



# **Métamatériaux et optique transformationnelle**

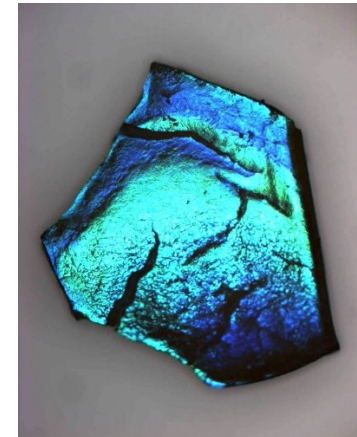
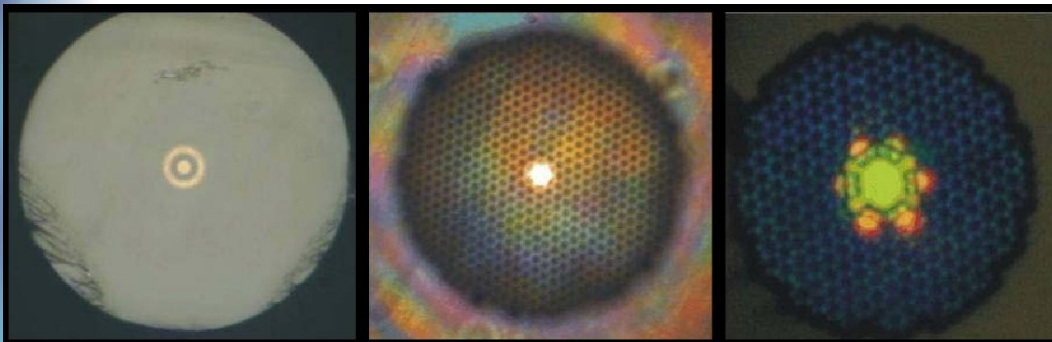
***Antoine Moreau***

# Plan

- Permittivité et perméabilité
- Métamatériaux
- Milieux d'indice négatif
- Lentilles parfaites
- Optique transformationnelle et invisibilité

# Cristaux photoniques

- Miroirs de Bragg (1887)
- « Cristaux photoniques » (1987)
- 2D
- 3D
- Fibres à cristaux photoniques (1998)



# Permittivité et perméabilité

→ Permittivité : polarisation électrique

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$$

→ Perméabilité : polarisation magnétique

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

→ Indice d'un milieu

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}$$

# Permittivité des métaux

- Dans le visible métal = plasma
- Permittivité diélectrique :

$$\epsilon = 1 + \frac{\omega_p^2}{i\gamma\omega - \omega^2}$$

- Indice imaginaire : pas de propagation

# Structurer la matière

- Réseau de fils métalliques
- Milieu homogène
- Fréquence de plasma contrôlée par la géométrie
- Extrêmement basse (GHz)
- Equivalent GHz d'un métal visible.

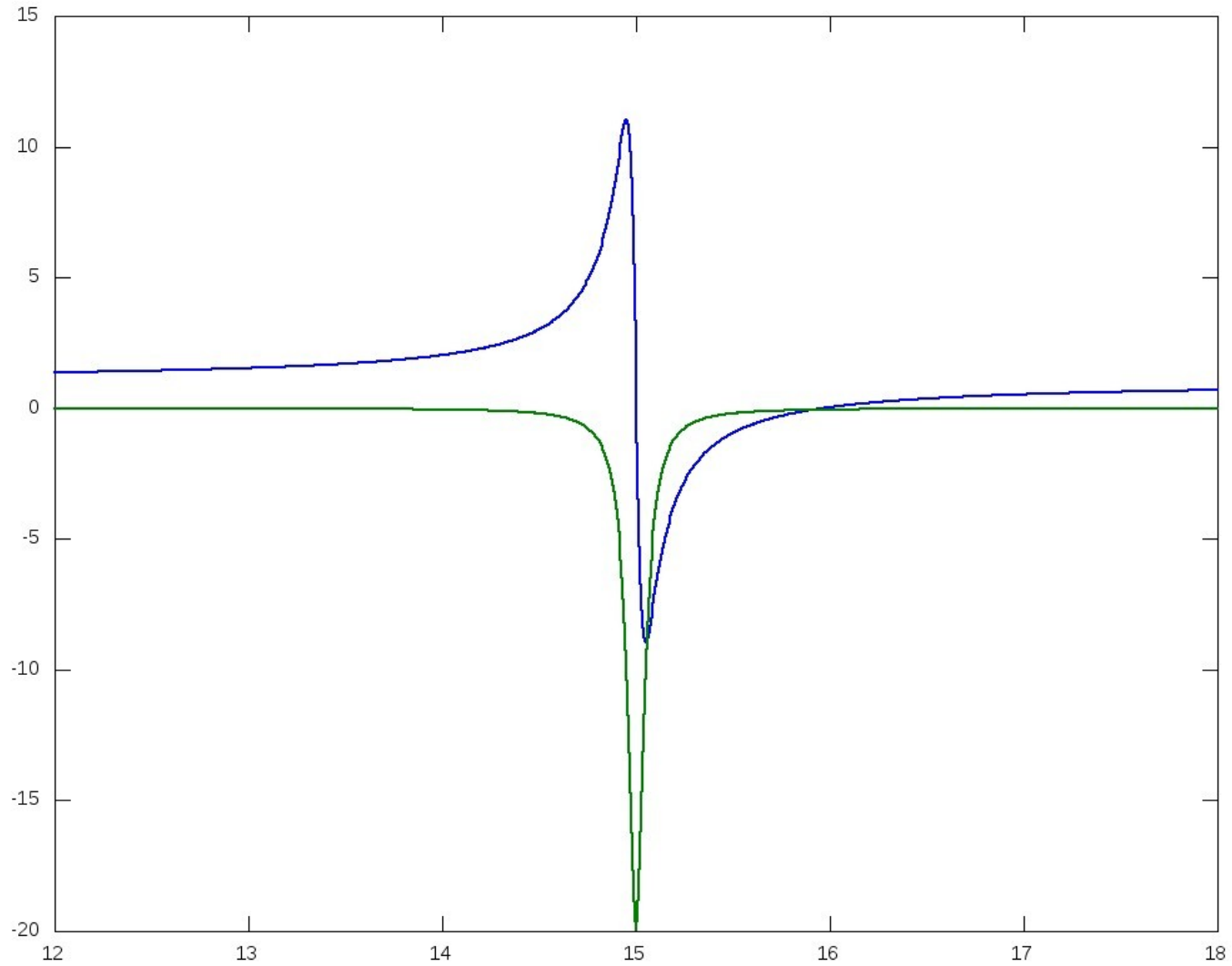
[1] J. Pendry et al., PRL 76, 4773 (1996)

# Résonateurs magnétiques

- Structure métallique « mésoscopique »
- Résonance magnétique
- Polarisation magnétique
- Modèle de Lorentz

