



La lumière et l'infiniment petit :

# La Nanophotonique

**Antoine Moreau**

Université Blaise Pascal  
Clermont-Ferrand  
France

<http://www.e-scio.net>

# Pourquoi Nanophotonique ?

## ➤ Nano...

Structures allant d'une taille de quelques nanomètres à un micromètre (techniques récentes)

## ➤ ...photonique

Optique : l'oeil, les lentilles  $\Rightarrow$  optique géométrique

Photonique : description ondulatoire, voire quantique

**La Nanophotonique est le futur de l'optique.**

# La Nanophotonique

- Nature ondulatoire de la lumière

Diffraction, interférences, iridescence...

- Cristaux photoniques

Maîtriser l'émission de lumière, guider, orienter.

- Tamis à photons

Filtrer la lumière grâce à des résonances (plasmons).

- Méta-matériaux

Les matériaux à indice négatif.

# L'optique géométrique

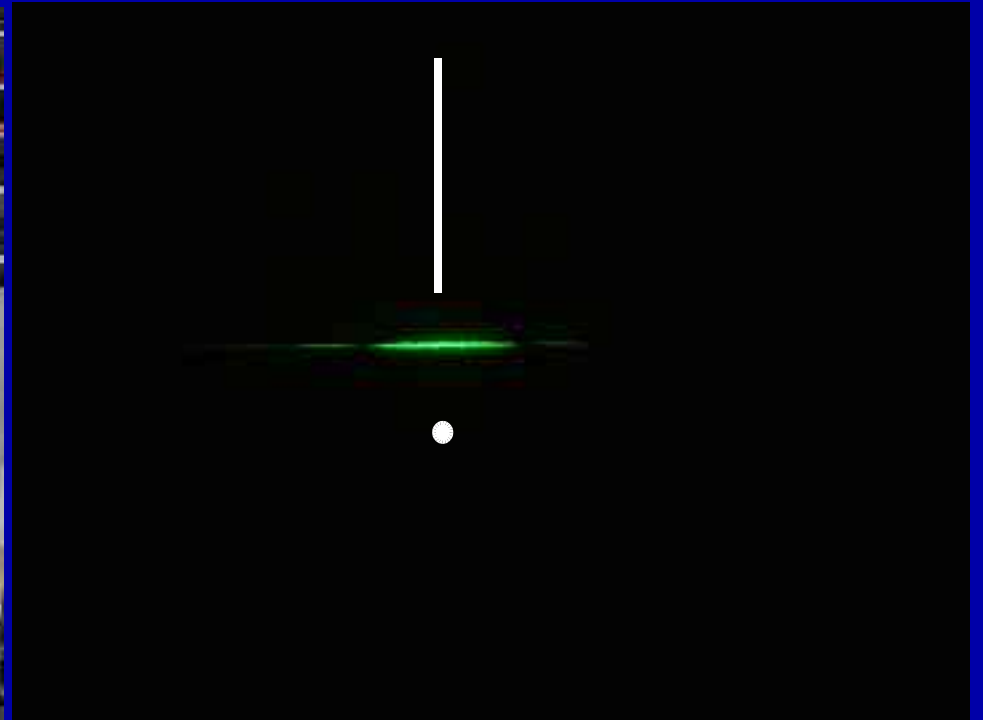
- Basée sur la loi de Snell-Descartes

$$n \sin i = n' \sin i'$$

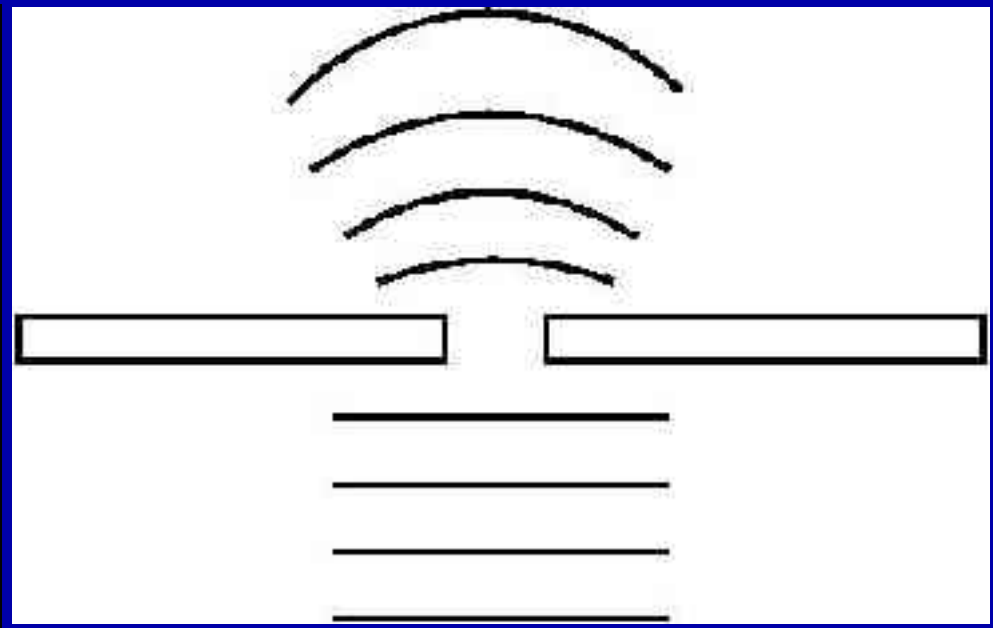
- Construction de lentilles, instruments d'optique = amélioration des capacités de l'oeil.



# Diffraction



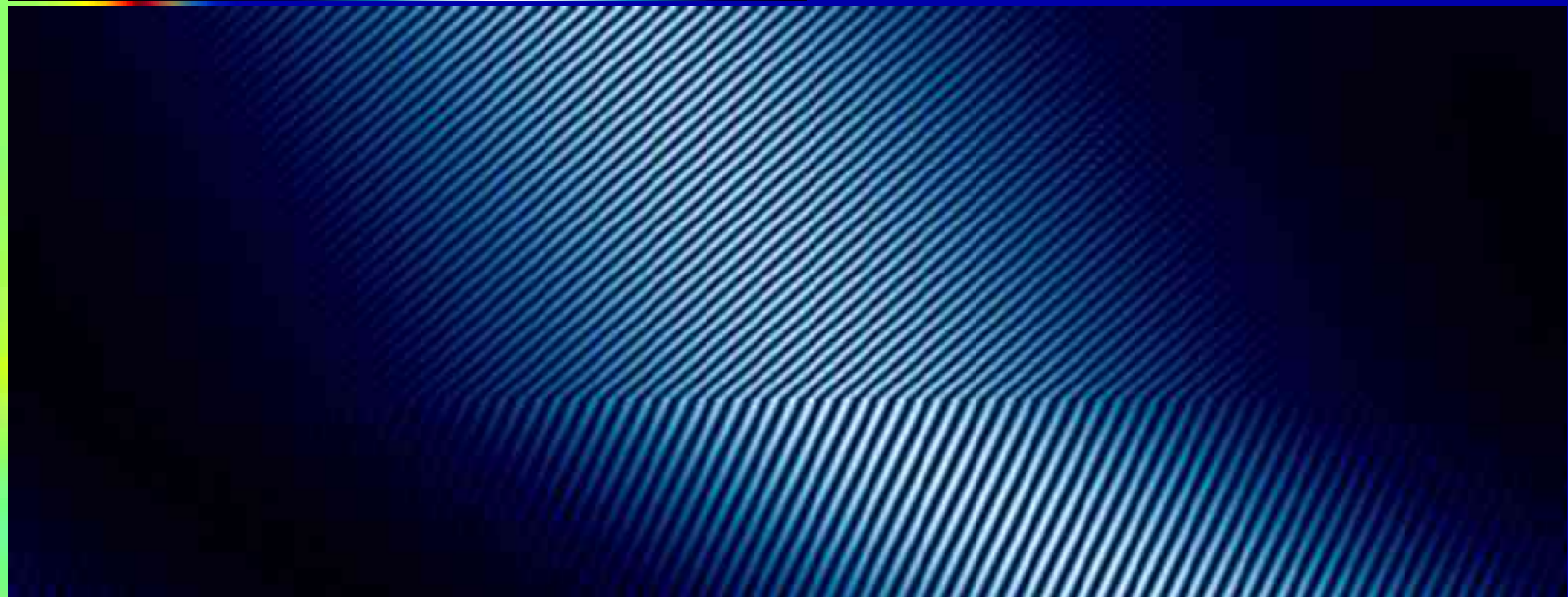
# Diffraction



# Indice d'un milieu

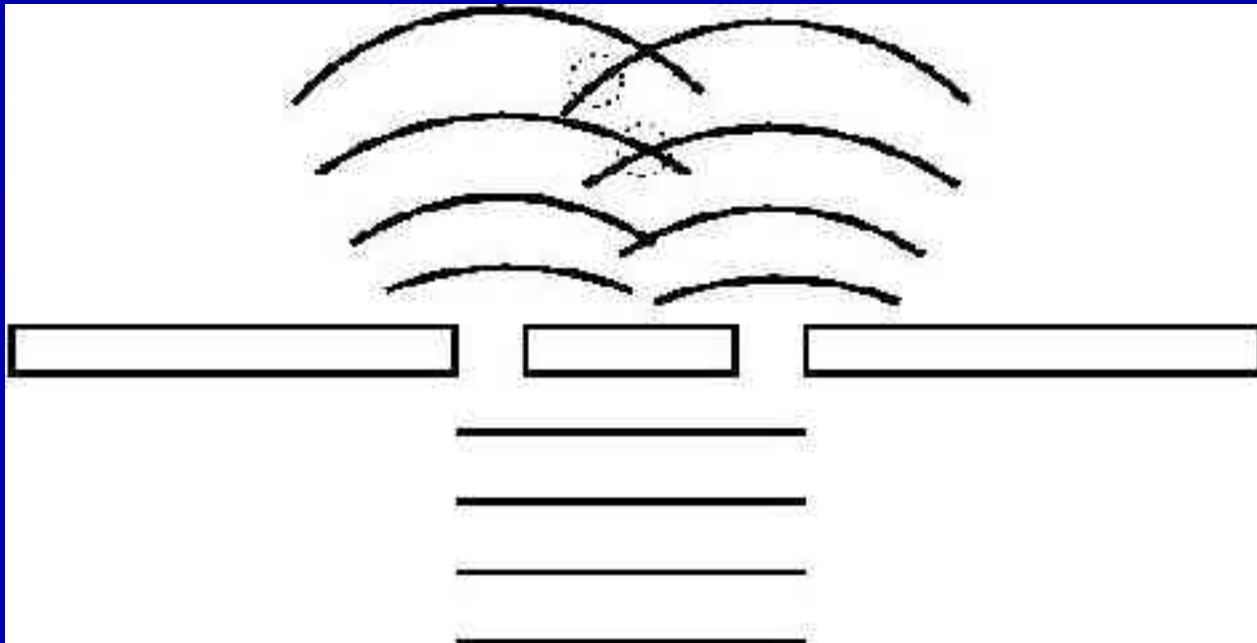
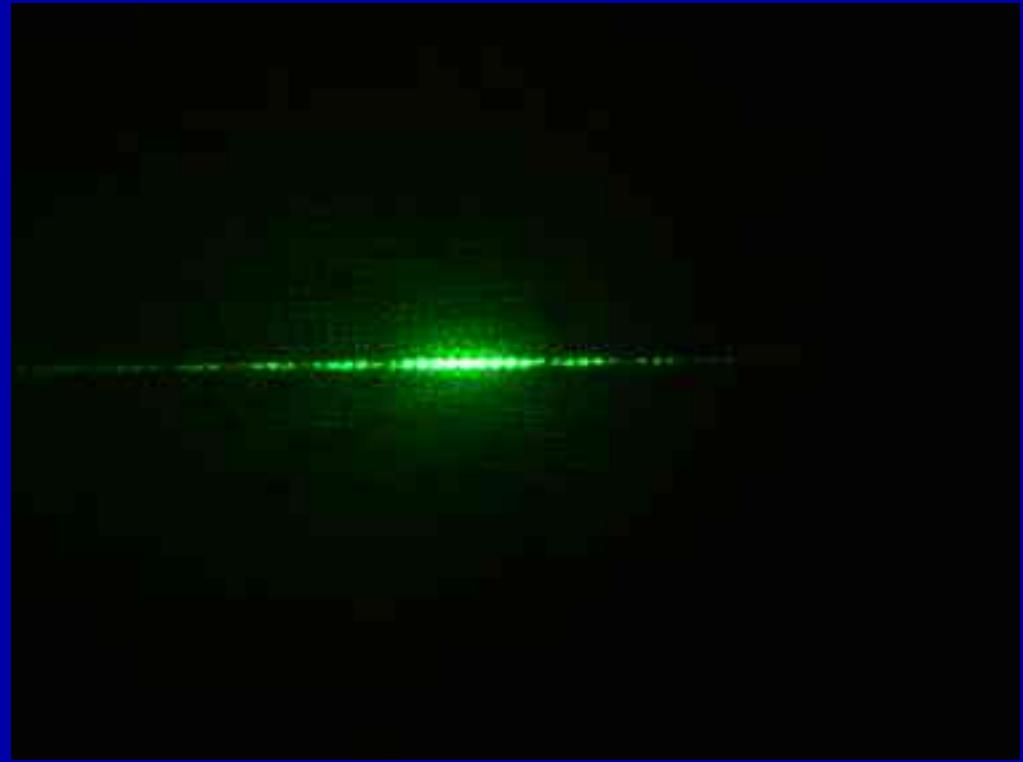
- Quand la lumière se propage dans un milieu :
  - Elle conserve la même fréquence
  - Elle avance moins vite
- Sa longueur d'onde change !
- Plus elle va lentement (indice grand) plus la longueur d'onde est courte.

