

# Des cristaux photoniques aux métamatériaux



**Jean-Michel LOURTIOZ**

Institut d'Électronique Fondamentale (IEF)  
CNRS / Université Paris-Sud  
ORSAY - France

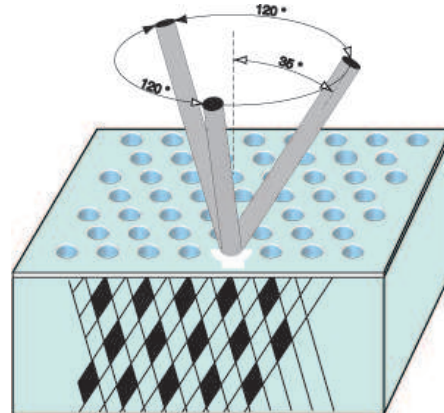


# De l'expérience de Yablonovitch aux applications RF



1991

E. Yablonovitch *et al.*,  
*PRL* 67, p. 2295, 1991



La première bande interdite complète (3D) en micro-onde à  $\lambda \approx 2,5$  cm :

La propagation de la lumière est interdite dans toutes les directions et pour toutes les polarisations

## Applications RF

**Ex : La cage à lumière pour des antennes de nouvelle génération**



A. De Lustrac *et al.*, Journ.  
du CNRS, sept. 2005

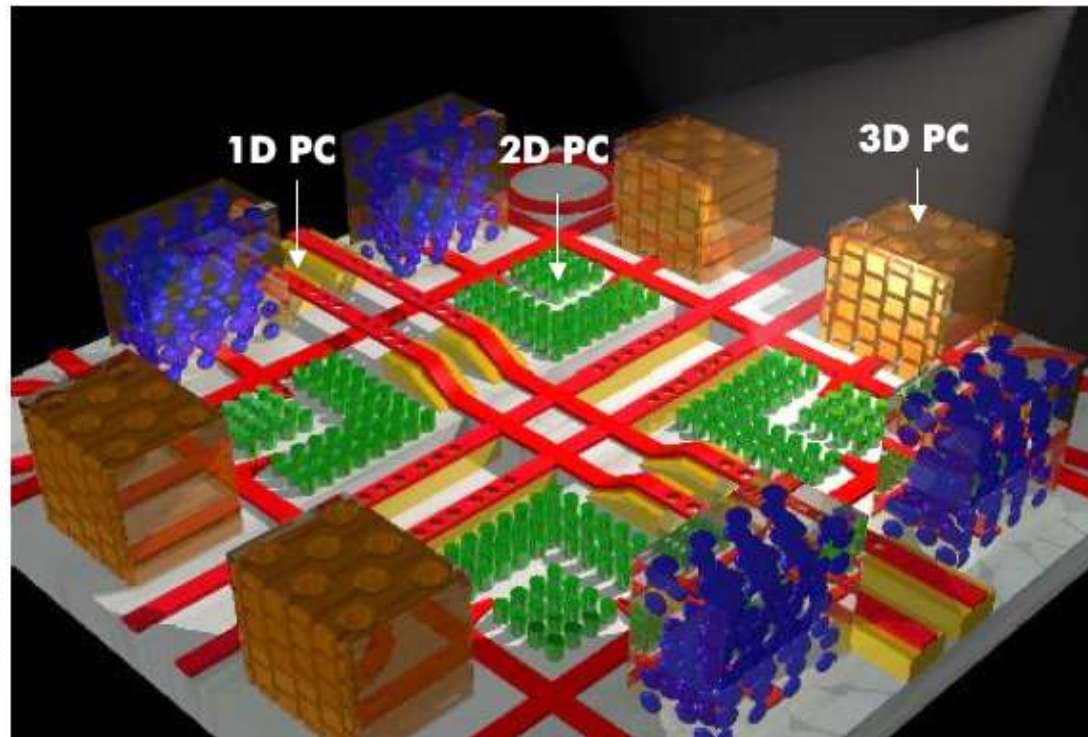
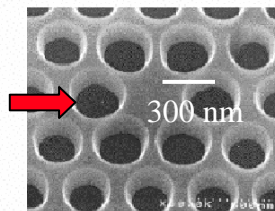
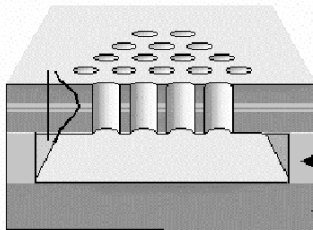
Colls. : IEF, IETR, France  
Télécom, Advantem (RNRT 2003)

# De l'expérience de Yablonoitch à la micro- nano- photonique intégrée

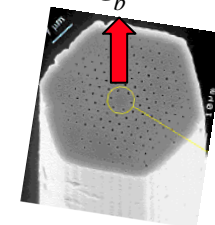
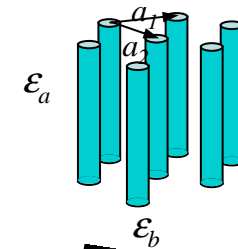


Vision artistique d'un circuit photonique intégré  
J.D. Joannopoulos, *Nature* 386, p.143, 1997

## Les cristaux photoniques 2D



## Les fibres microstructurées



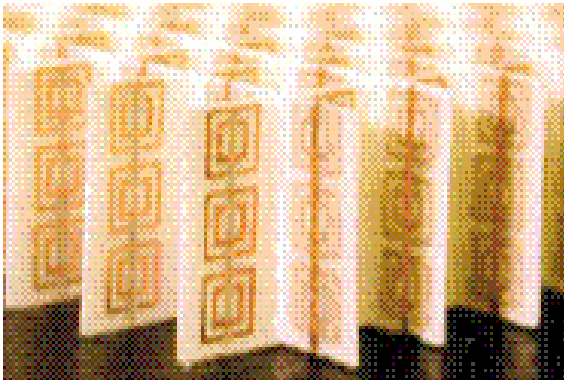
# Contrôle de l'indice de réfraction, des cristaux photoniques aux métamatériaux



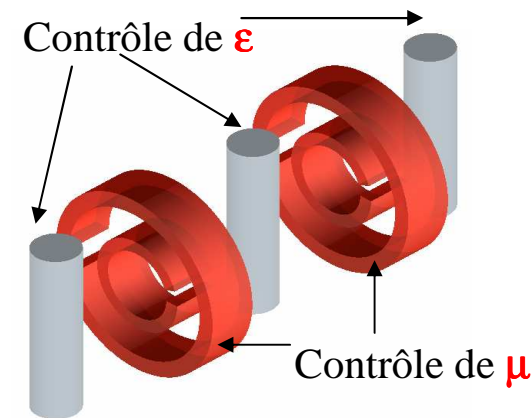
## Les cousins des cristaux photoniques ?

2000

- Combiner métaux et diélectriques pour contrôler artificiellement  $\epsilon$ ,  $\mu$  et les propriétés réfractives des structures périodiques
- Premières études initiées dans le domaine RF by J. Pendry