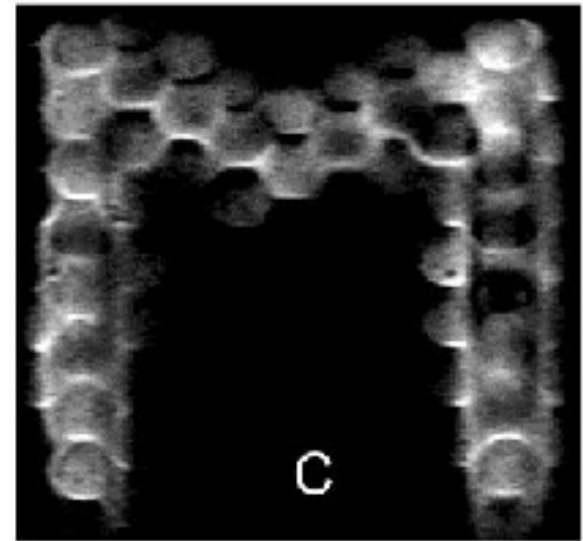
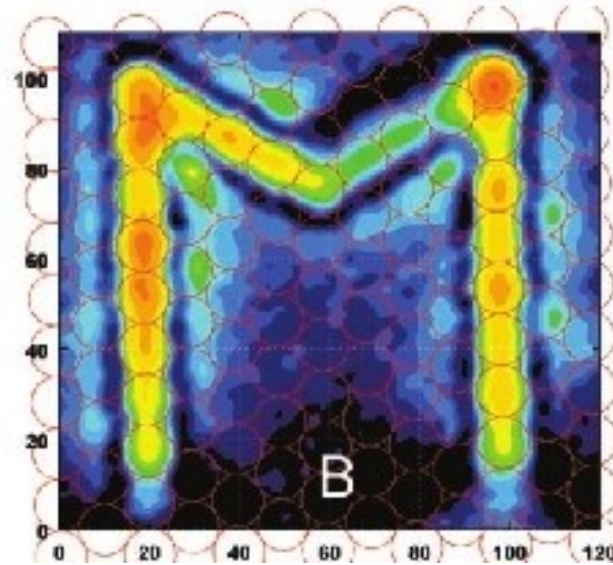
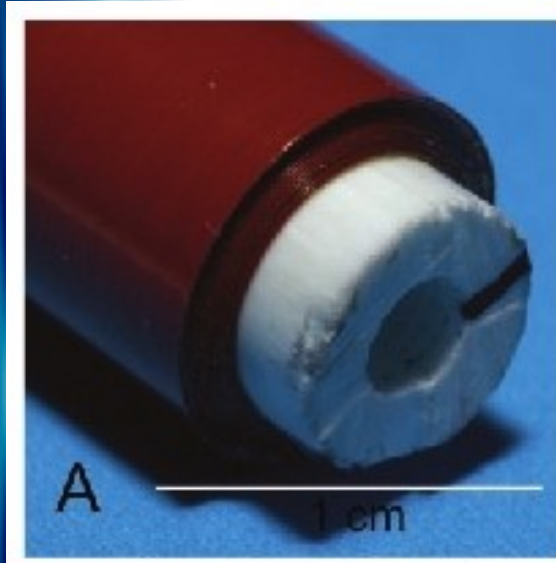
[1] J. Pendry et al., IEEE Trans. Microw. Th. (1999)

# Résonance magnétique





# Résonateurs magnétiques



# Permittivité et perméabilité négatives

- Pour prouver la résonance magnétique
- On mélange résonateurs magnétique et fils

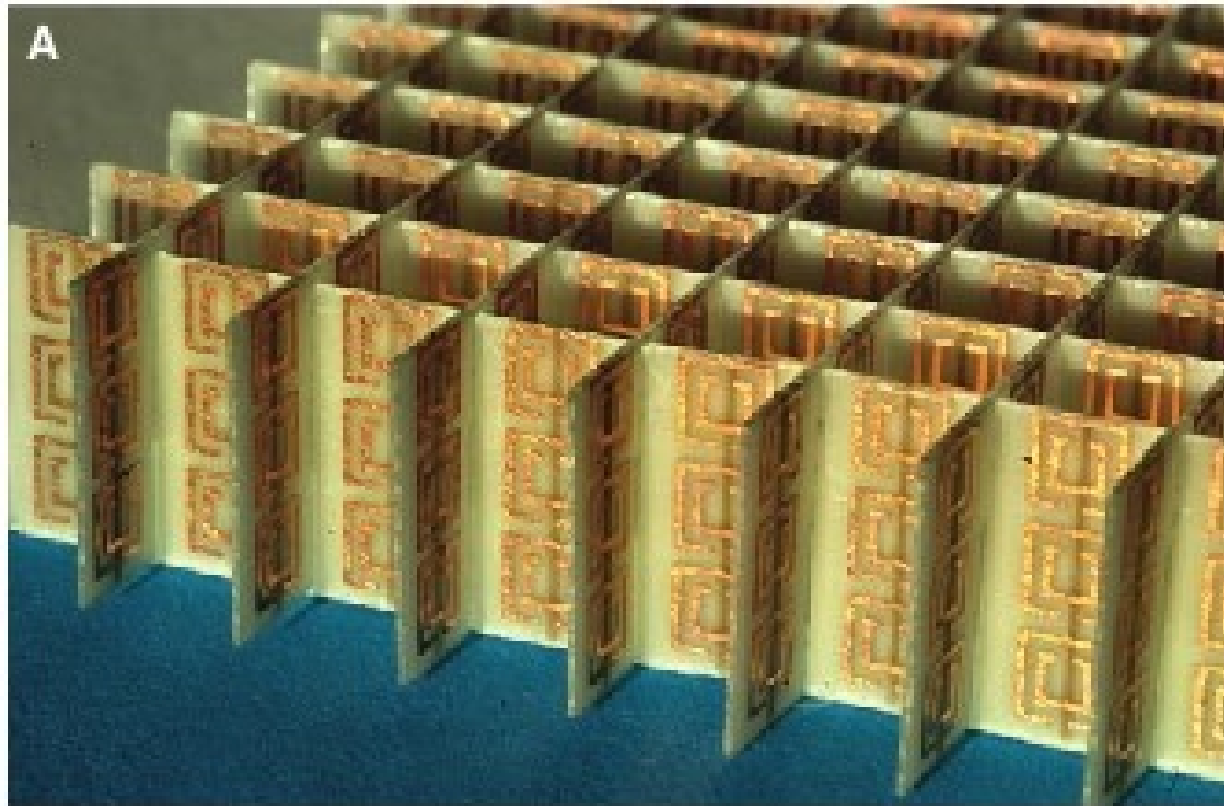
$$n = \sqrt{\epsilon \mu}$$

- Rend le milieu propagatif [1,2] !

[1] D. Smith et al. Phys. Rev. Lett. 84 4184 (2000).

[2] V. Veselago, Usp. Fiz. Nauk. 92 517 (1967)

# Métamatériaux



# Matériaux « main gauche »

- Lorsque permittivité et perméabilité sont négatives
- Le vecteur de Poyting et le vecteur d'onde sont opposés
- Produit vectoriel avec la main gauche

1 (1 sur 6) Ajuster à la largeur de la page

Démarrer la présentation Quitter le mode plein écran

SOVIET PHYSICS USPEKHI VOLUME 10, NUMBER 4 JANUARY-FEBRUARY 1968

538.30

*THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE  
VALUES OF  $\epsilon$  AND  $\mu$*