# Loi de Snell-Descartes



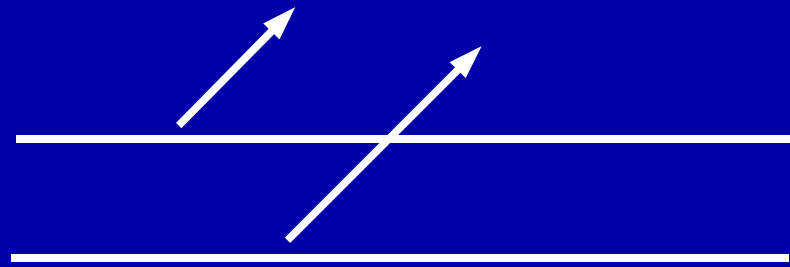


# Interférences



# Film de savon

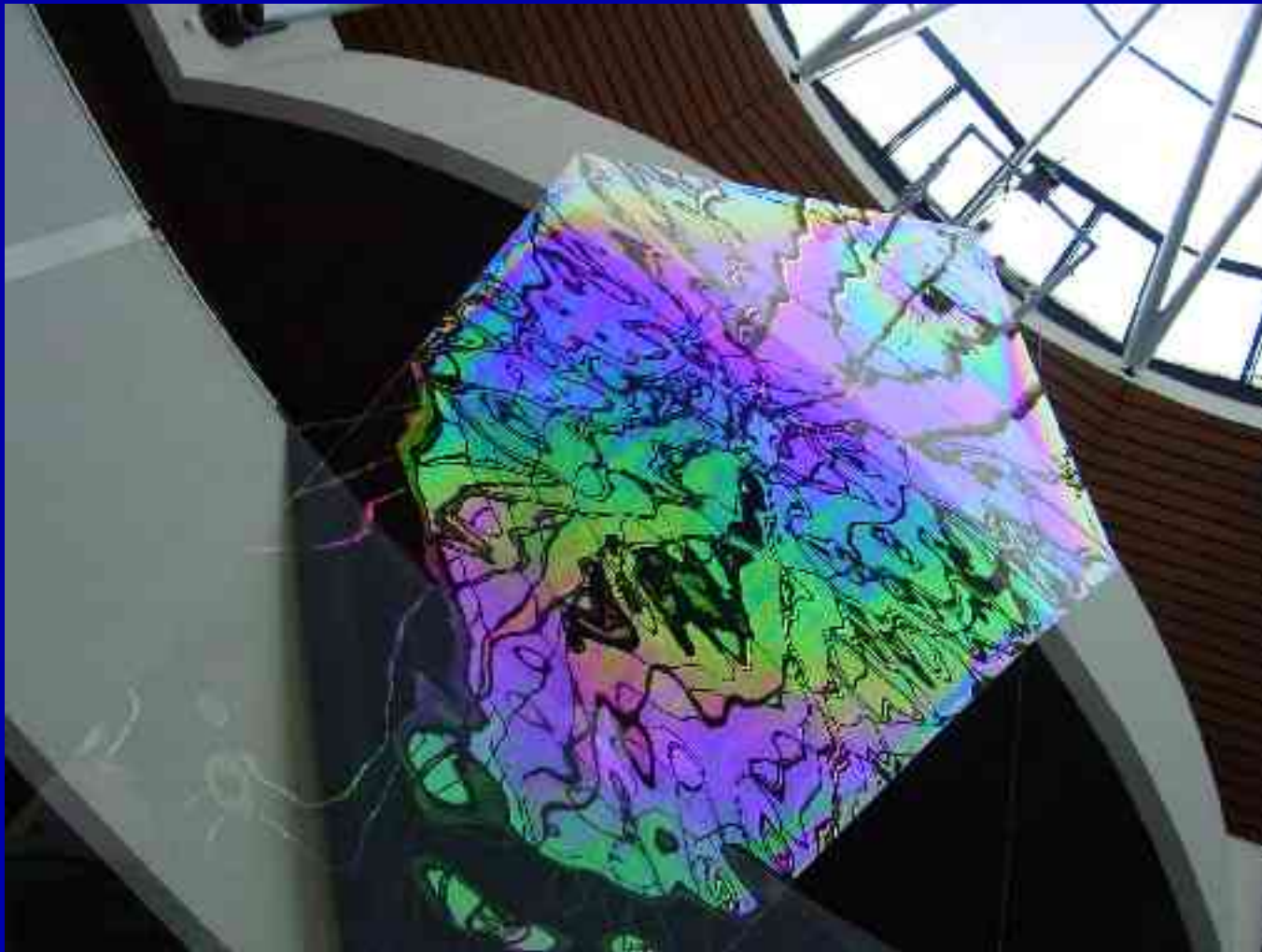
- Un film de savon a deux interfaces qui réfléchissent la lumière



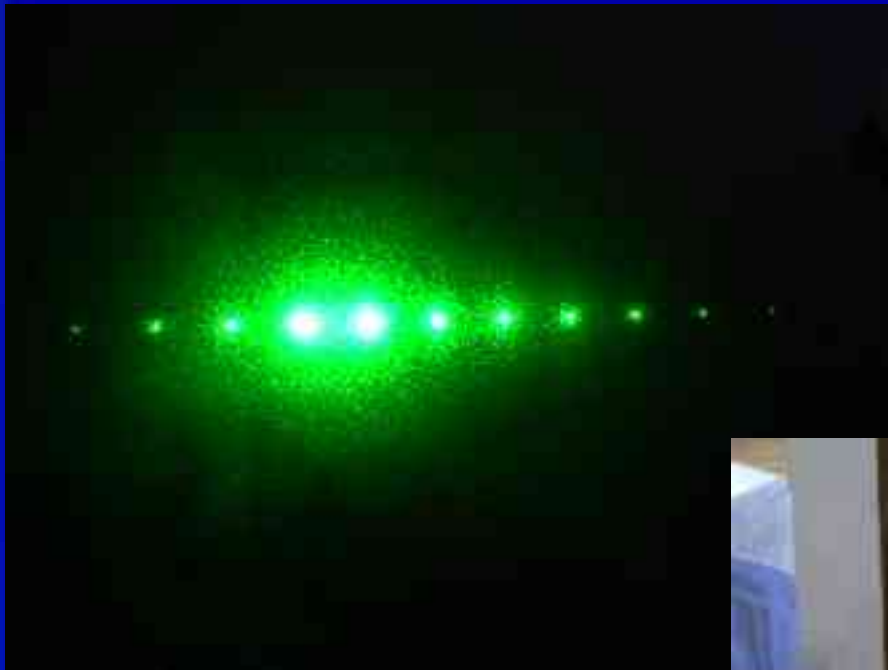
- Les deux rayons interfèrent constructivement ou destructivement selon la couleur  
⇒ Les reflets sont colorés (irisés)