Métamatériau à indice de réfraction négatif en technologie de circuits imprimés



D.R. Smith et al., *PRL* 85, p. 2933, 2000

## Mais aussi un renouveau de la plasmonique

- Extension des études RF aux longueurs d'onde de l'optique

# Plan de l'exposé



## **Jouer avec la bande interdite photonique :**

**Le confinement optique :** microcavités, microguides, microsources...

## **Jouer avec la dispersion de la lumière :**

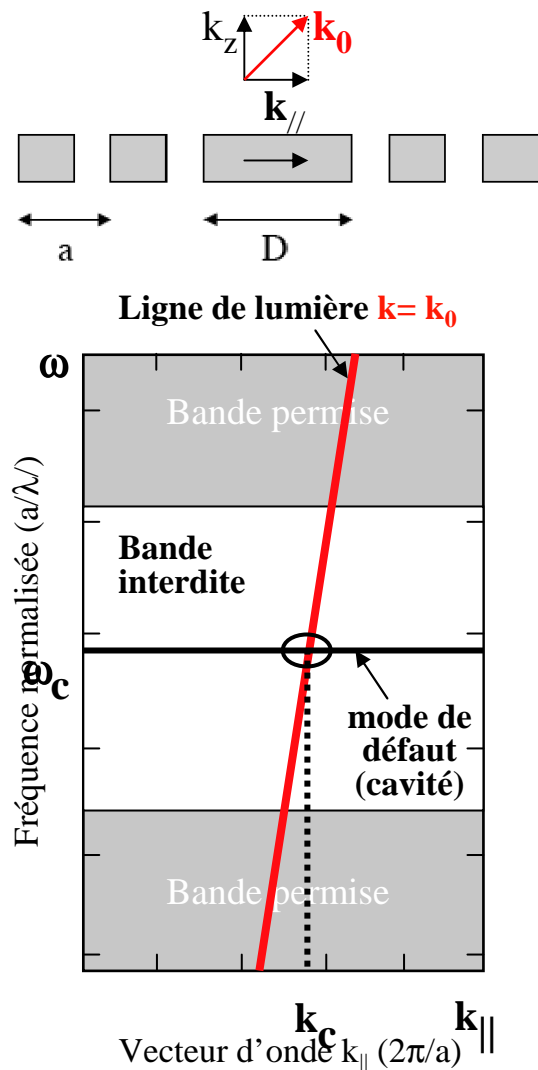
La « lumière ralentie », le superprisme, la réfraction négative...

## **Combiner métal et diélectrique : les métamatériaux**

Le passage des micro-ondes à l'optique

## **Conclusions**

# Microcavités à cristal photonique 2D à faibles pertes (à $Q=\omega/\Delta\omega$ élevé)



## Faibles pertes



- Matériaux non-absorbants

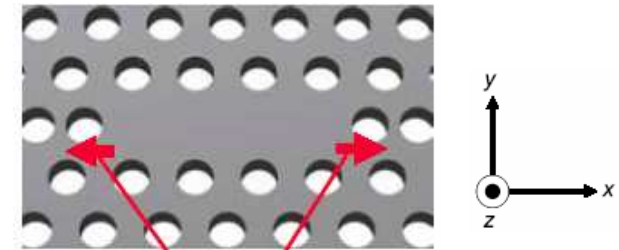
- Gap photonique 2D pas de pertes dans le plan

- Minimiser les pertes hors plan

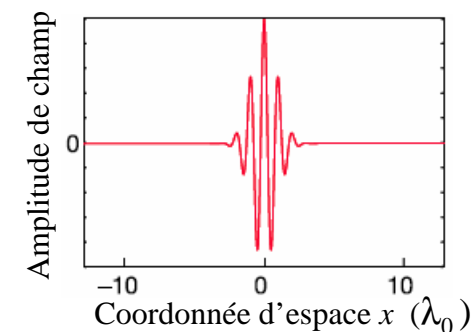
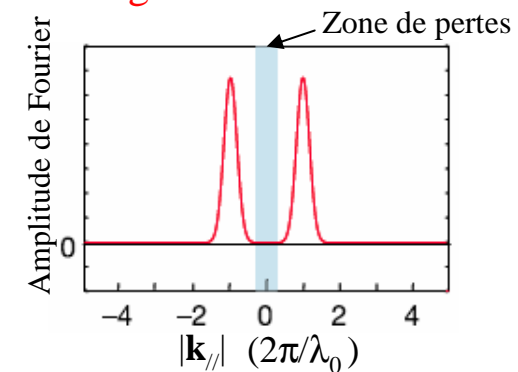
=  
Minimiser les composantes  $k_{||} \leq k_c$

=  
**Éviter les variations abruptes du champ en bord de cavité**

## Cavité L3



Décalage des trous extrêmes

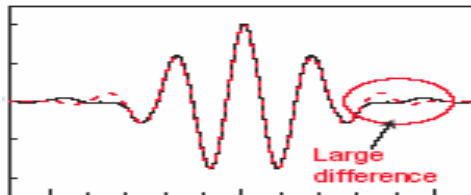
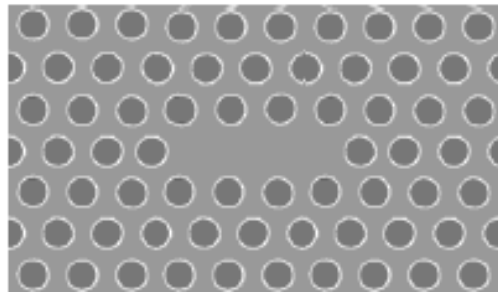


# Facteurs de qualité ultra-élevés à partir d'hétérostructures photoniques



## Des microcavités allongées

Y. Akahane, T. Asano, B-S. Song, S. Noda (Kyoto University) *Nature*, p. 944, (2003)



2006

S. Combrie, H. Benisty et al., *APL* 89, 221104 (2006)

**Q ~300.000 sur GaAs**

«Light should be confined gently to be confined strongly !»

$$Q = \Delta\lambda/\lambda = 65.000$$

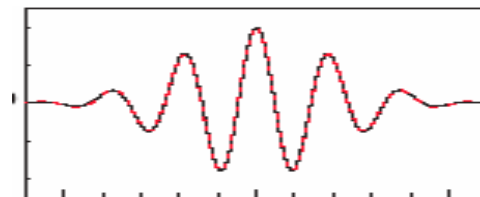
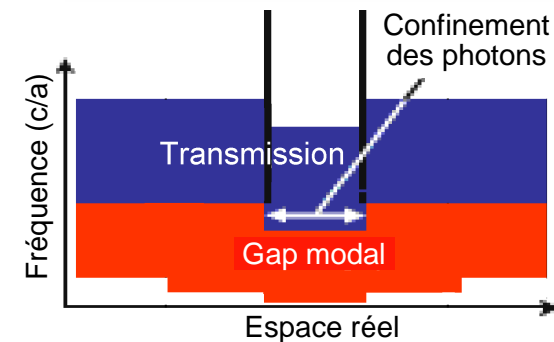
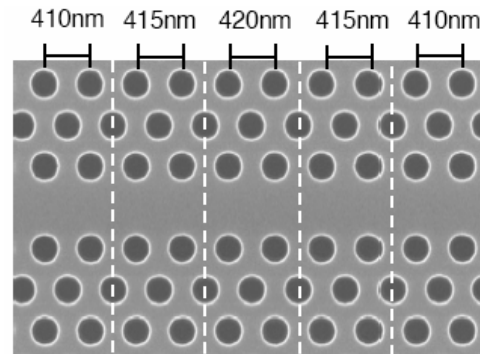