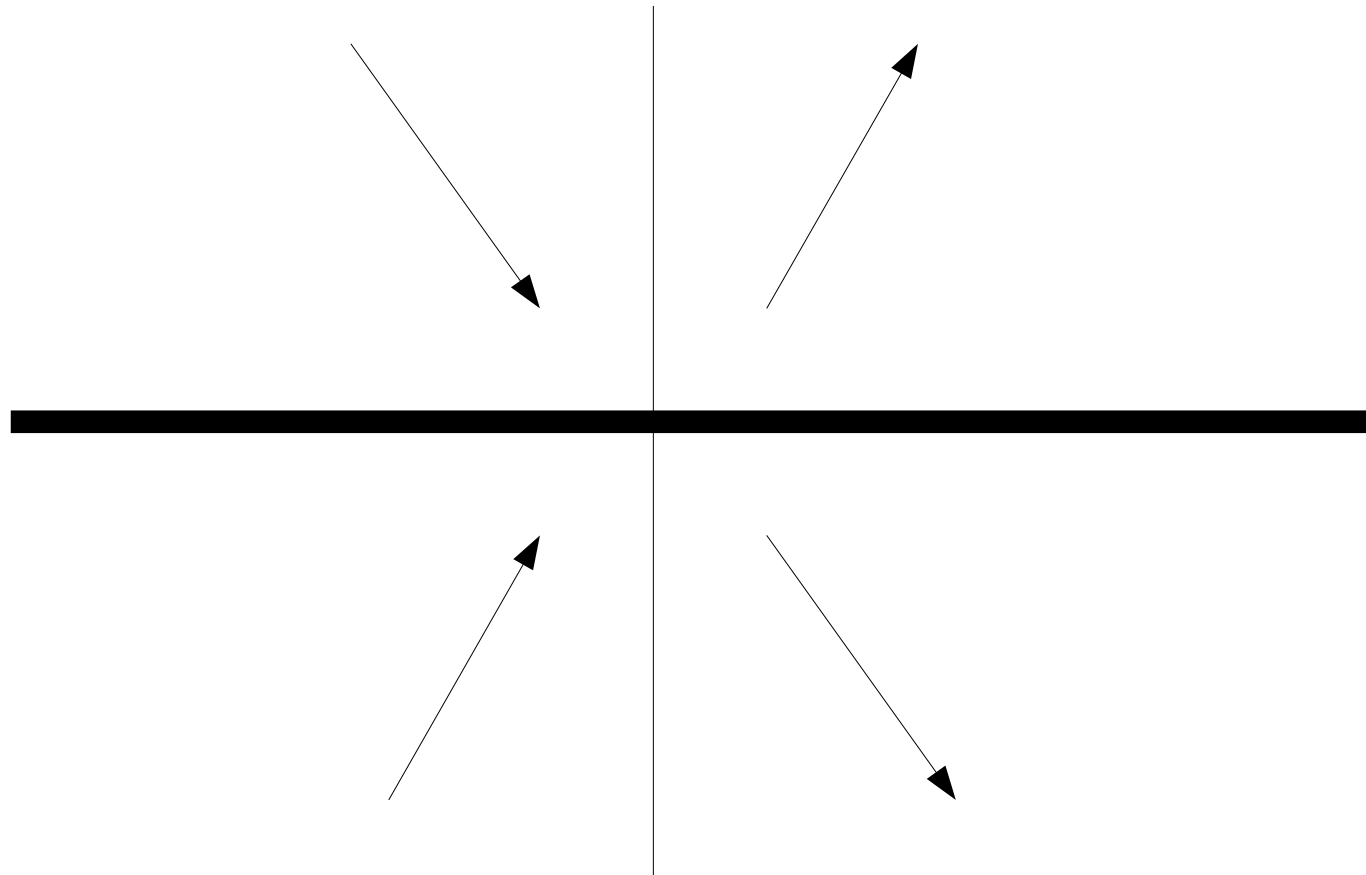
V. G. VESELAGO

P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences, U.S.S.R.

Usp. Fiz. Nauk 92, 517-526 (July, 1964)

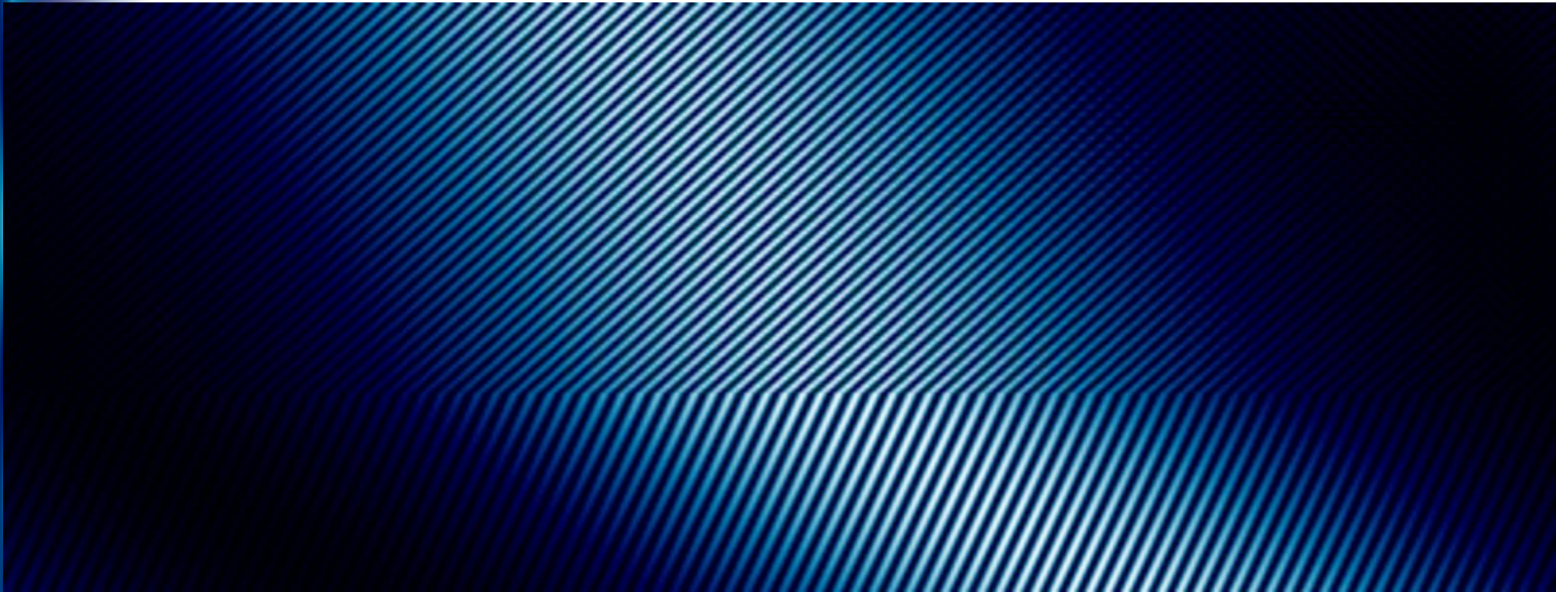
1. INTRODUCTION II. THE PROPAGATION OF WAVES IN A SUBSTANCE