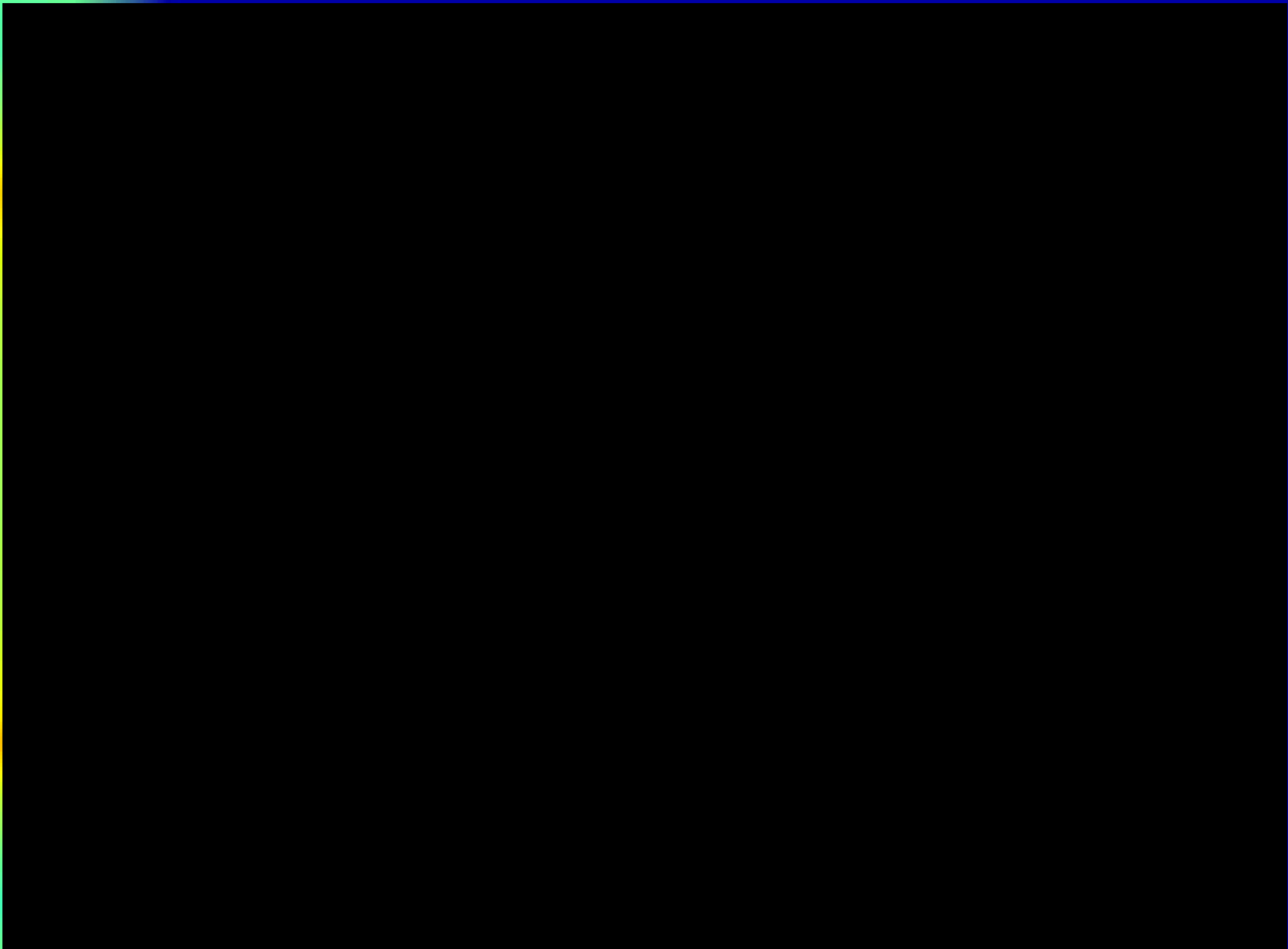
# Film de savon

Les couleurs interférentielles sont très vives



# Réseau

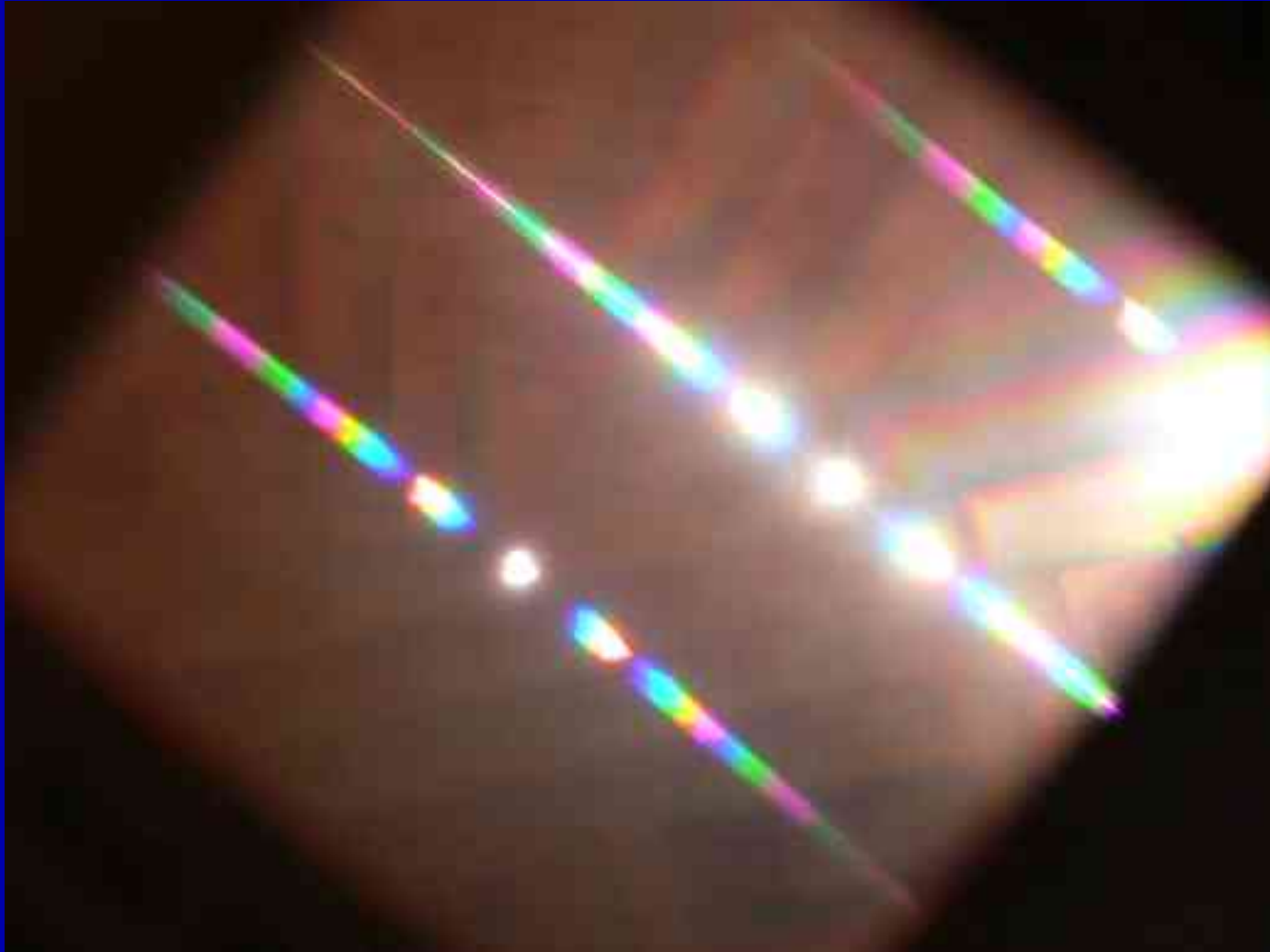




# Le réseau

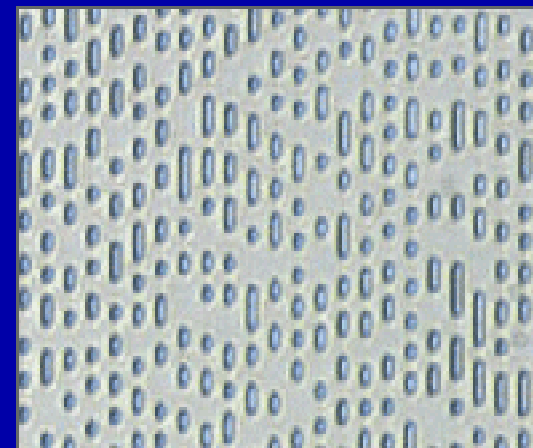
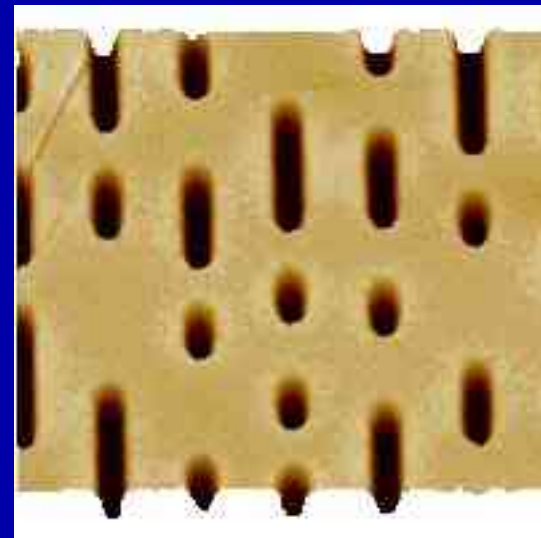
- Avec une autre couleur (autre longueur d'onde) la figure a une taille différente.
- Le réseau envoie des couleurs différentes dans des directions différentes
- Le réseau **disperse** la lumière

# Le réseau



# Disques Laser

Un CD se comporte comme un réseau : il disperse la lumière.

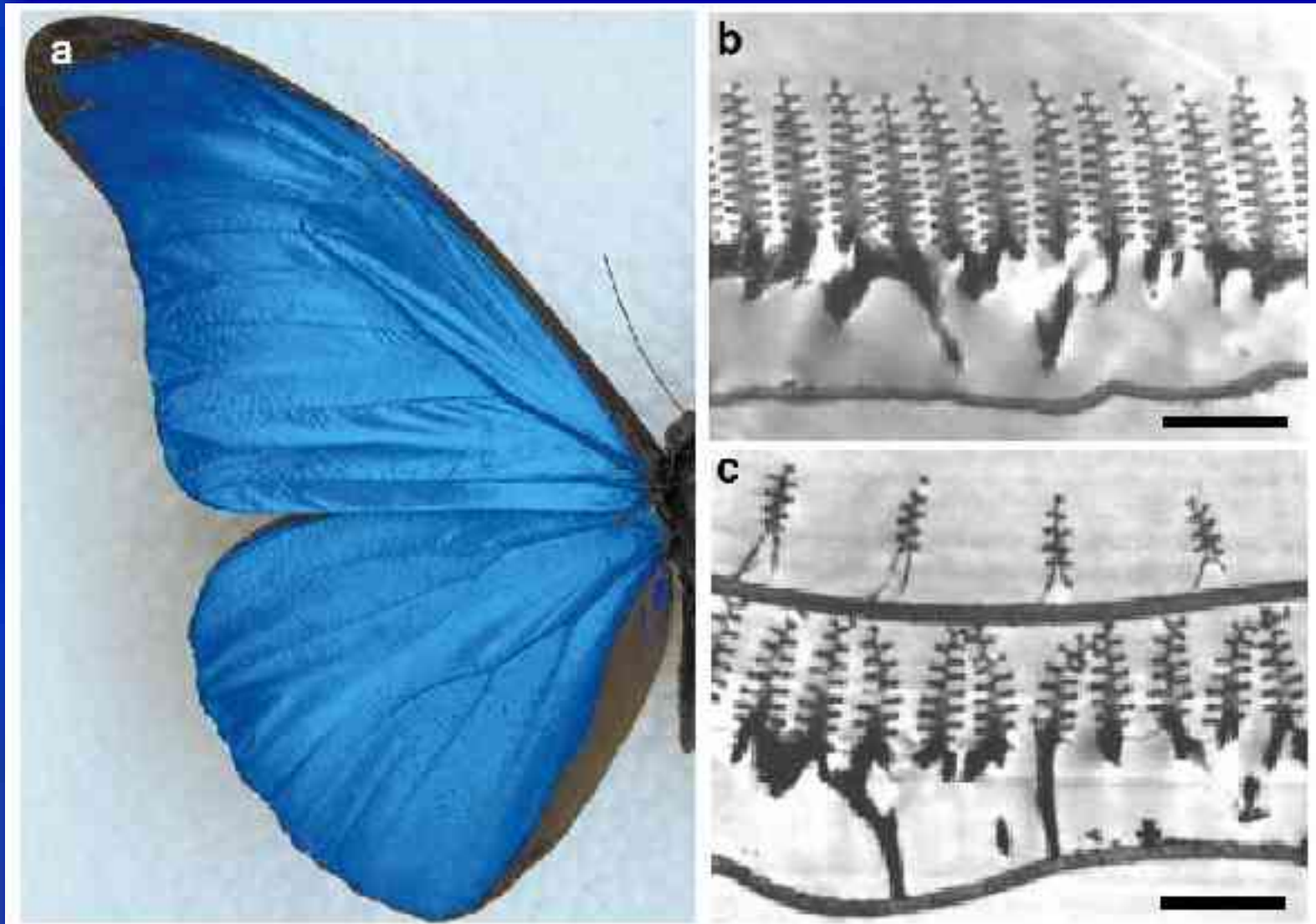




# Utilisation des interférences

- Réseaux croisés : figures d'interférences
- A la limite, on peut graver un morceau de plastique de manière à obtenir des interférences constructives dans les directions qu'on veut...