**1.000.000**

$$V = 0,07 \mu\text{m}^3$$

## aux hétérostructures photoniques

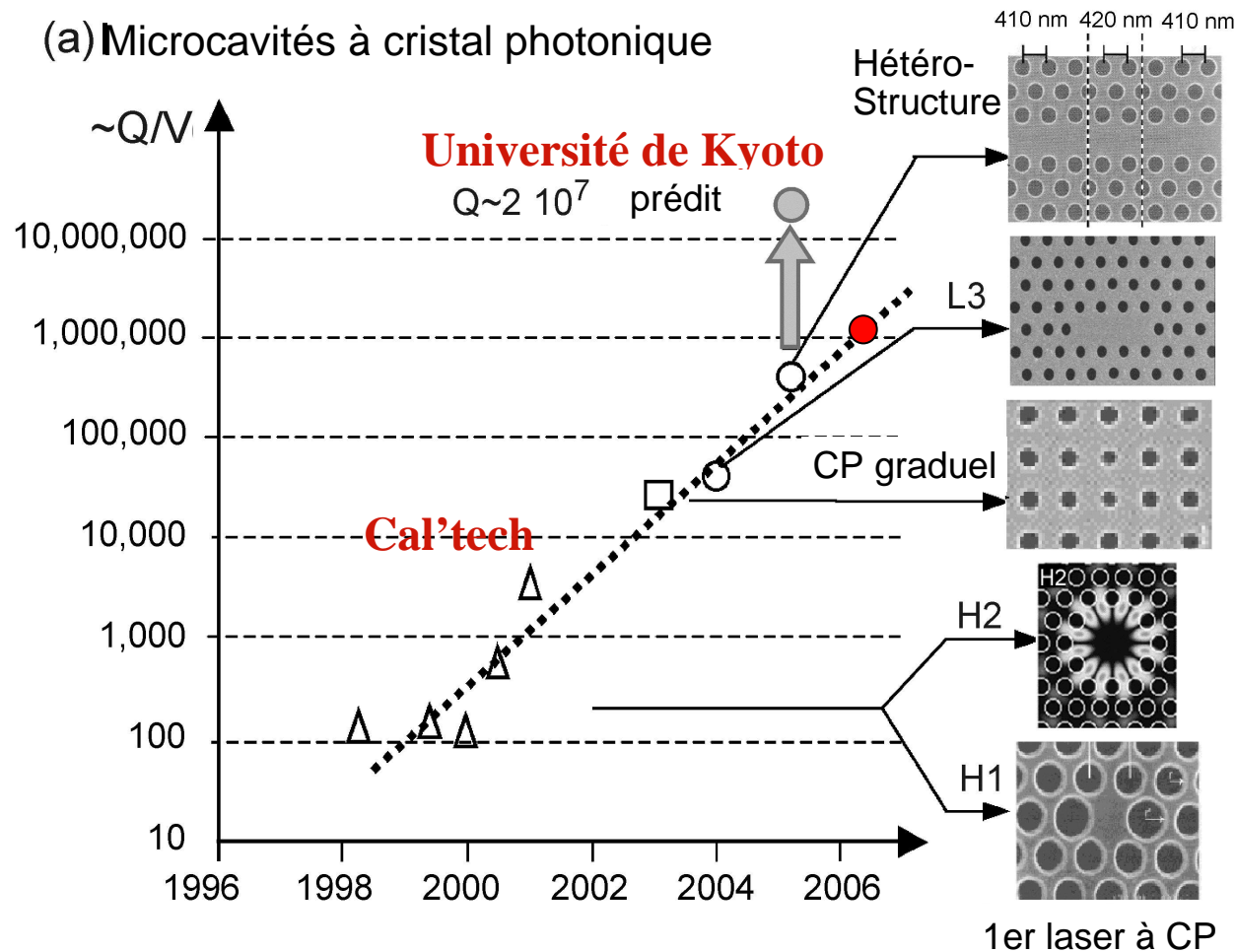
T. Asano, B-S. Song, S. Noda *Opt. Express* p. 1996, (Jan. 2006)



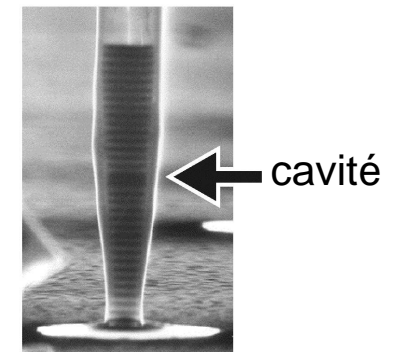
# Évolution des performances des microcavités à cristal photonique



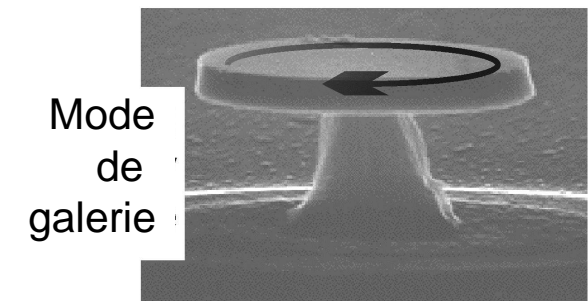
## Une croissance continue du facteur de qualité $Q$



(b) Micro-piliers



(c) Micro-disques

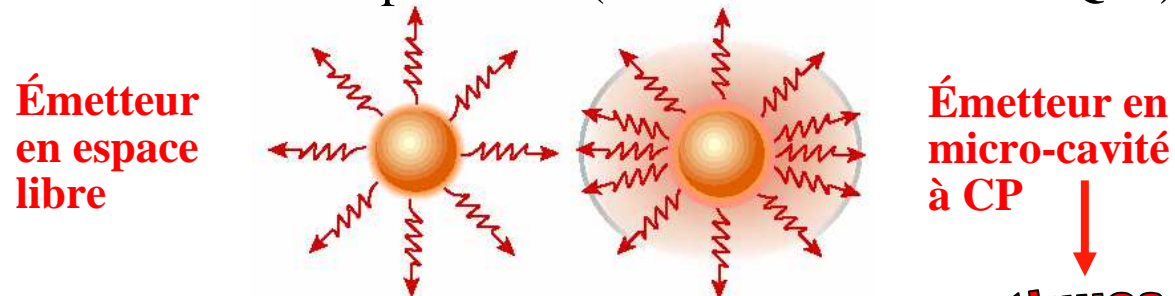




# Potentialités des microcavités ultimes à haut facteur de qualité



- **Couplage « faible »** d'un émetteur au mode de cavité :  
exaltation de son émission spontanée (**facteur de Purcell  $\sim Q/V$** )



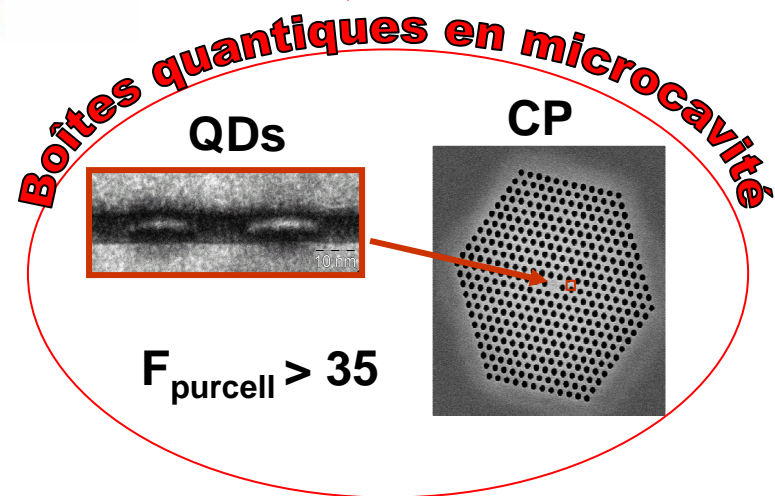
- sources à photons uniques
- lasers « sans seuils » ...
- S. Laurent *et al.*, *APL* 87, p.163107, 2005

- **Régime de couplage « fort »** :

- électrodynamique quantique en microcavité à l'état solide
- E. Peter *et al.*, *PRL* 95, p.067401, 2005

- **Exaltation des non-linéarités optiques** :