# Réfraction



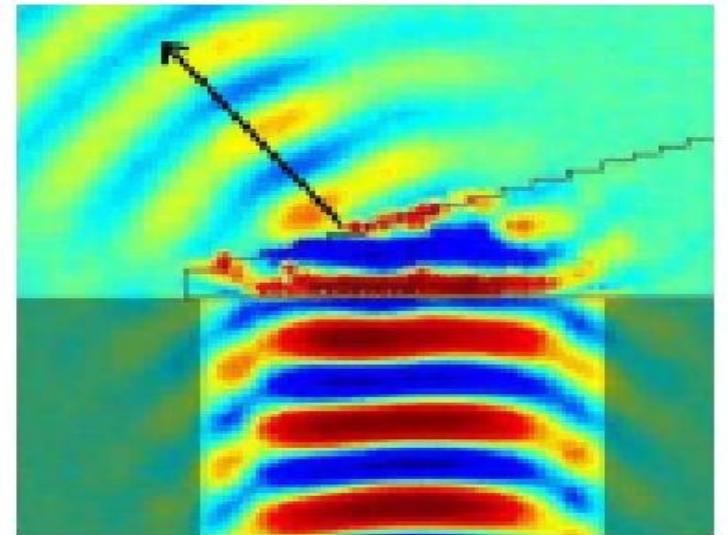
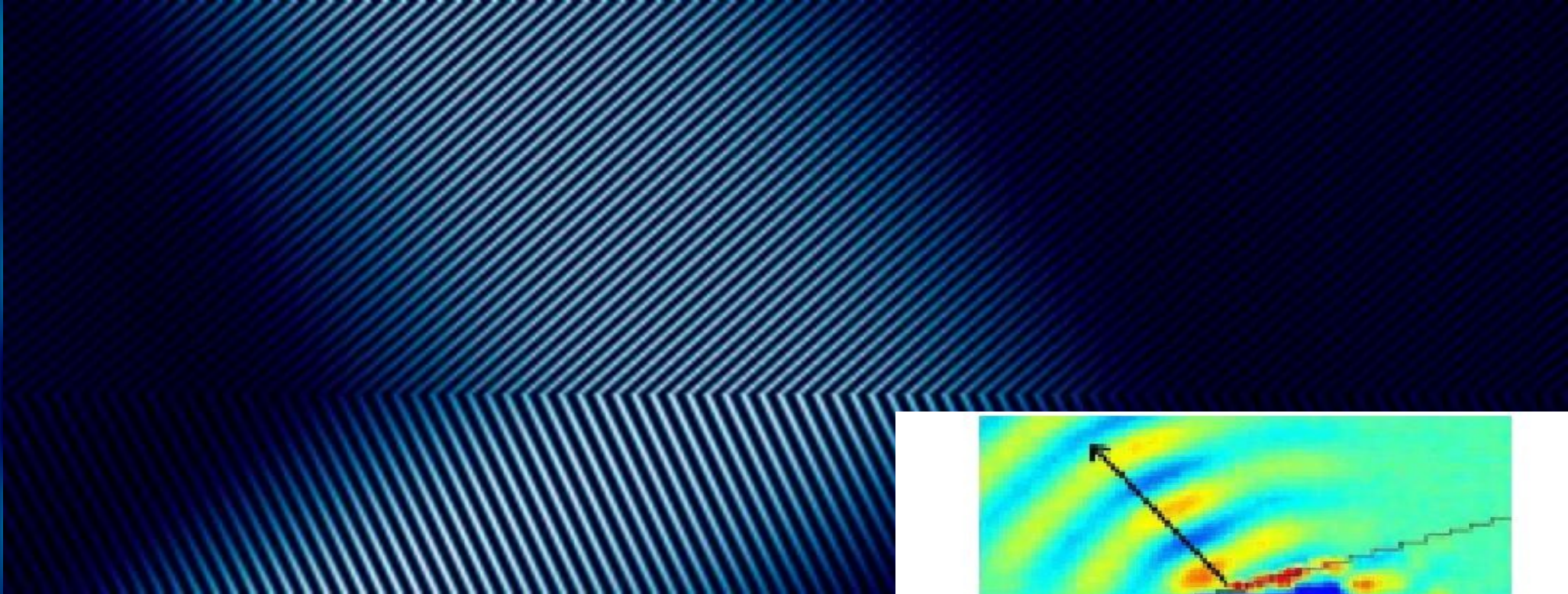


# Réfraction usuelle





# Réfraction négative



R. Shelby, D. Smith, and S. Schultz. Science 292 77 (2001)

# Vitesse de phase et de groupe

- Vecteur d'onde : vitesse de phase
- Poynting : vitesse de groupe
- Vitesse de phase et de groupe sont opposées dans un milieu main gauche



# « Moonwalk »



# Lentilles plates

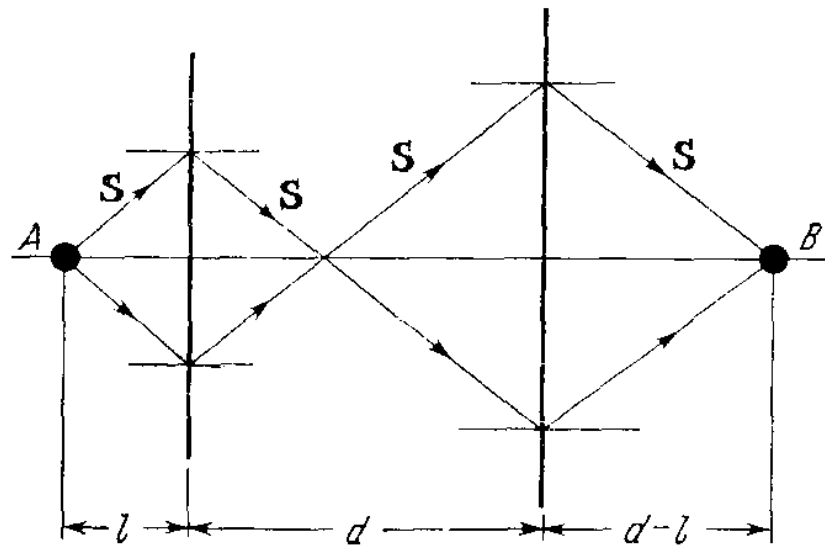


FIG. 4. Passage of rays of light through a plate of thickness  $d$  made of a left-handed substance.  $A$  – source of radiation;  $B$  – detector of radiation.

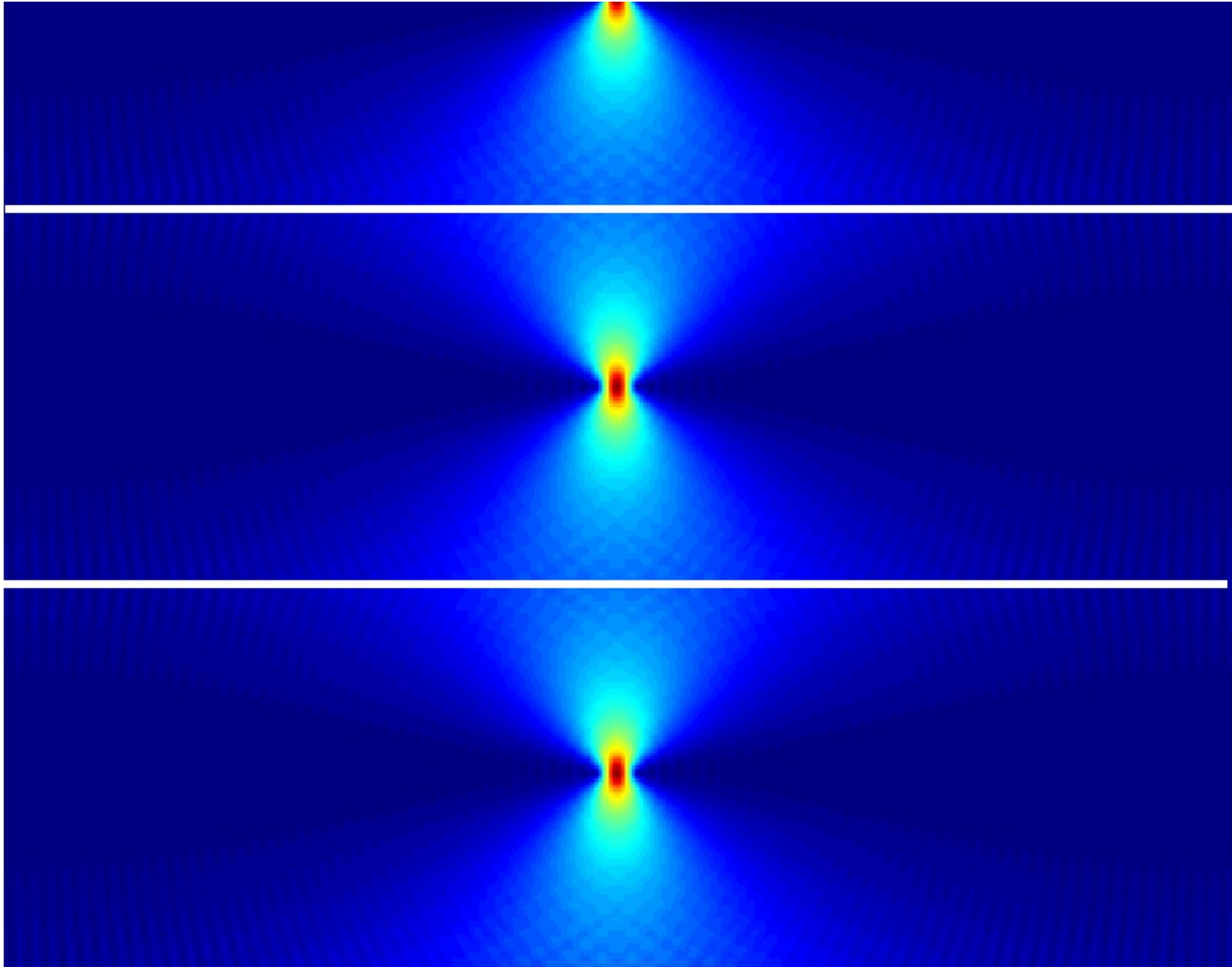
# Lentille « parfaite »