# Morpho





# Cristaux photoniques

# Miroir de Bragg

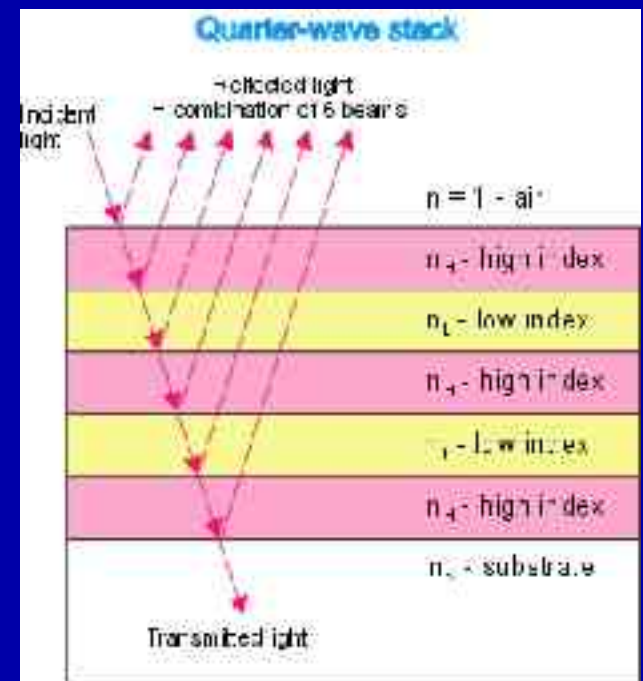
- Alternance de couches

transparentes d'indices différents

- A chaque motif, plus de lumière est réfléchi.

- Les ondes réfléchies interfèrent constructivement

⇒ **100% de la lumière est réfléchi avec assez de motifs**

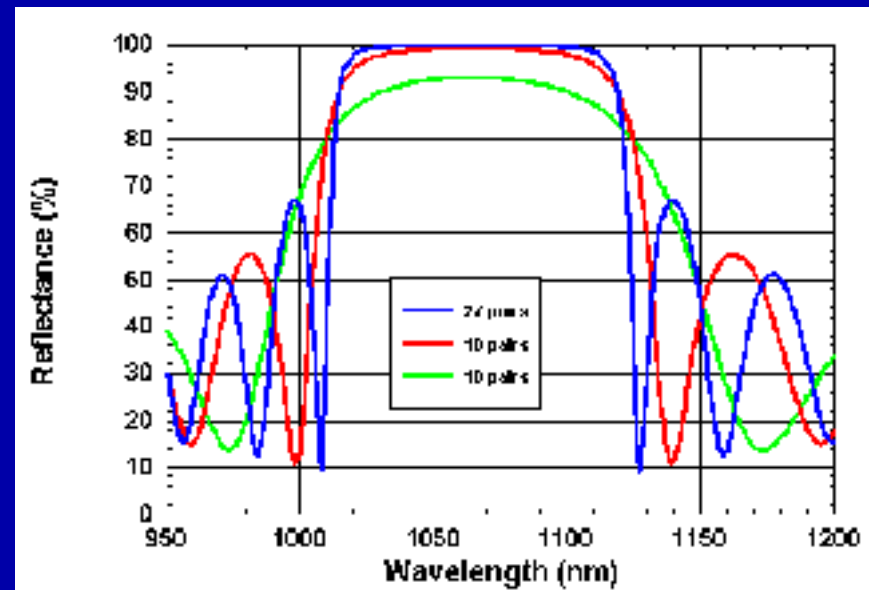


# Miroir de Bragg



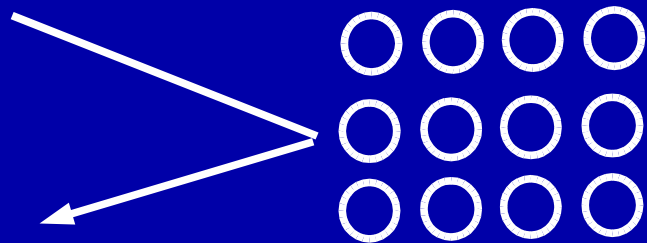
# Miroir de Bragg

- Avec le métal, une partie de la lumière est perdue (2%)
- Avec un miroir de Bragg, tout est réfléchi (un peu comme avec la réflexion totale).
- Principe utilisé par le Morpho



# Cristaux photoniques 2D

- Généralisation du miroir de Bragg
- Ensemble de cylindres.



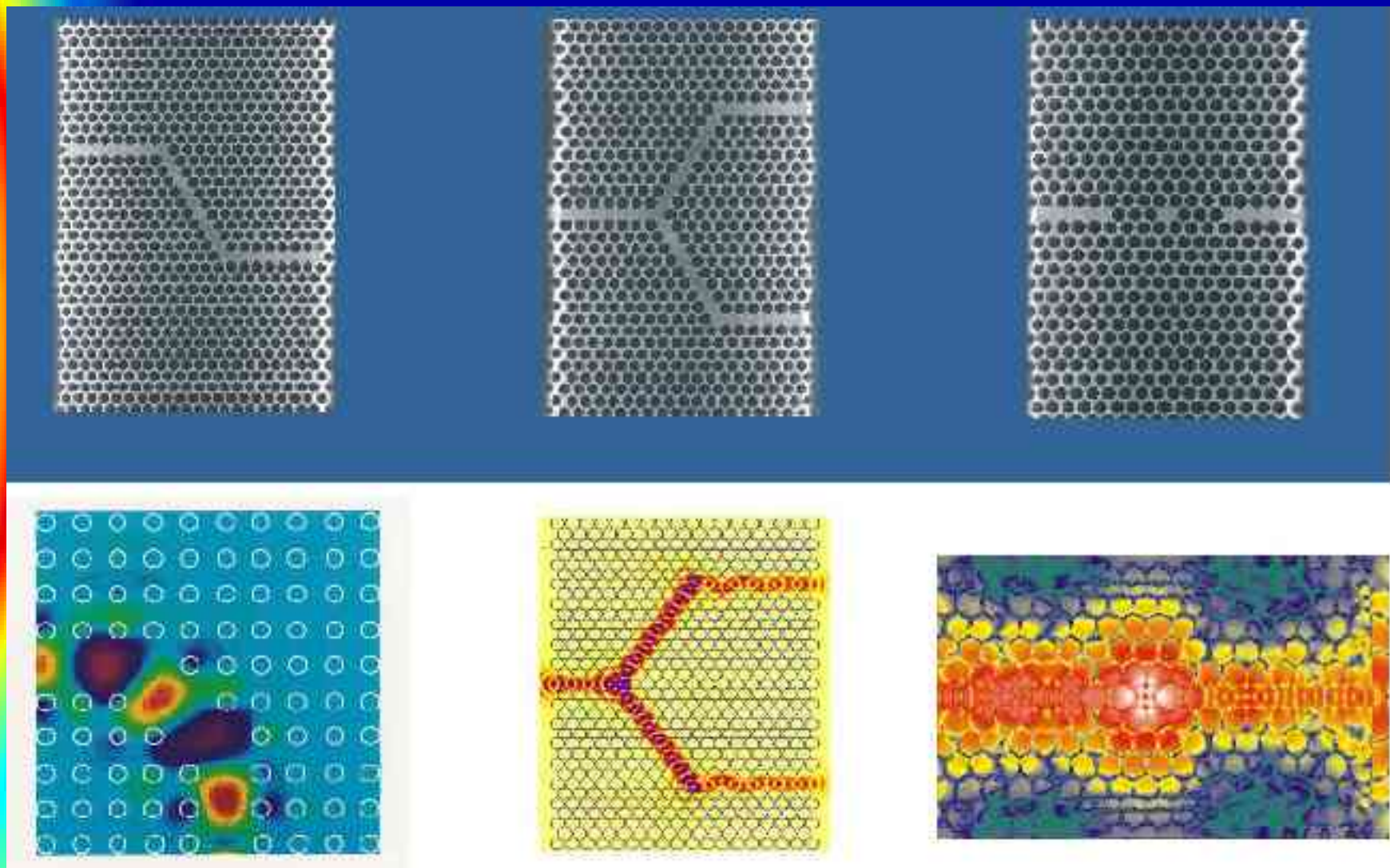
- A tout angle\*, tout est réfléchi pour certaines longueurs d'onde.
- Permet un contrôle de la lumière...

# Cristaux photoniques : Pour quoi faire ?

- Les électrons sont utilisés pour les calculs
- La lumière est utilisée pour la transmission
- On voudrait éviter d'utiliser les électrons pour faire des opérations sur la lumière
- Voire, faire faire tous les calculs à la lumière ?



# Cristaux photoniques

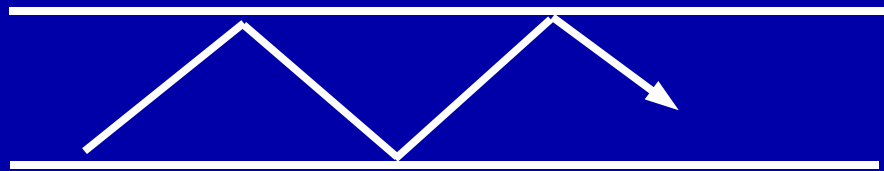


# En fait...

- Composants ultra-rapides (quelques “calculs”)
- Mais pas d'ordinateurs photoniques
- Guider la lumière, plutôt...