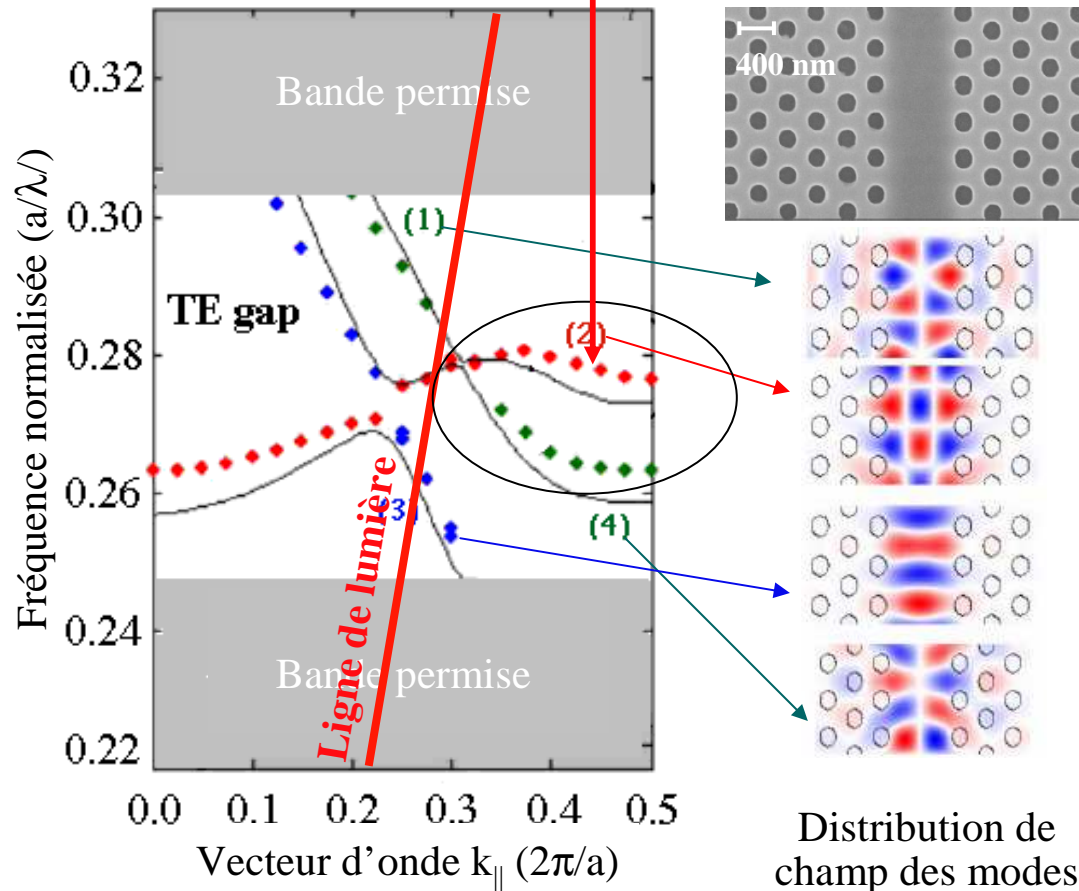
- bistables à très bas seuil ( $< 10 \mu\text{W}$ ) M. Notomi *et al.*, *Opt. Expr.* 13, p. 2678, 2005
- SHG et THG à très bas seuil Y. Dumeige *et al.*, *PRL* 89, p.043901, 2002



# Microguides à cristal photonique 2D sur membrane ou substrat SOI



faible vitesse de groupe ( $\sim c/100$ ) : interactions lumière-matière renforcées

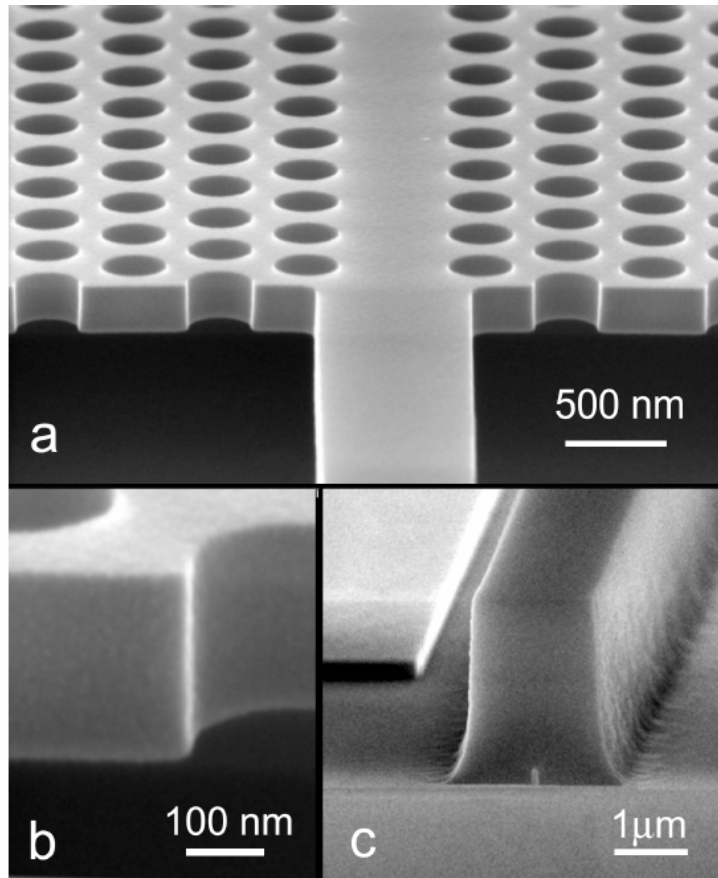


Structure à fort contraste d'indice vertical

(ex: optique membranaire)

- **Des modes de Bloch guidés sous la ligne de lumière ne diffractent pas**  $\Rightarrow$
- **Ces modes sont sans pertes**
- Mais, des discontinuités (ex: guide coudé) peuvent entraîner des pertes massives si elles ne sont pas conçues soigneusement

# Performances des microguides à cristal photonique



- Guide W1 sur membrane Si dans l'air (une rangée de trous manquants)

Pertes de propagation :  $L < 5$  dB/cm

E. Dulkeith, S. McNab, Y. Vlasov (IBM)  
*Phys. Rev. B* 72, p. 115102, 2005

Résultats similaires sur InP  
(groupe de Noda, Univ. Kyoto)

- Guide W1 sur substrat SOI

Pertes de propagation,  $L < 14$  dB/cm

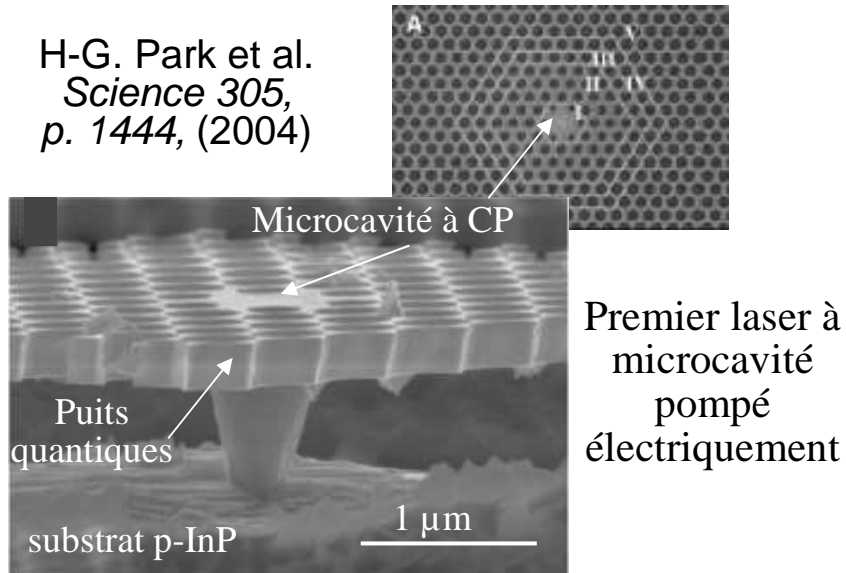
M.D. Settle *et al.* (UK)  
*Optics Express*, Vol. 14, p.2440, 2006

# Les Microlasers III-V à cristal photonique

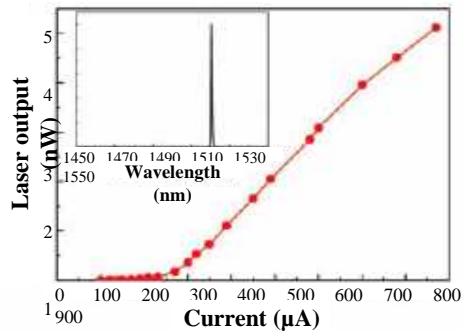


## Laser à microcavité

H-G. Park et al.  
*Science* 305,  
p. 1444, (2004)



Premier laser à microcavité pompé électriquement

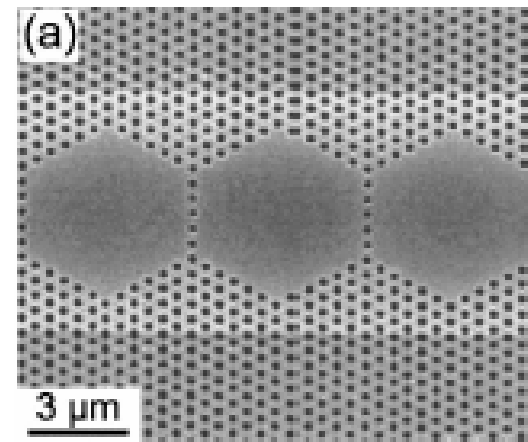


$\lambda = 1520\text{nm}$   
 $\beta = 0,25$

➔ Vers un laser sans seuil ?