Avec un indice  $-1$

- Pas de réflexion
- Pas d'aberration géométrique
- Et... pas de limite de Rayleigh : stigmastisme absolu [1] !

[1] J. B. Pendry, “Negative refraction makes a perfect lens”, Phys. Rev. Lett. 85 3966 (2000)

# Lentille parfaite



# Deux raisons

- Réfraction négative
- Excitation de mode de surface
  - amplification des évanescents

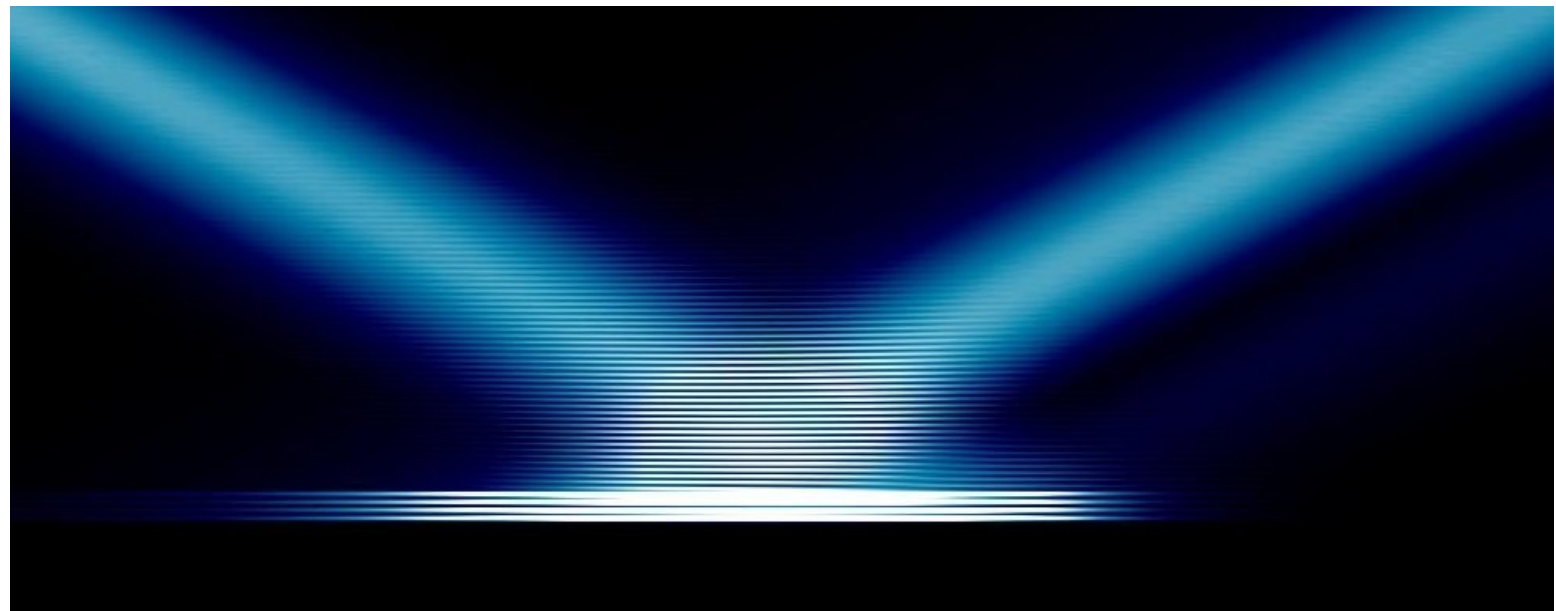
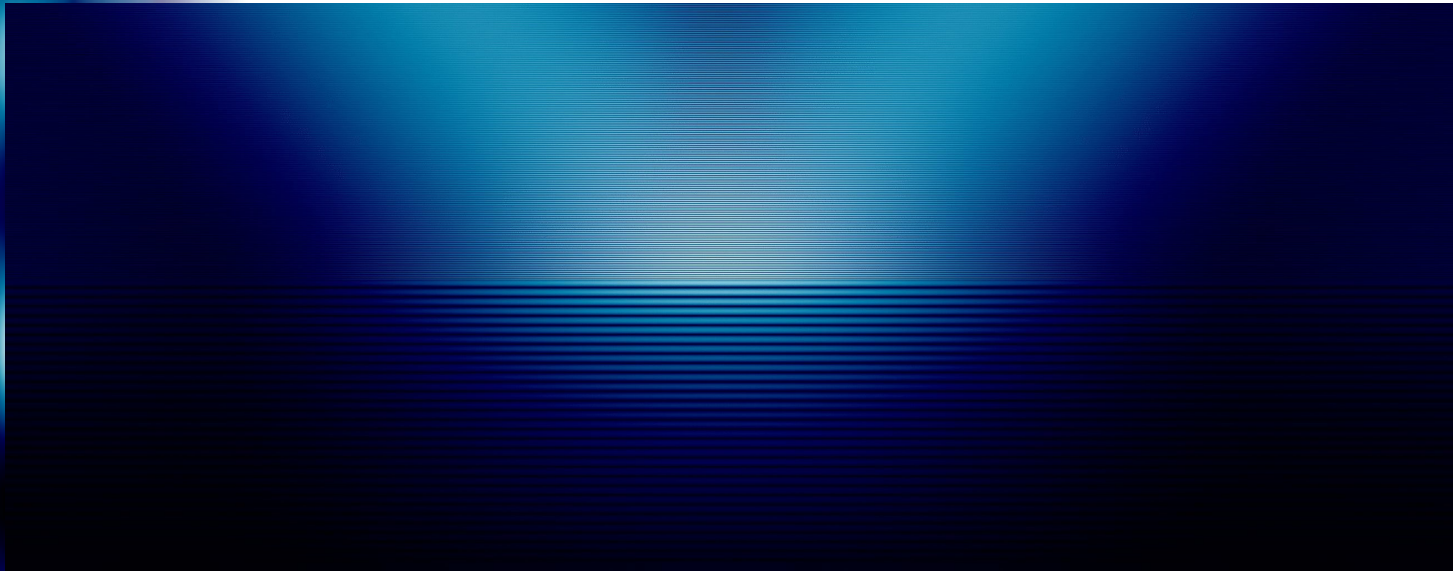