# Fibres optiques

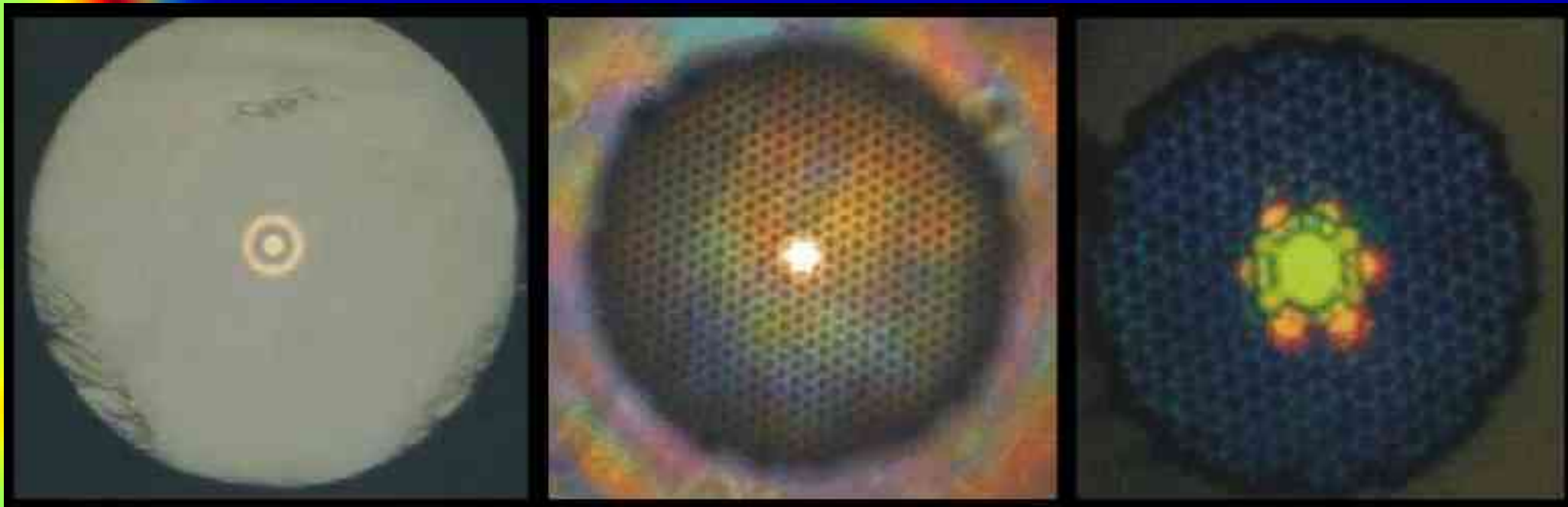
- Fibre optique normale : réflexion totale.



- Donc un coeur d'indice élevé (plein).
- Pas de métal (pertes)
- Et pourquoi pas avec des cristaux photoniques ?

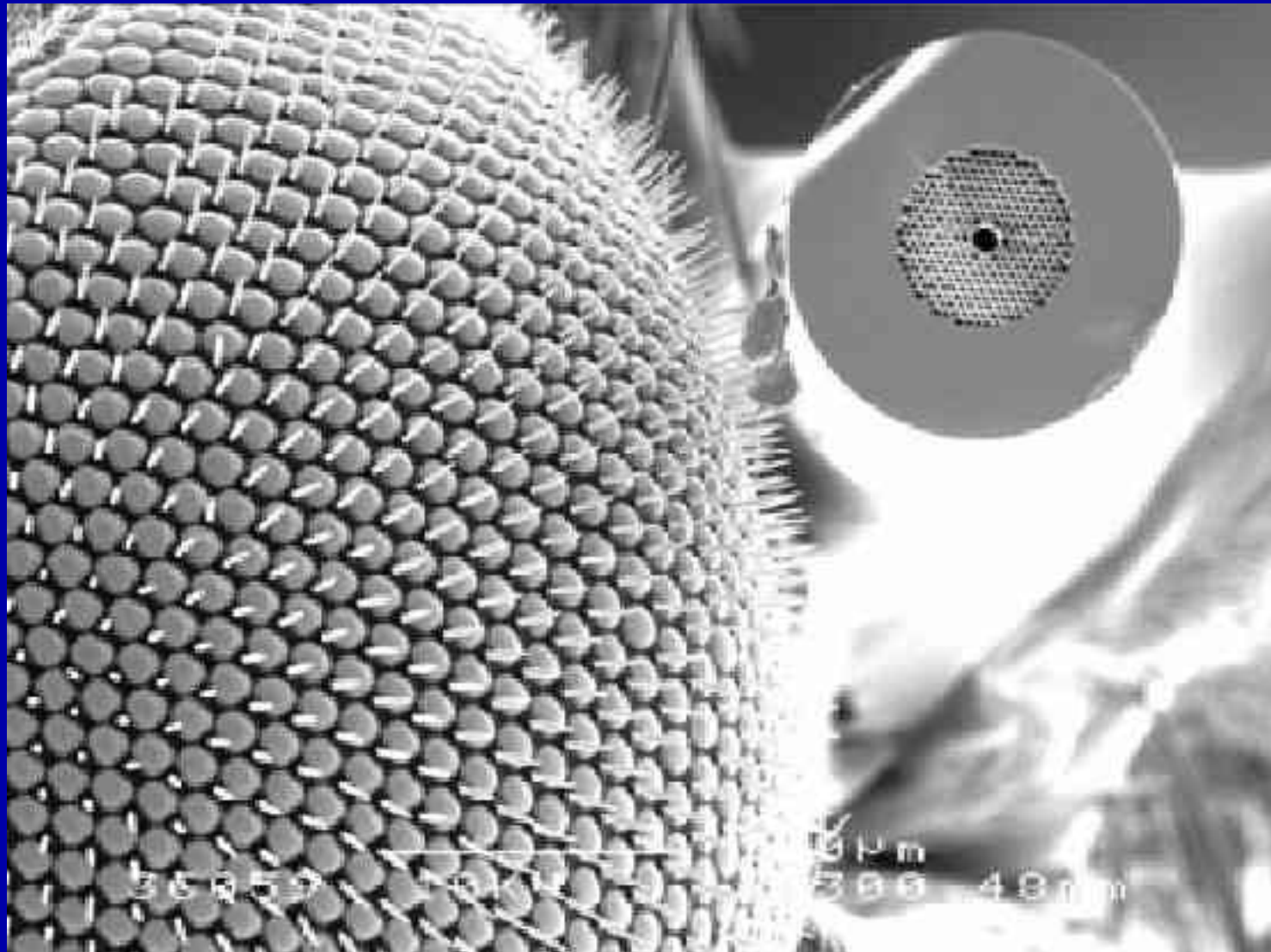
# Fibres à cristaux photoniques

**Cette fois, le coeur peut être vide !**





# Fibres à cristaux photoniques



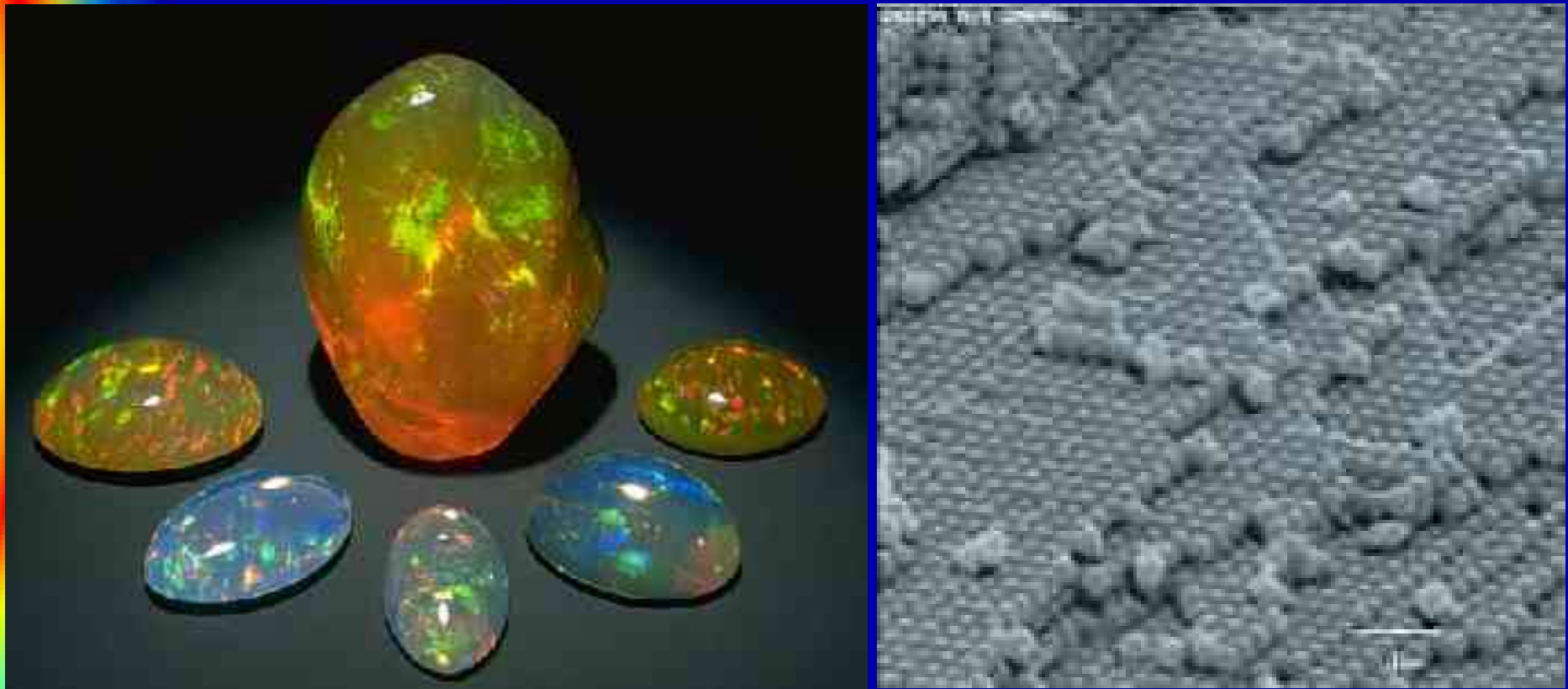
# Contrôle de l'émission spontanée

- Un atome se désexcite de deux manières
  - Emission spontanée (désordonné)
  - Emission induite (LASER)
- Si un atome ne peut pas envoyer de lumière, il ne se désexcite pas
- Dans un cristal photonique, les atomes se désexcitent beaucoup moins vite !

