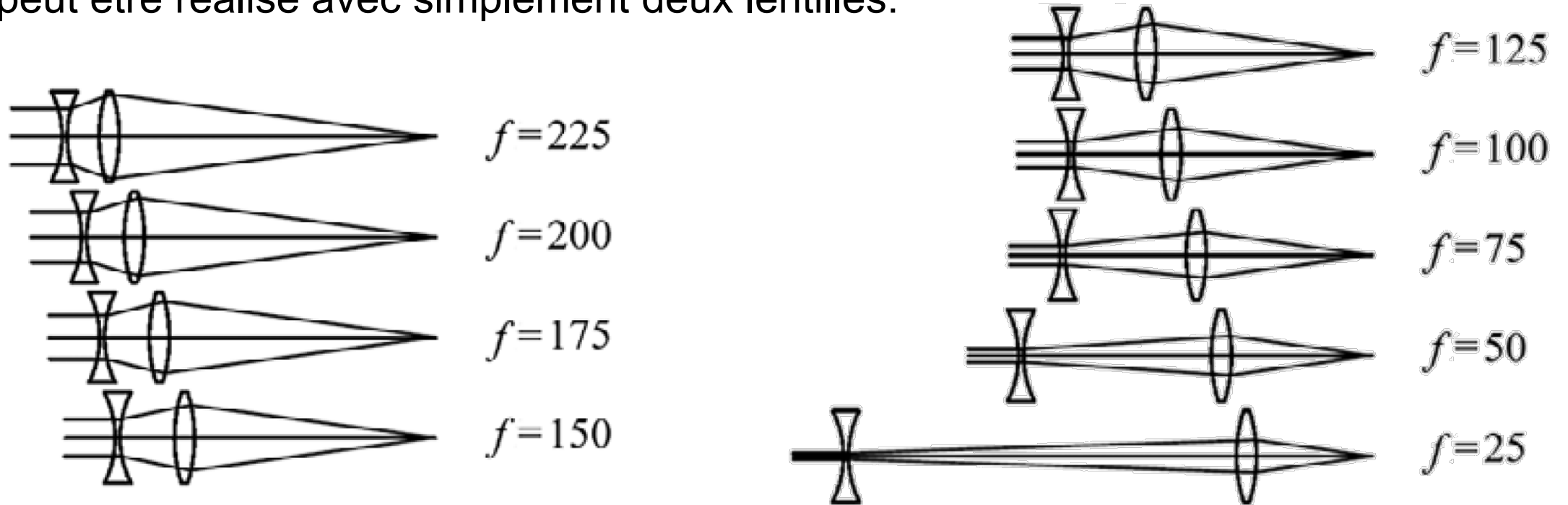
## Méthode matricielle – Elements en série



- 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)

## Zoom

- Un zoom permet de ne "sélectionner" qu'une petite partie d'un objet
- Il peut être réalisé avec simplement deux lentilles:

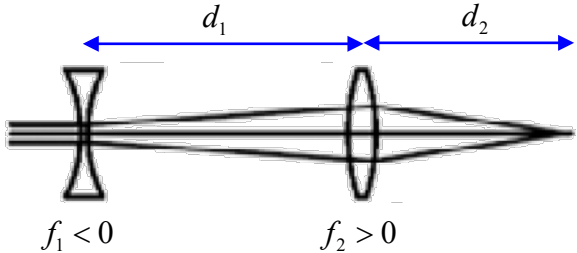


- La distance focale du système varie avec le grossissement
- Le mouvement des lentilles est assez complexe



## Zoom – Matrice ABCD

- Un zoom se résume à 4 matrices ABCD:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix}$$


$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M}_4 = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Matrice du système complet:

$$\mathbf{M} = \left( \mathbf{M}_4 \cdot \left( \mathbf{M}_3 \cdot \left( \mathbf{M}_2 \cdot \left( \mathbf{M}_1 \right) \right) \right) \right) = \begin{pmatrix} \frac{f_1 f_2 - f_2 d_1 + d_1 d_2 - f_2 d_2 - f_1 d_2}{f_1 f_2} & d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f_2} \\ \frac{d_1 - f_1 - f_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d_1}{f_2} \end{pmatrix}$$

- En comparant avec une lentille, on note que la focale d'un zoom vaut:

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d_1}$$

## Matrice ABCD convention

- Attention, nous avons utilisé cette convention:

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

- Il existe des livres qui utilisent la convention:

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

- Il faut seulement faire attention à l'ordre des variables  $(y, \theta)$  et ne pas les changer en cours de route!