# Matériaux d'indice négatif

- Entre 1967 et 2000, aucune étude !
- Un pan entier de la physique des ondes a été raté...
- Tout refaire
  - Modes guidés
  - Effet Cerenkov
  - Effet Goos-Hänchen



# Effet Goos-Hänchen / Décalages

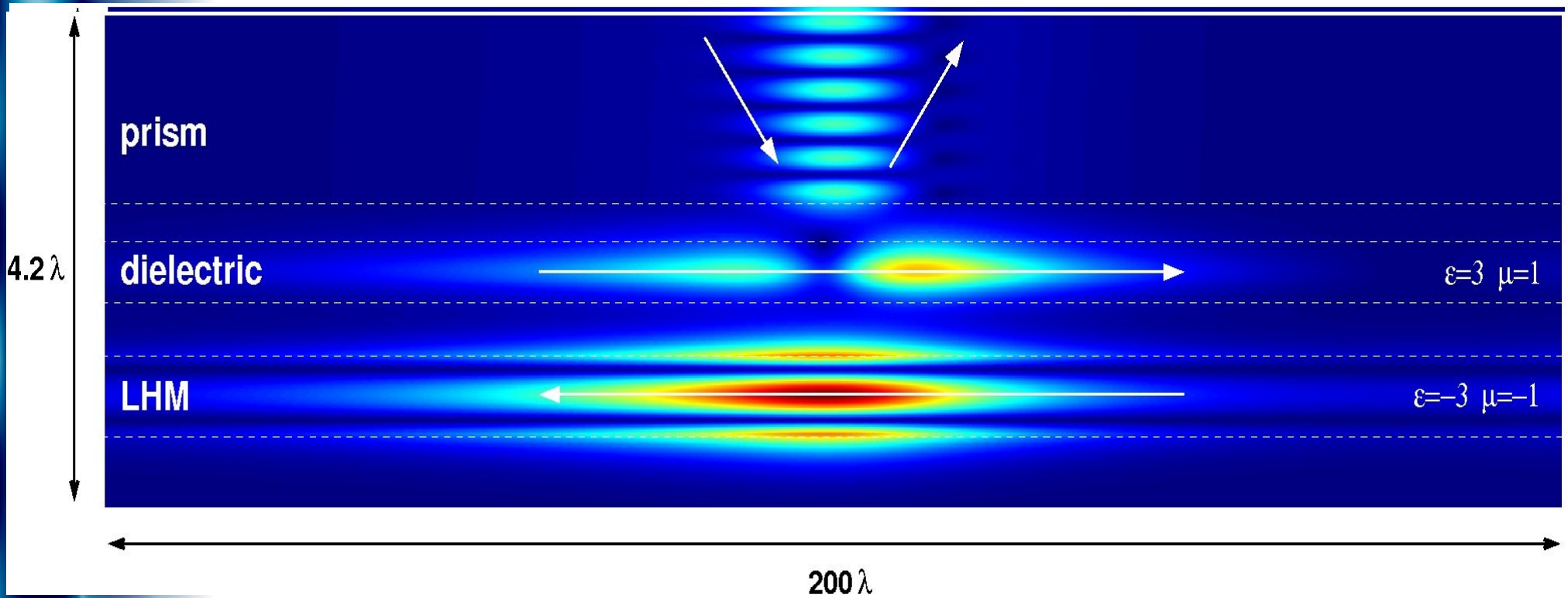


# Couplage





# Couplage contra-directionnel



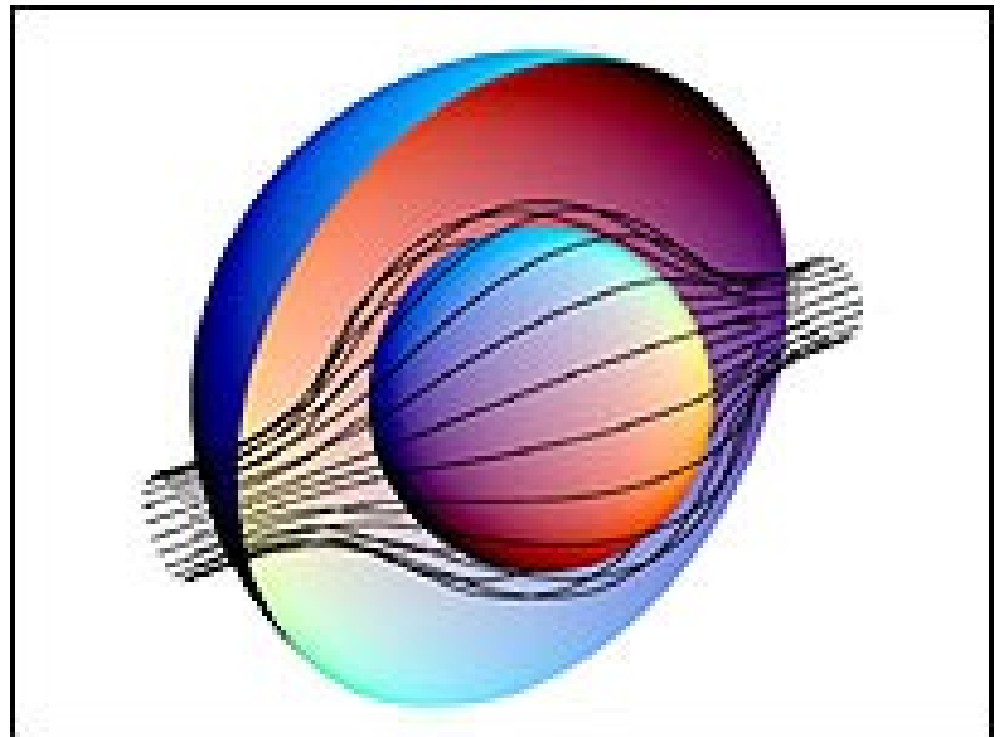
# Optique transformationnelle

- On contrôle les propriétés locales électriques et magnétiques
- On peut les faire varier continument
- On peut tordre l'espace On peut effectuer des transformations pour les ondes
  - Des métriques apparaissent,
  - Les epsilon et mu sont modifiés (anisotropes)
  - Mais on sait les fabriquer !