# Cristaux photoniques 3D

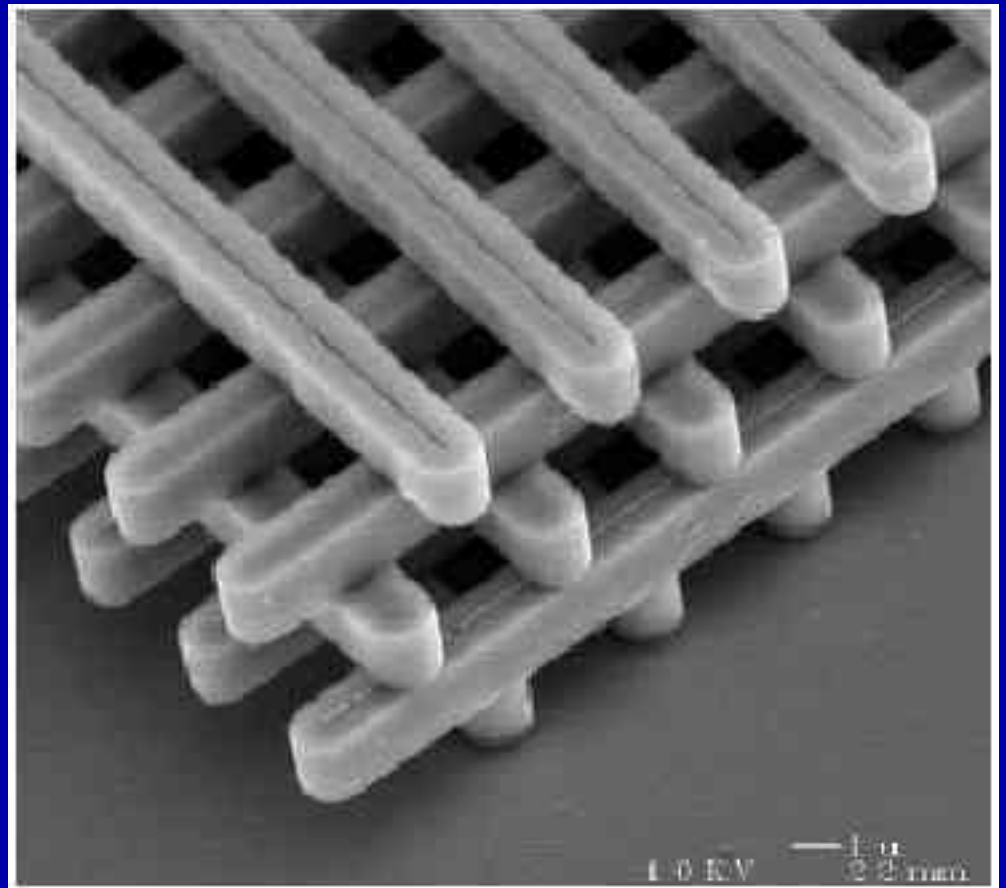
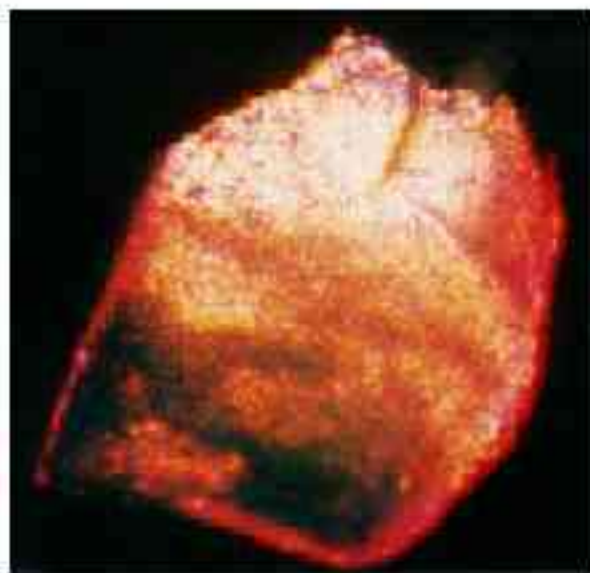
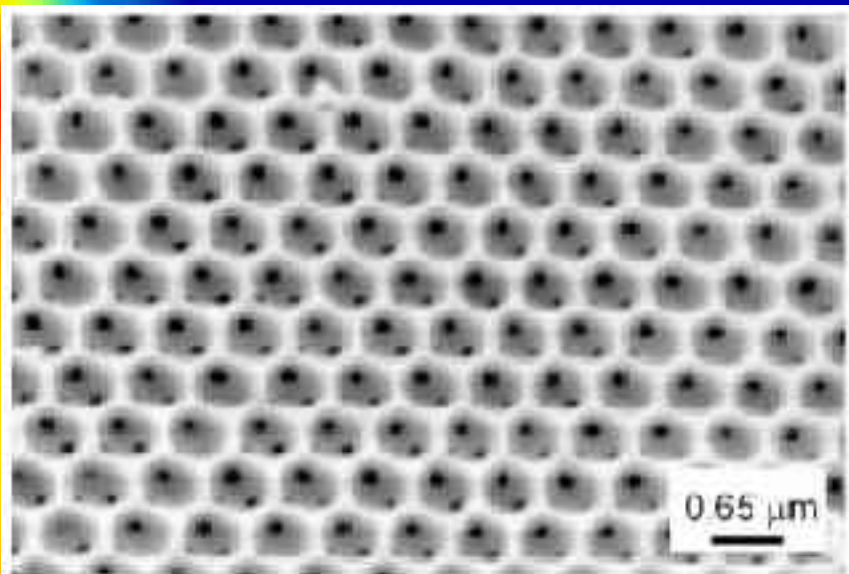
- Il faut empêcher l'émission dans le maximum de directions
- Il faut un cristal 3D et pas seulement 2D !
- Difficile à fabriquer...
- ...sauf dans la nature !

# Les opales : cristaux photoniques 3D naturels





# Cristaux artificiels





Tamis à photons

# Micro-ondes

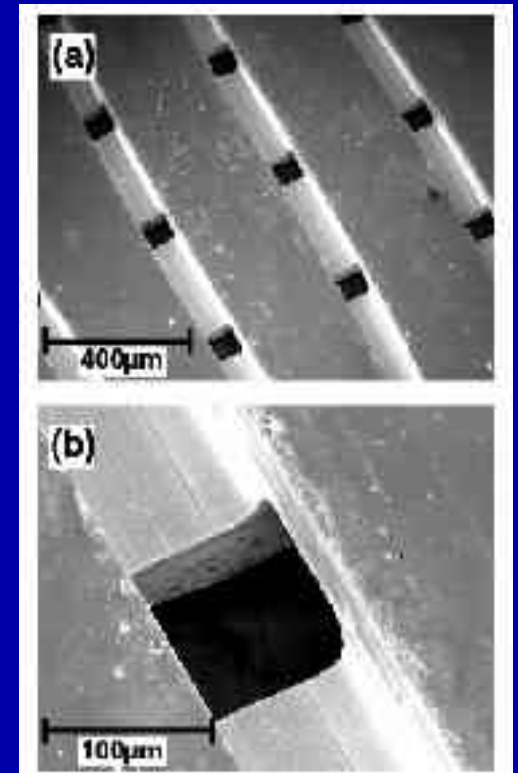
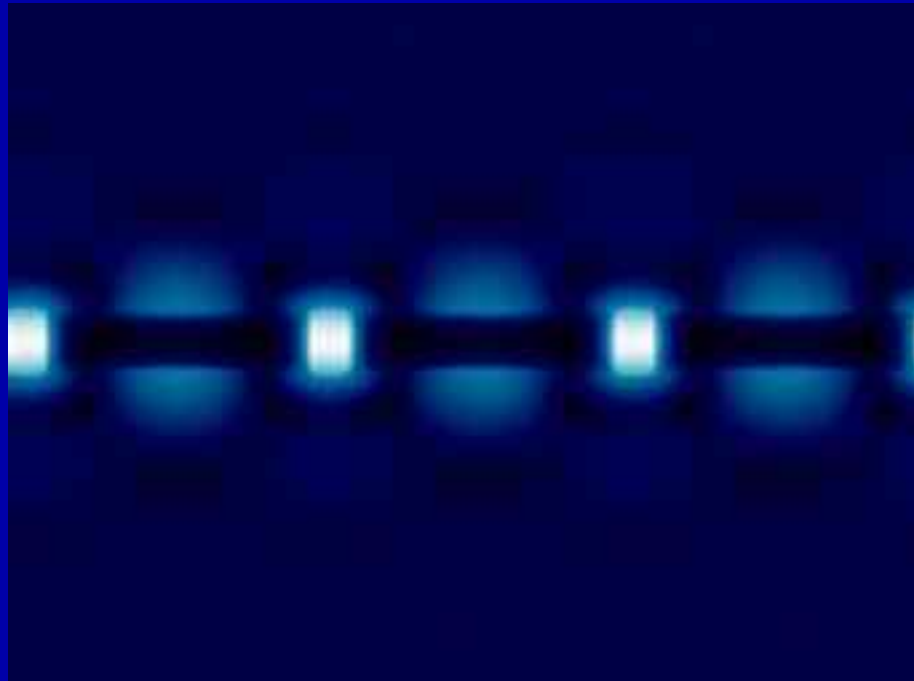
- Pour arrêter les micro-ondes, une plaque de métal percée suffit
- On a cru pendant longtemps que c'était toujours vrai...



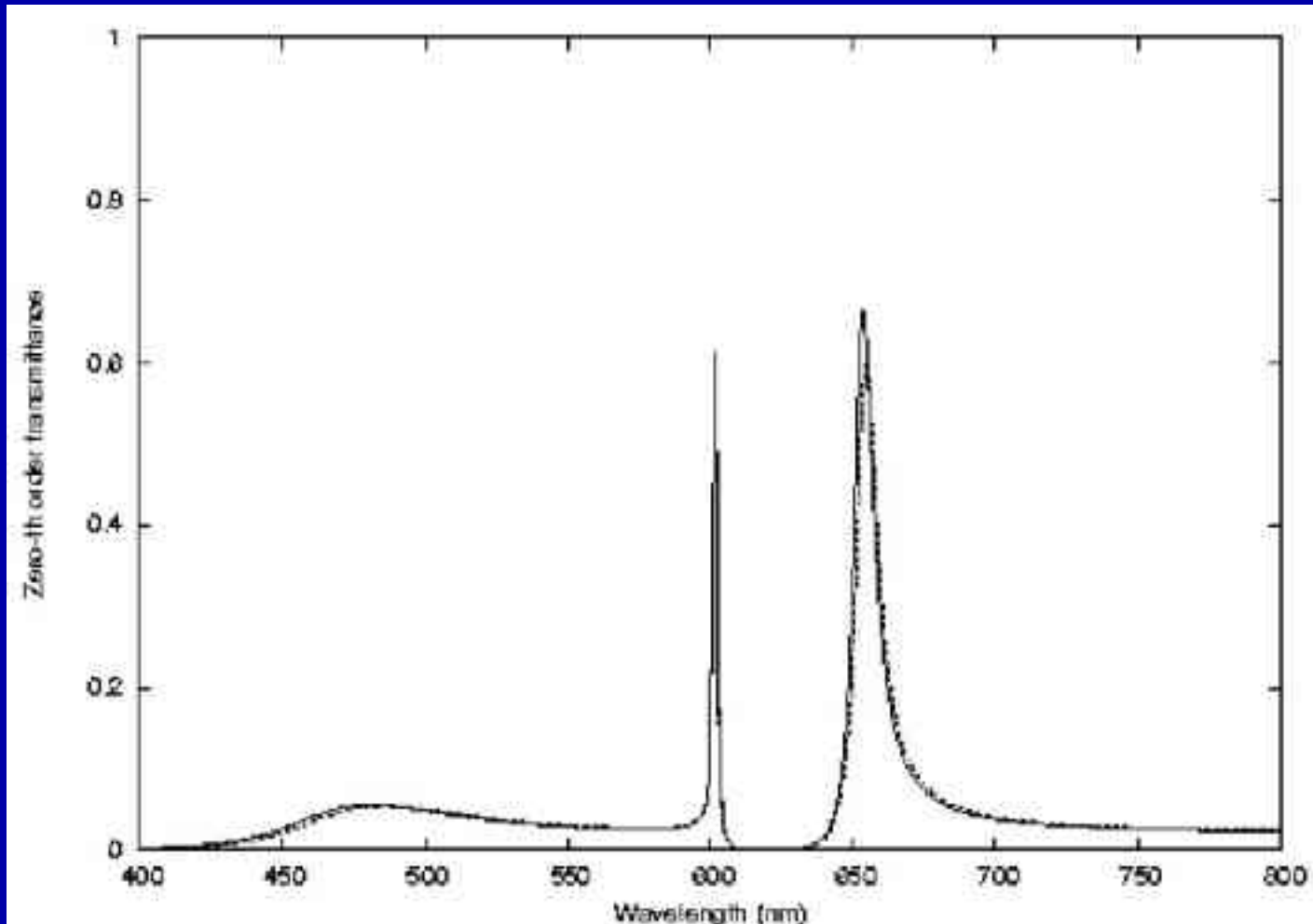
# Tamis à photons

- Même avec des trous de taille inférieure à la longueur d'onde, il peut y avoir des *résonances*...
- Pour des fréquences très particulières (cf balançoire).
- Résonance = accumulation d'énergie.
- Deux types de résonances : horizontales (plasmons) ou verticales (dans les trous).