## Laser à microcavités couplées

T.D. Happ et al.,  
*APL* 82, p.4, 2003



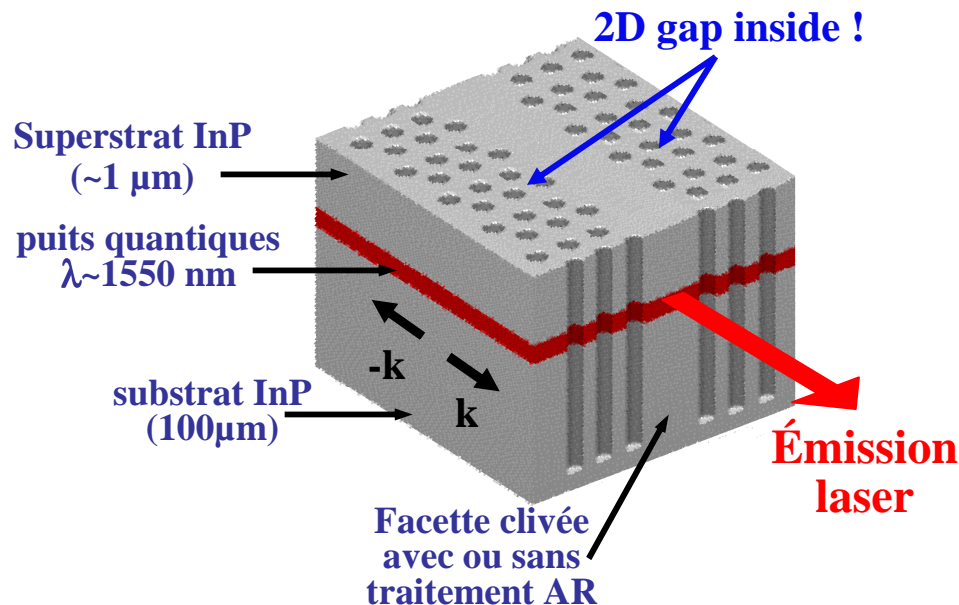
➔ Gain élevé, modes « ralentis »  
Lasers courts et larges  
Puissance élevée ~2,3 mW

# Les Microlasers III-V à cristal photonique



## Laser guide d'onde

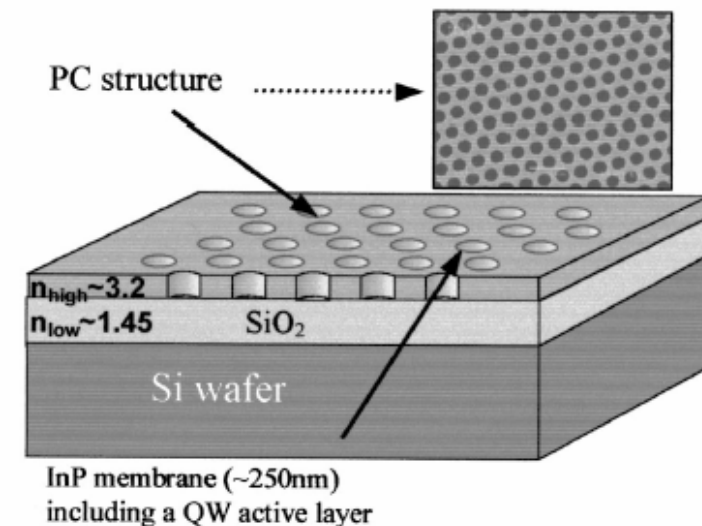
X. Checoury et al., *APL* 89, p.071108, 2006



➔ Fonctionnement de type DFB  
Fonctionnement monomode  
à seuil réduit et taux de réjection élevé

## Laser à mode de Bloch « lent »

C.Monat et al., *APL* 81, p. 5167, 2002  
Kwon, Lee et al., *APL* 83, p. 3870, 2003

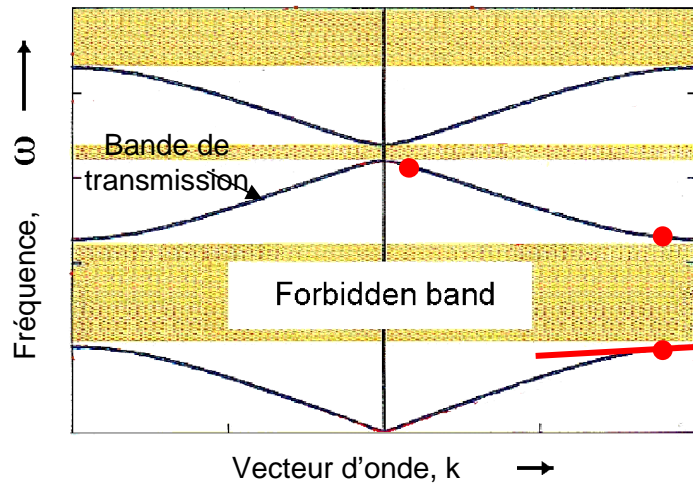


➔ Exploiter le ralentissement de la lumière et le renforcement des interactions avec le milieu à gain

# Jouer avec la dispersion de la lumière



## La lumière ralentie



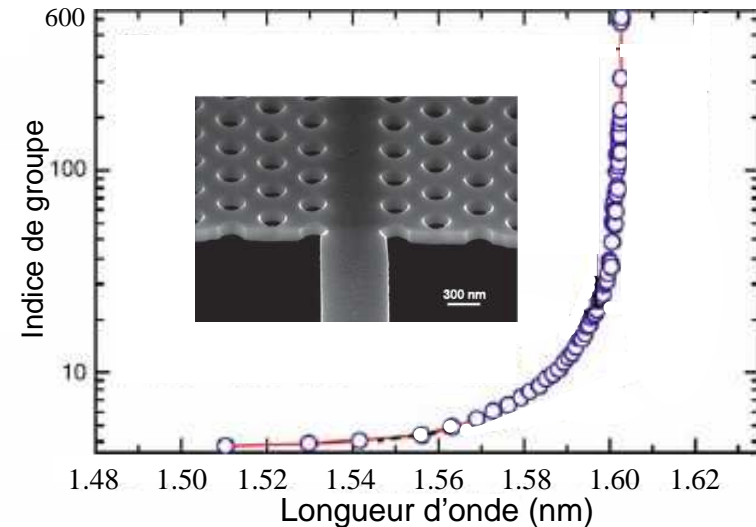
Vitesse de phase

$$v_{\phi} = \frac{\omega}{k}$$

Vitesse de groupe

$$v_G = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

$\rightarrow 0$



- ❑ Vitesse de groupe > 100 fois plus petite que dans le vide

Y.A. Vlasov *et al.*, *Nature* 438, p.65, Nov. 2005

- ❑ Dispersion de  $5 \times 10^8$  ps/nm/km
- ❑ CP de 100  $\mu\text{m}$  équivalent à 1 km de fibre conventionnelle

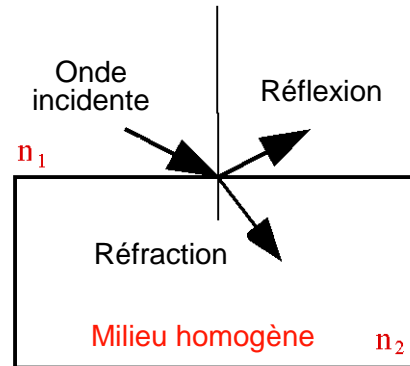
→ Vers des lignes à retard optique de très petite taille

NOV.  
2005

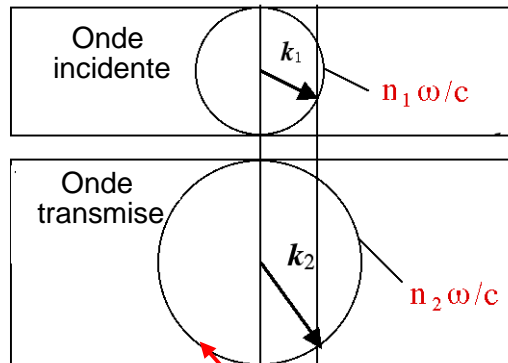
# Jouer avec la dispersion : revisiter les lois de Snell Descartes ?