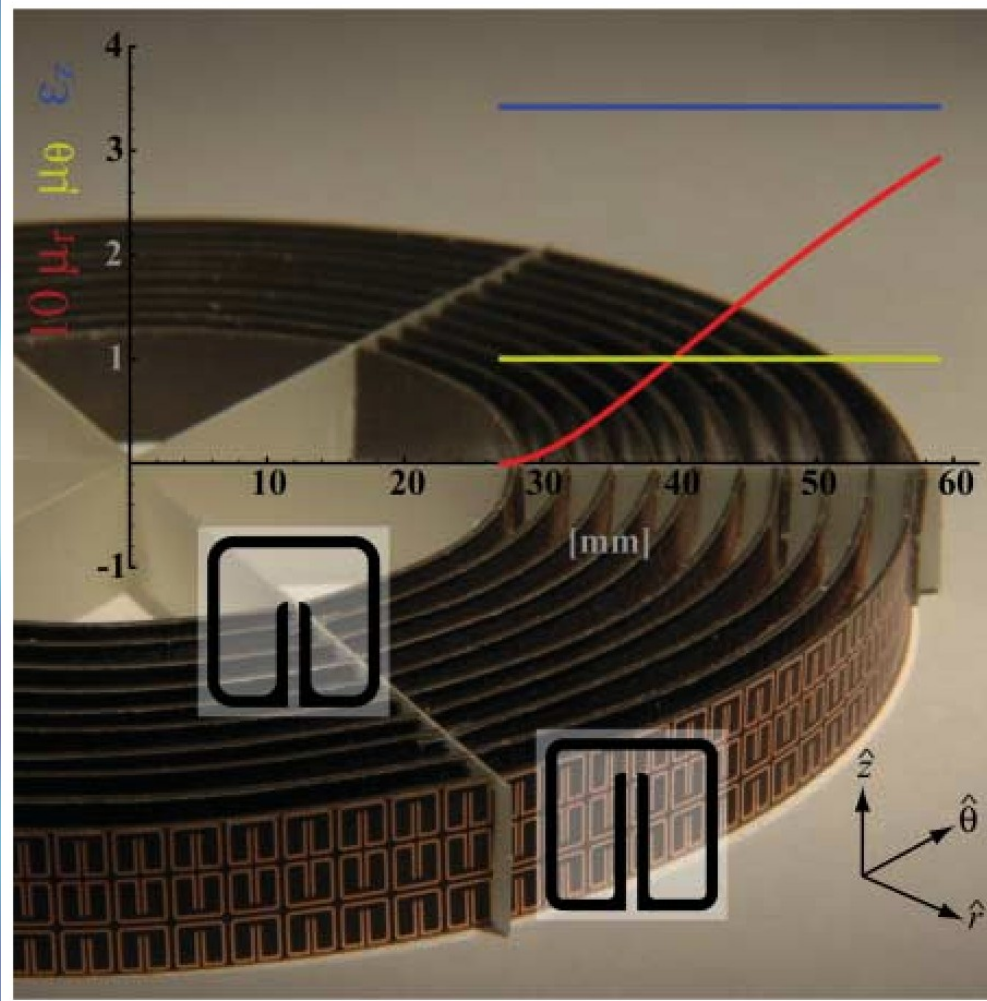
J. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, Science 312,1780 (2006)

# Invisibilité ?

- On prend un cylindre
- On « étend » le point central
- Les rayons lumineux « contournent » la zone obtenue
- Cape d'invisibilité...



# Invisibilité micro-ondes 2D

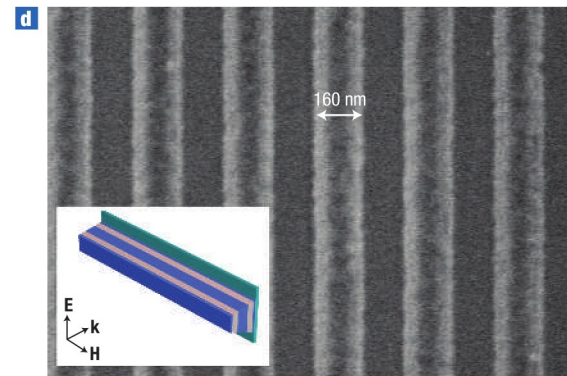
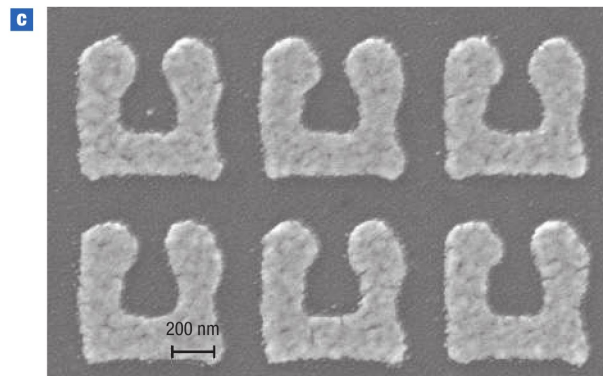
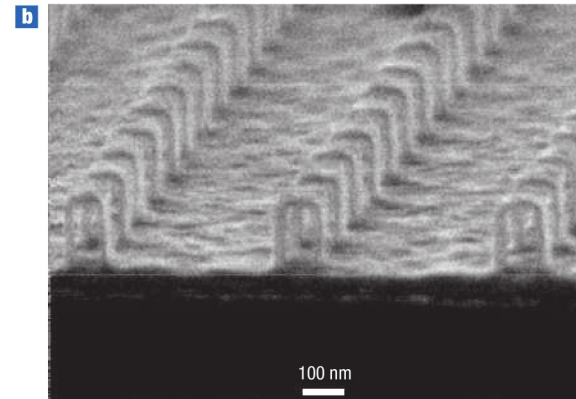
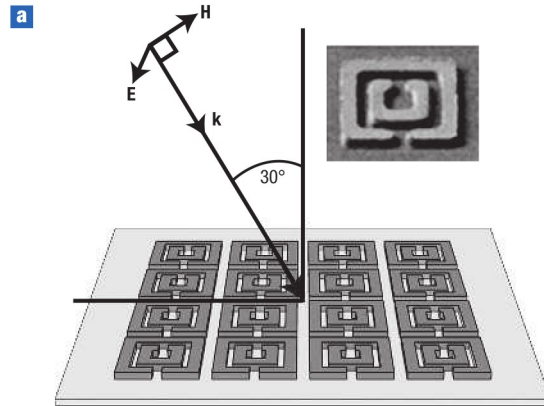


# Des obstacles...

- Le caractère résonant
  - Fondamental (énergie négative)
- Les pertes
  - Optimisation
  - Diélectriques
  - Pompage
- La taille...