# Résonances des tamis



# Filtres à lumière





Méta-matériaux

# Milieux homogènes

- Les molécules et les atomes ( $< 1 \text{ nm}$ ) font les propriétés optiques des milieux “homogènes”:
  - Absorption (effet de serre)
  - Diffusion (bleu du ciel)
  - Ralentissement (indice optique)
- La longueur d'onde du visible est de  $500 \text{ nm}$
- Il y a de la place pour une structure de taille comprise entre  $1 \text{ nm}$  et  $500 \text{ nm}$ ...

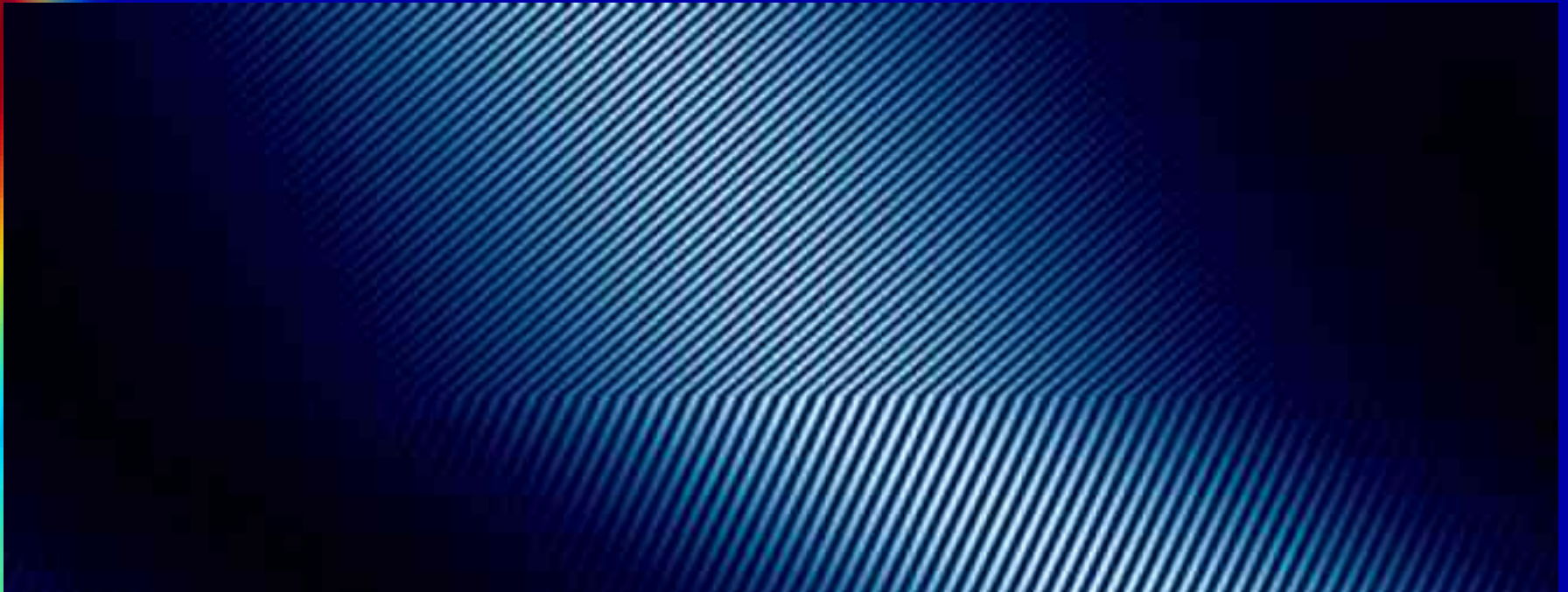


# Méta-matériaux

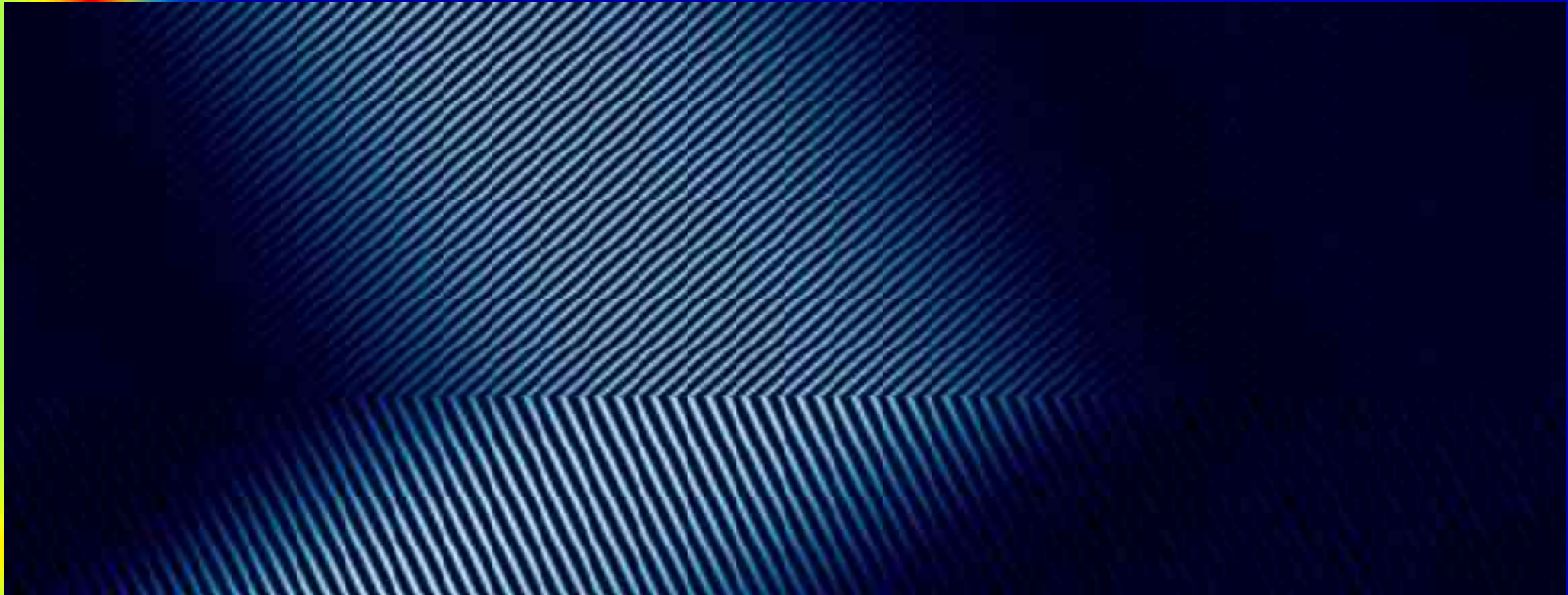
- Avec les nanotechnologies, on peut structurer la matière à très petite échelle (motifs)
- On obtient des matériaux “homogènes” pour la lumière...
- ...avec des propriétés complètement inhabituelles (n grand)

# Loi de Descartes

- Pour la loi de Descartes, il y avait deux solutions :



# Matériaux à indice négatif

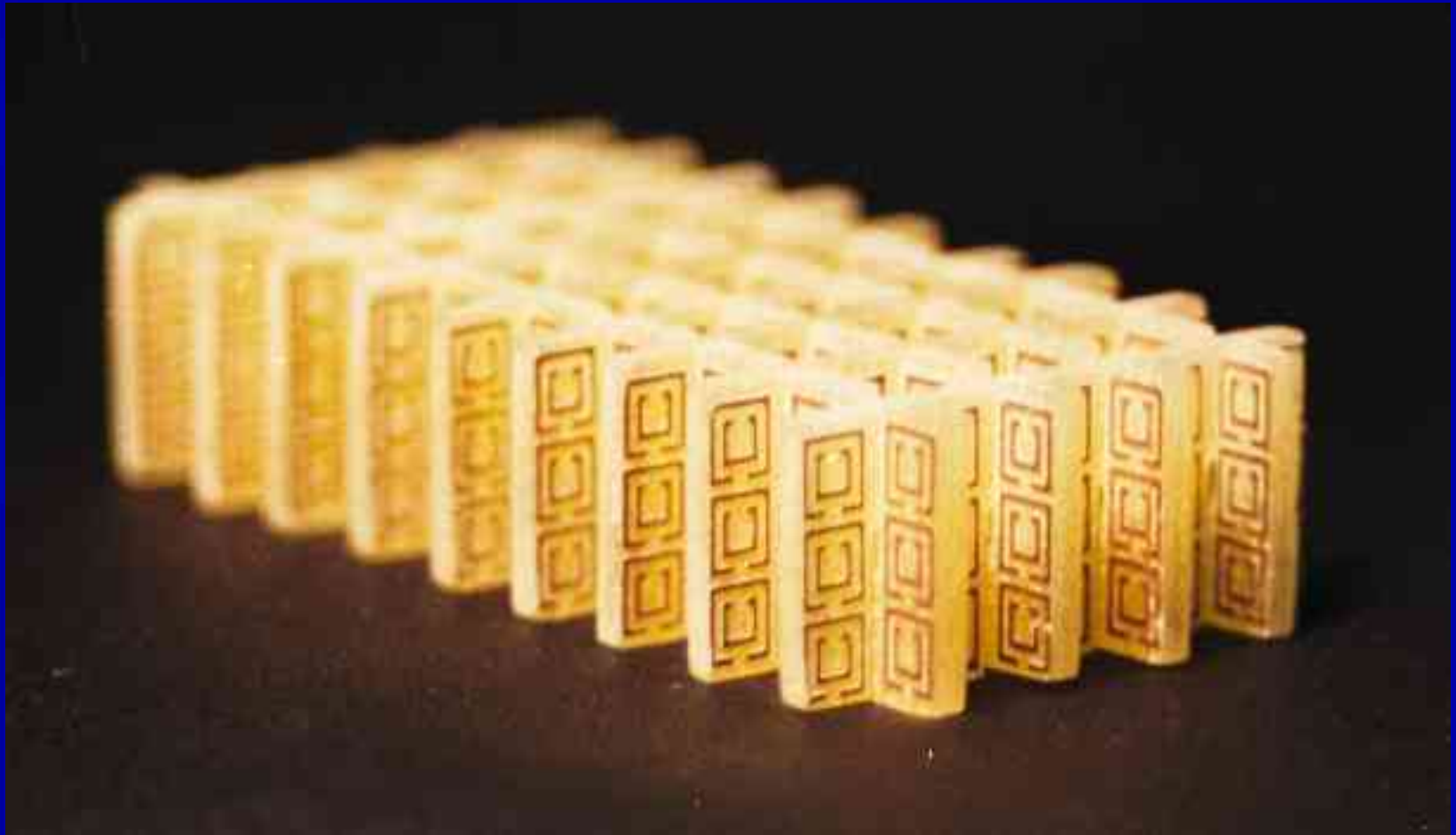


# Matériaux à indice négatif

- Il n'y en a pas dans la nature
- Avec des méta-matériaux, on peut en fabriquer !
- Premiers essais en micro-ondes