Dans un matériau homogène isotrope

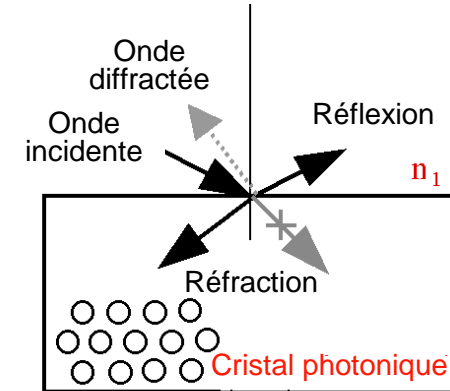


Pour  $\omega$  donné,  $|\mathbf{k}|$  est identique dans toutes les directions



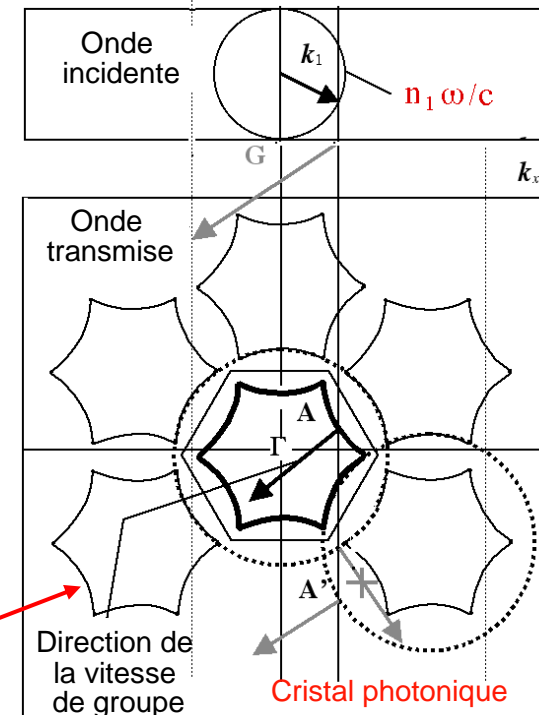
Courbes isofréquences

Dans un cristal photonique



$k_{||}$  est conservé

Pour  $\omega$  donné,  $|\mathbf{k}|$  peut varier fortement avec la direction de propagation

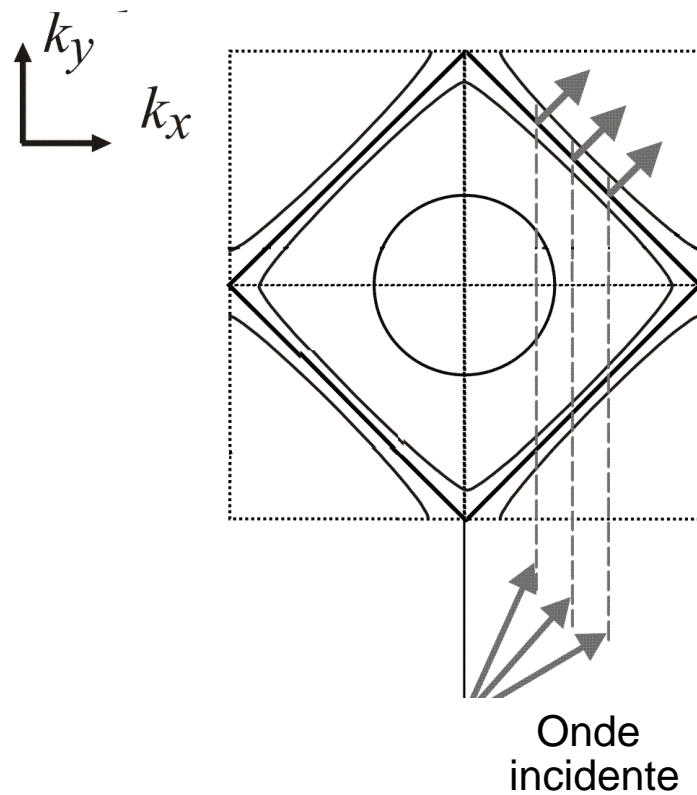


# Jouer avec la dispersion des cristaux photoniques : effet de supercollimation

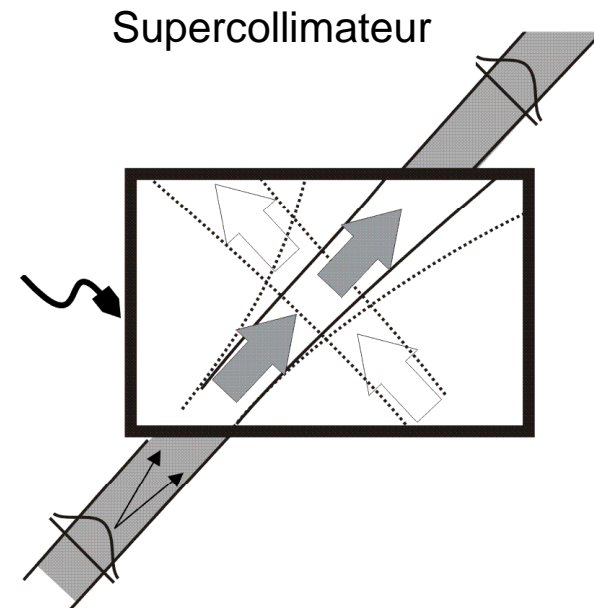


## Exploitation de zones “plates” des courbes isofréquences

À fréquence donnée, toutes les composantes  $\mathbf{k}$  d'un faisceau divergent sont redirigées dans la même direction