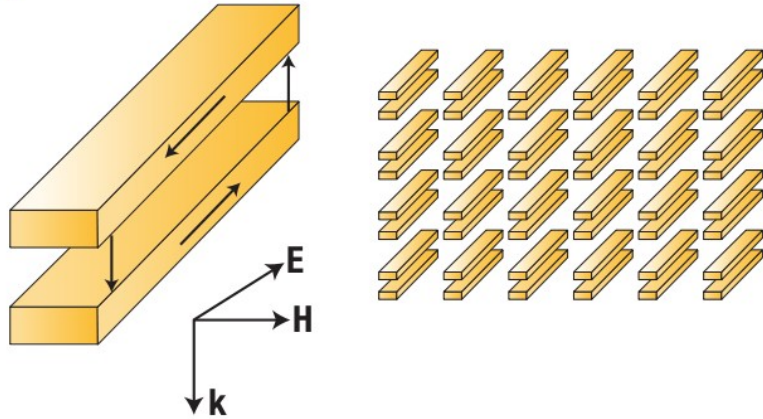


# Structures résonantes

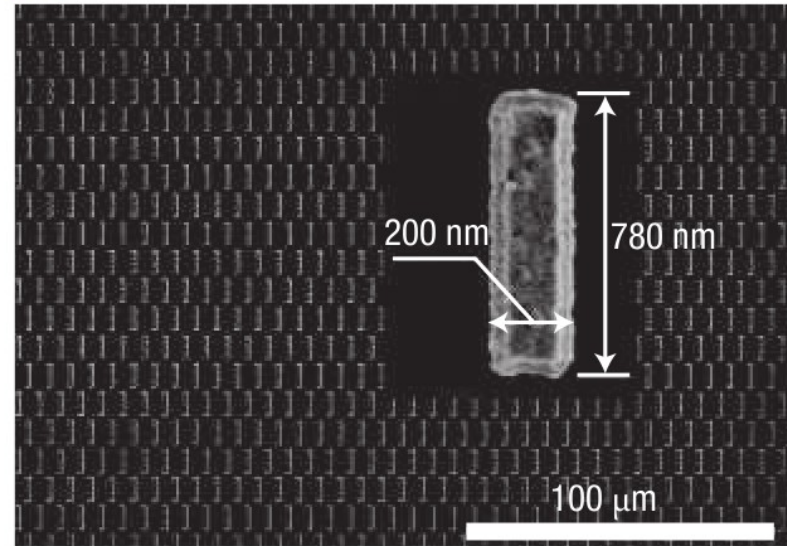


# Structures « Fishnets »

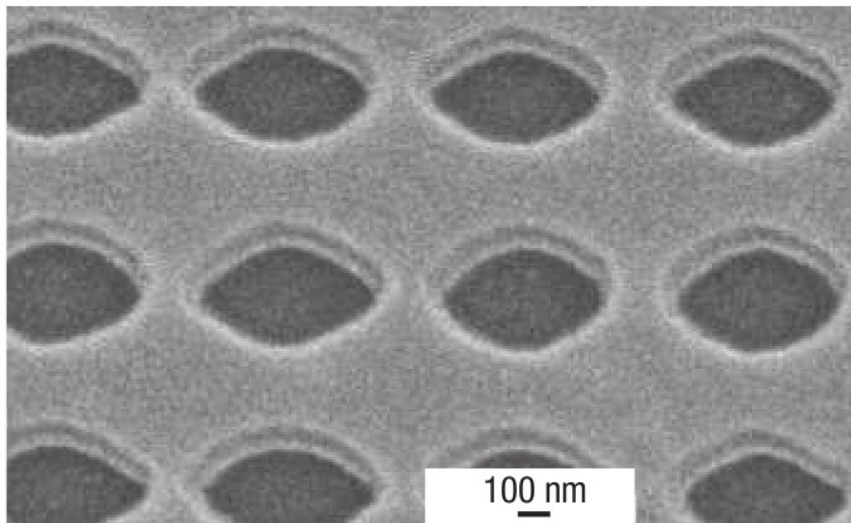
a



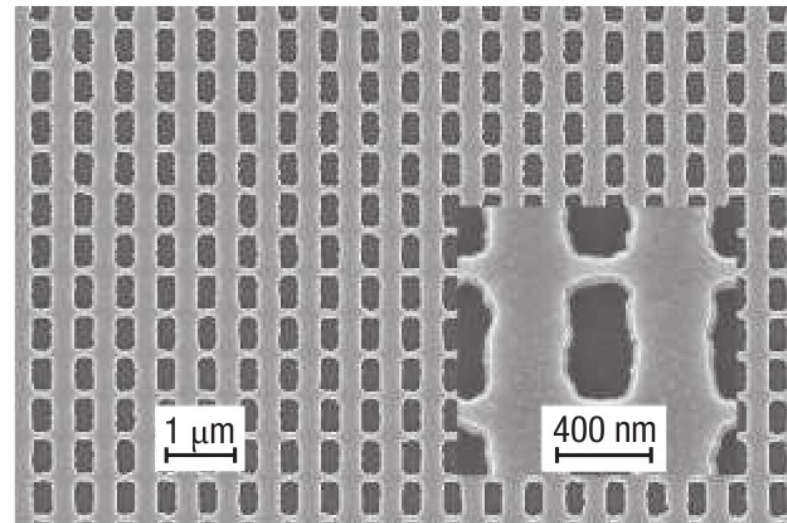
b



c



d

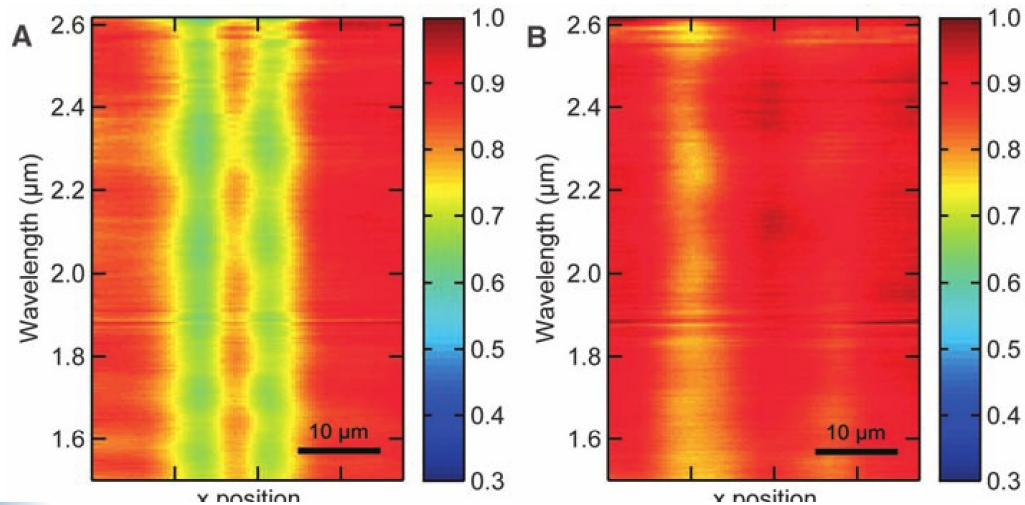
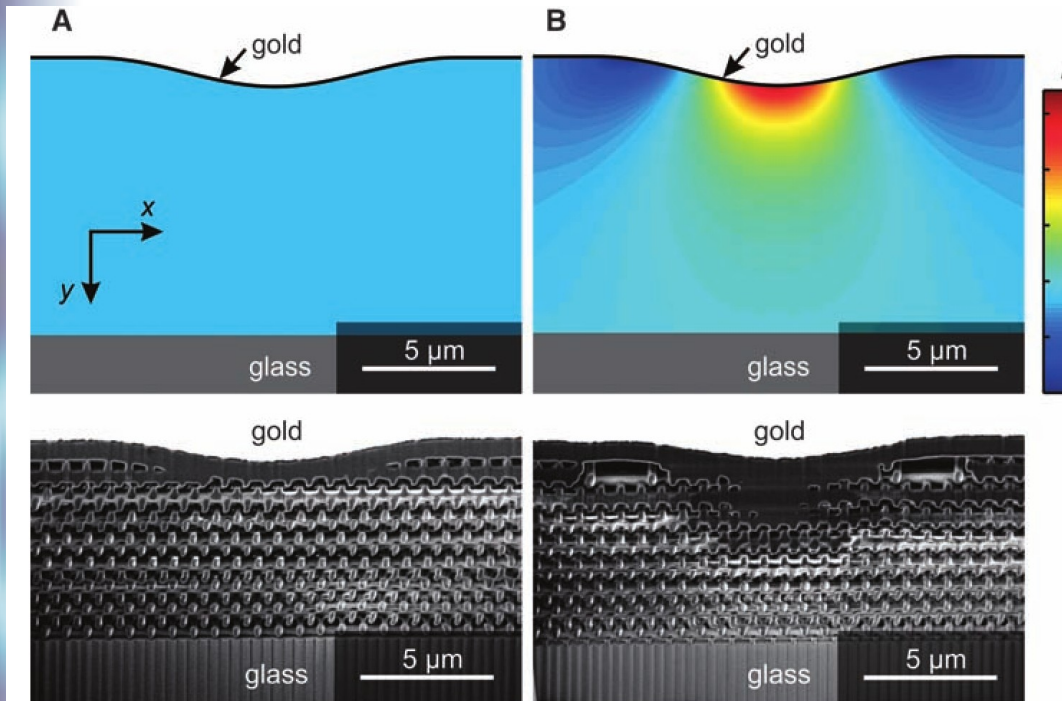


# Encore des concepts

- « Trous noirs » micro-ondes et optiques
- Contrôle de la chiralité des motifs
- Contrôle de l'anisotropie
- Antennes !
- Cristaux photoniques



# Tapis d'invisibilité



Science 328,337 (2010)

# En conclusion...

- Une nouvelle physique avec de la vieille !
- Des outils, des techniques nouveaux
- Beaucoup de créativité
- Autres types d'ondes : son, ondes sismiques, vagues...