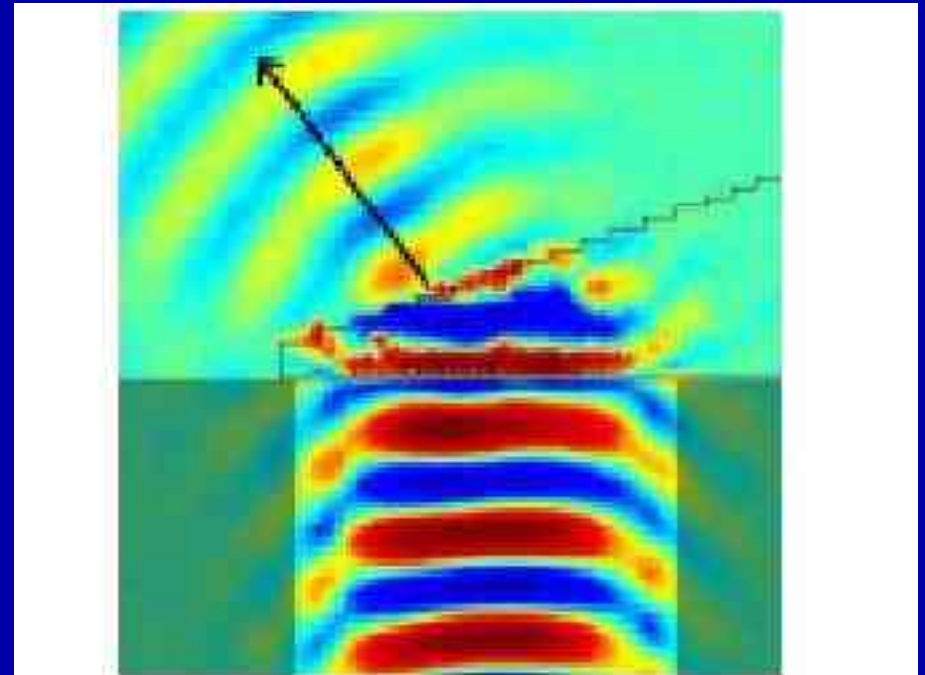
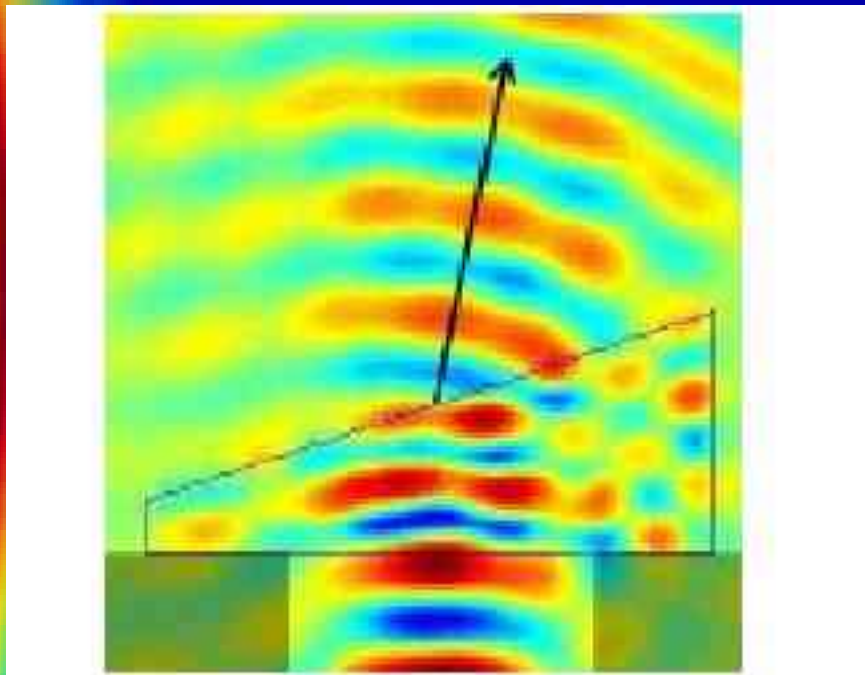


# Méta-matériaux en micro-ondes





...et ça marche !

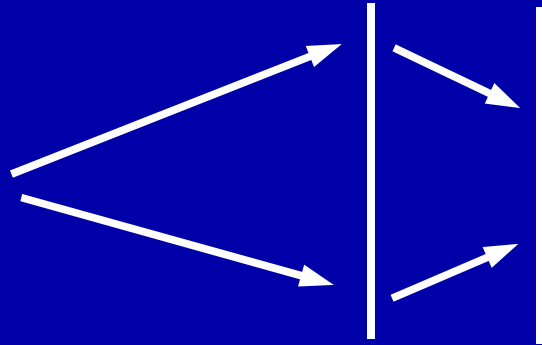


# Méta-matériaux : quelle longueur d'onde ?

- Micro-ondes : premiers essais (mm)
- Téra-hertz
- Infra-rouge proche (quelques  $\mu\text{m}$ )
- Le visible n'est pas loin ( $0.5 \mu\text{m}$ )

# Que faire avec de tels matériaux ?

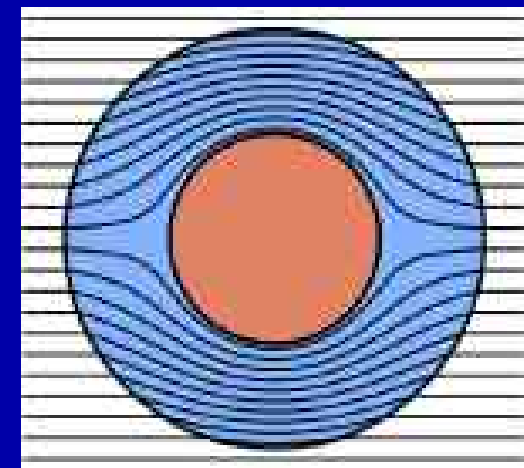
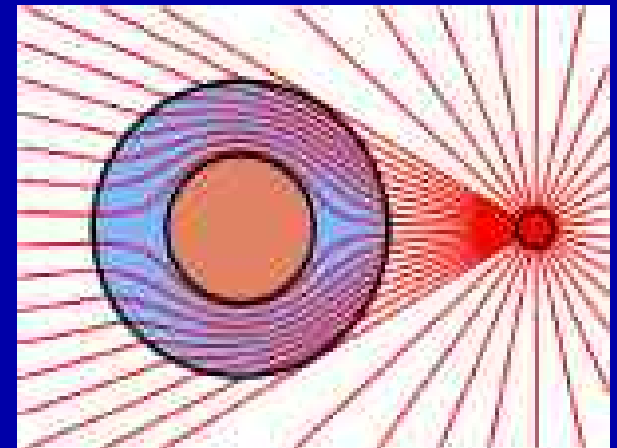
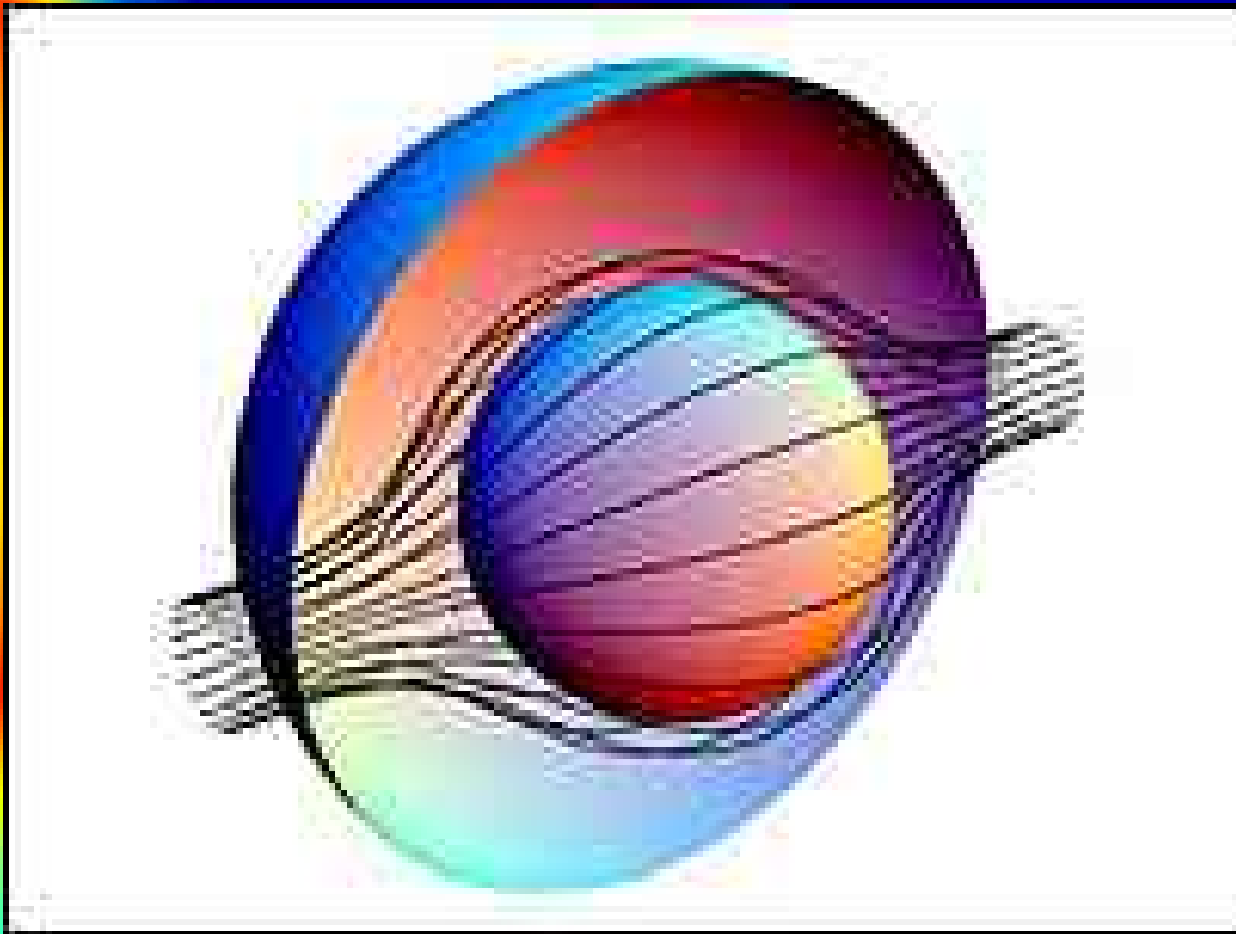
- Des lentilles plates !



- Et peut-être *parfaites*...
- Et puis, plus récemment...



# L'invisibilité !



# Premiers essais

- En micro-ondes :



- Et ça marche (pas mal).

# Limitations

- Si les méta-matériaux fonctionnent, c'est parce qu'il y a des résonances, donc
  - Une longueur d'onde précise (pas tout un domaine)
  - Il y a des pertes importantes !
- De l'intérieur, on ne peut rien voir !
- Mais notre vision des choses est changée...

# Conclusion

- Les nanotechnologies ont ouvert un nouveau domaine dans l'optique.
- Cristaux photoniques, tamis à photons et méta-matériaux devraient permettre un contrôle extrême de la lumière.