Onde transmise



Kosaka et al., *APL* 74, p.1212, 1999

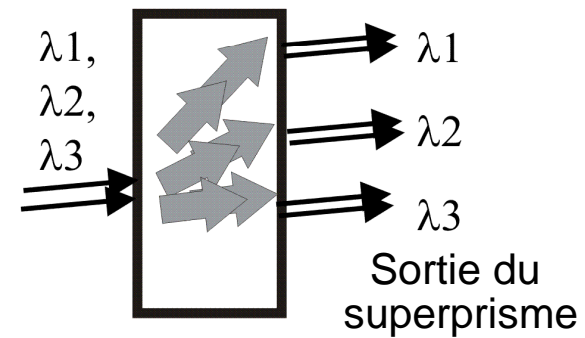
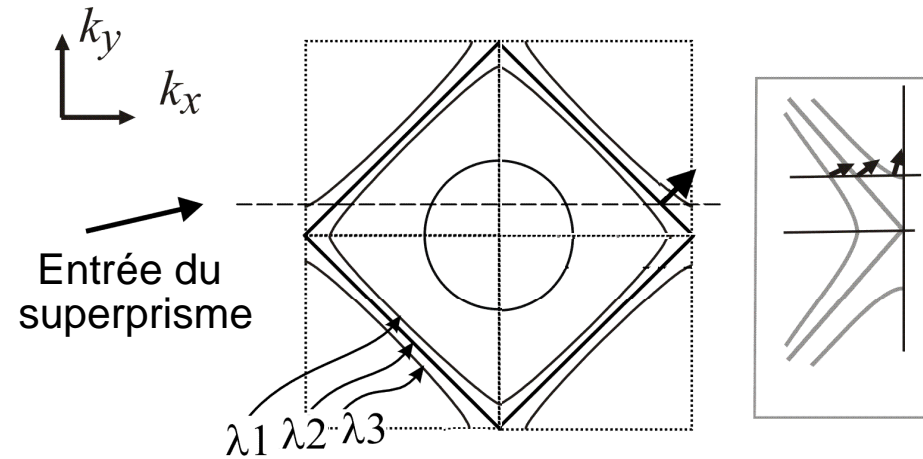
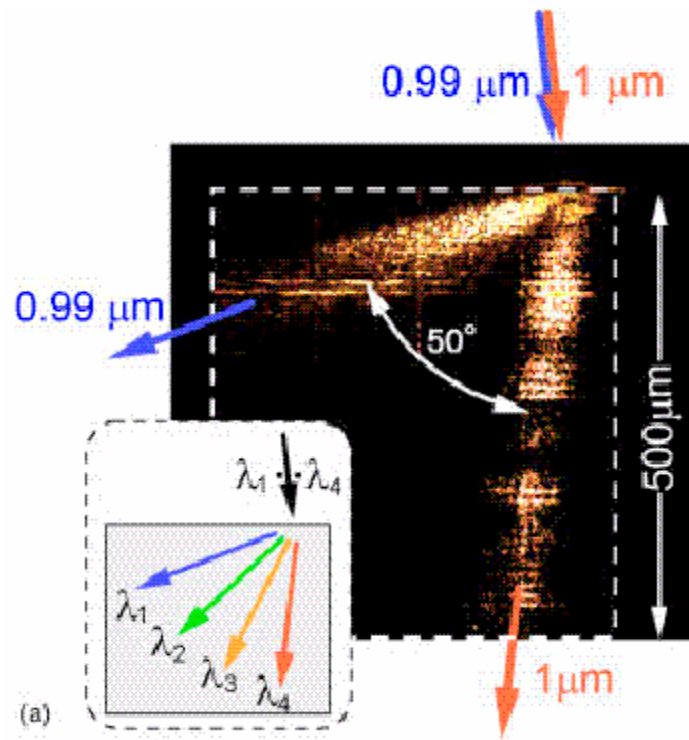


# Jouer avec la dispersion des cristaux photoniques : effet de superprisme



## Exploitation des points anguleux des courbes iso-fréquences

Kosaka et al., *APL* 74, p.1370, 1999



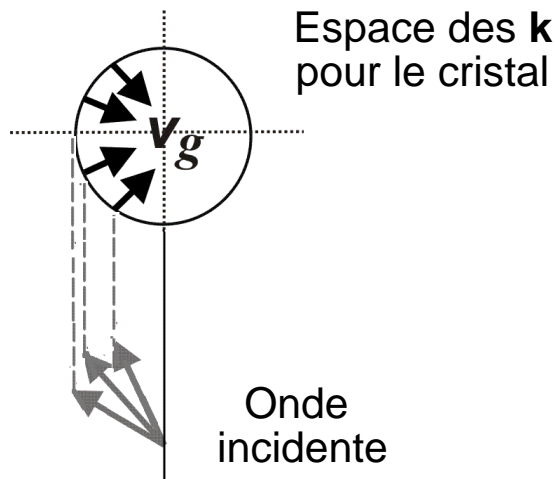
• Dispersion angulaire  $\approx -5 \text{ }^\circ/\text{nm}$

# Jouer avec la dispersion des cristaux photoniques : effet de réfraction négative



## Exploitation d'une pseudo-isotropie en bord de bande interdite

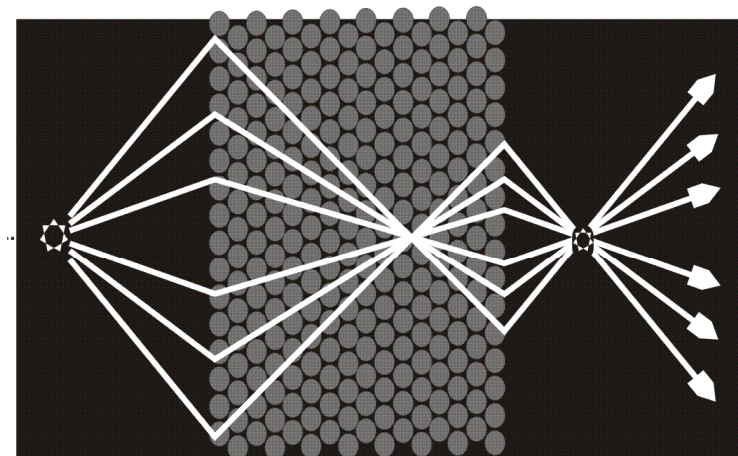
Courbes ou surfaces isofréquences circulaires (2D) ou sphériques avec la normale dirigée vers l'intérieur du contour



Notomi, *Phys. Rev.B* 62, p.10696, 2000

Effet de lentille plate  
Exploitation de la réfraction négative

$$n = -1$$



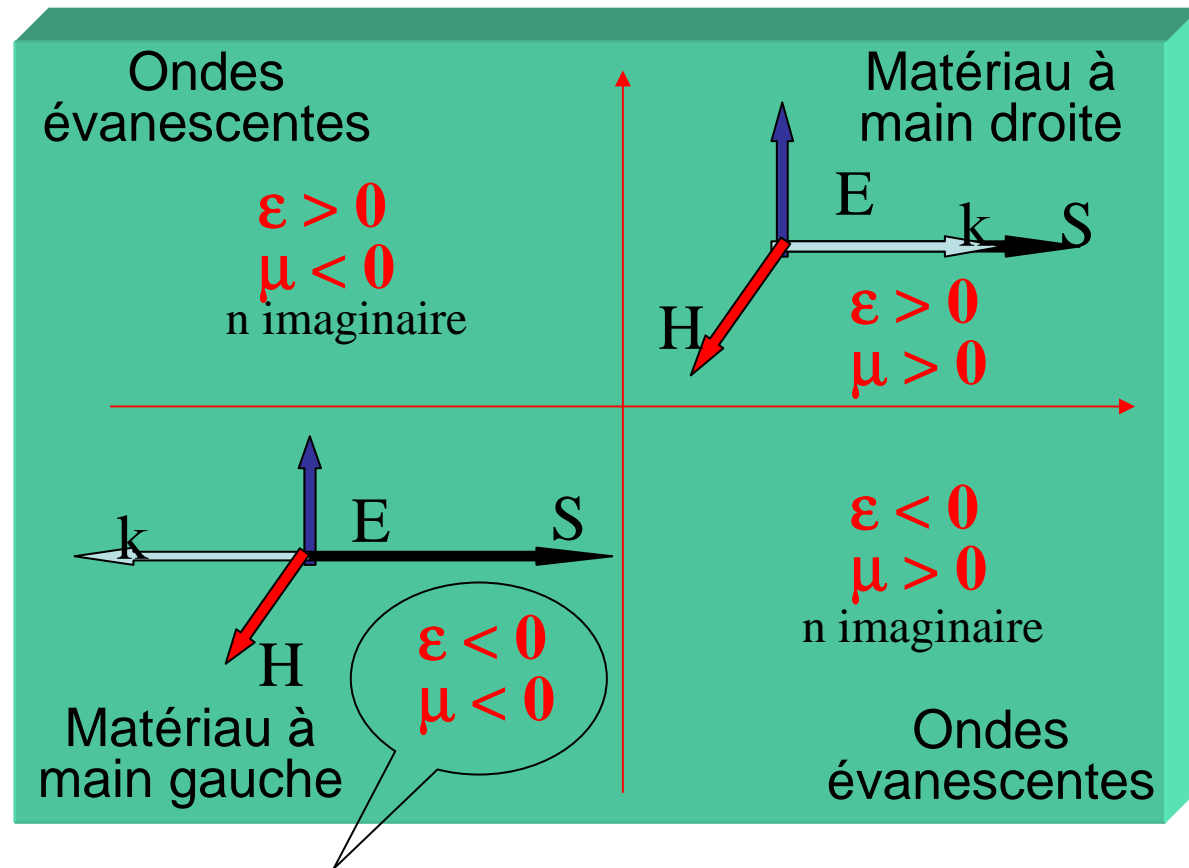
Pendry et al., *PRL* 85, p.3966, 2000

# Jouer avec $\epsilon$ et $\mu$ : des cristaux photoniques aux métamatériaux



- Les métamatériaux sont des matériaux artificiels in **1**, **2** ou **3D** dont les motifs élémentaires sont conçus pour obtenir values of  $\epsilon$  and  $\mu$

- À la différence de cristaux photoniques, la taille du motif est petite comparée à  $\lambda$



$$a/\lambda \ll 1$$



Matériau effectif

- “ $\epsilon$  et  $\mu$  négatifs” entraîne une réfraction négative :

$$\mathbf{V}_\phi \cdot \mathbf{V}_G < 0$$

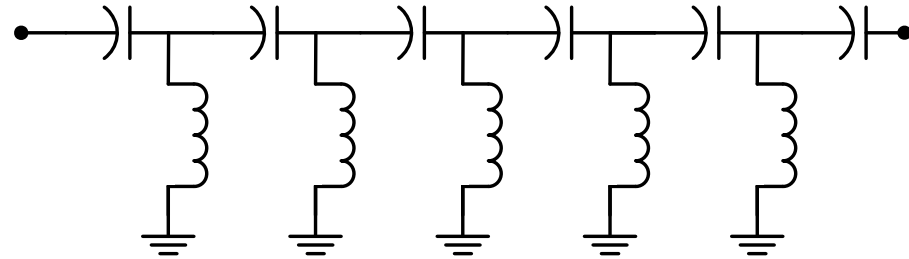
V.G. Veselago, *Soviet Physics Uspekhi* 10, 1968

# Quel motif élémentaire pour une réponse magnétique des métamatériaux ?



→ **L. Brillouin**, “Wave Propagation in Periodic Structures: Electric Filters and Crystal Lattices”, Mc Graw Hill, 1946

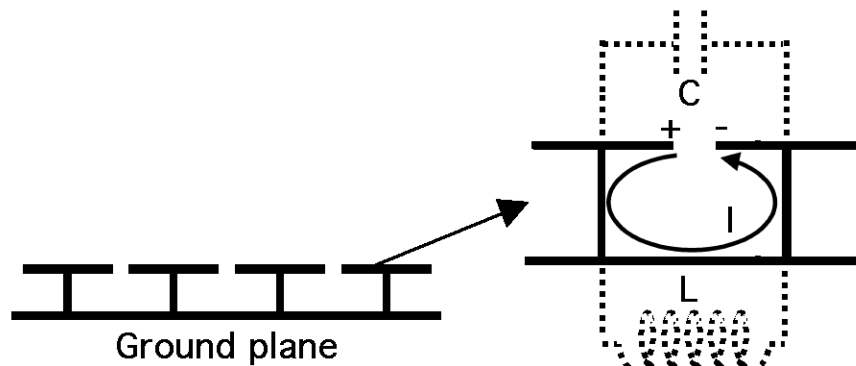
→ **J. R. Pierce**, Bell Labs, “Traveling-Wave Tubes”, D. Van Nostrand Company, 1950



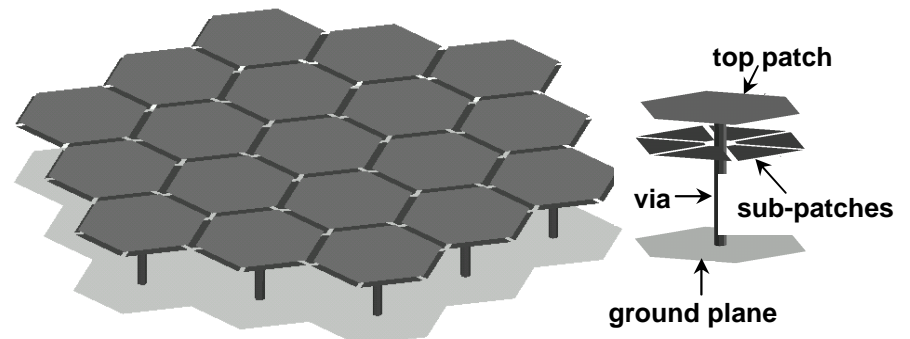
$$\mathbf{V}_\phi \cdot \mathbf{V}_g < 0$$

## Exploiter des motifs métalliques avec une résonance LC

→ **D. Sievenpiper**, “High impedance electromagnetic surfaces”, PhD 1999



→ **C. Caloz et al.**, “Transmission line approach of left-handed ...”, IEEE Trans. Antennas 2004

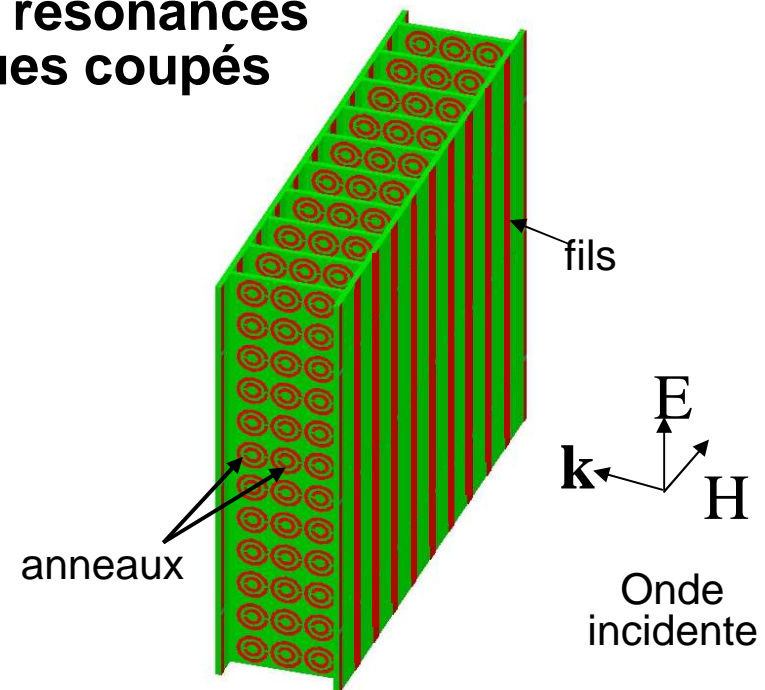
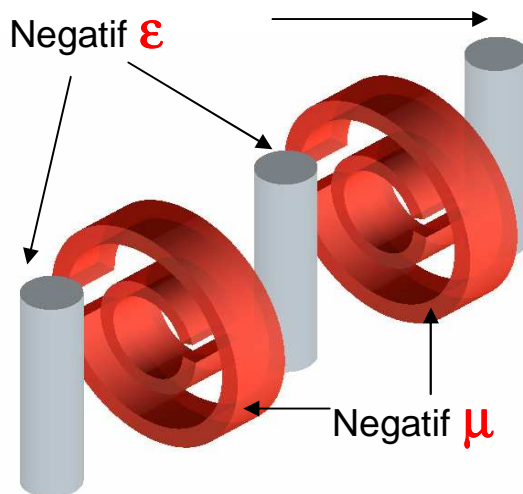


# Quel motif élémentaire pour des métamatériaux à main gauche (à réfraction négative) ?



- J.B Pendry et al., “Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures (wire arrays)”, Phys. Rev. Lett. 76, 1996 ( $\epsilon < 0$ )
- J.B Pendry et al., “Magnetism from conductors and enhanced non linear phenomena”, IEEE Tran Microw Theory 47, 1999 ( $\mu < 0$ )
- D.R. Smith, N. Kroll, “**Negative Refractive Index** in Left-Handed Materials”, Phys. Rev. Lett. 85, p. 2933, 2000

**Combiner des réseaux de fils avec des résonances LC de résonateurs à anneaux métalliques coupés**

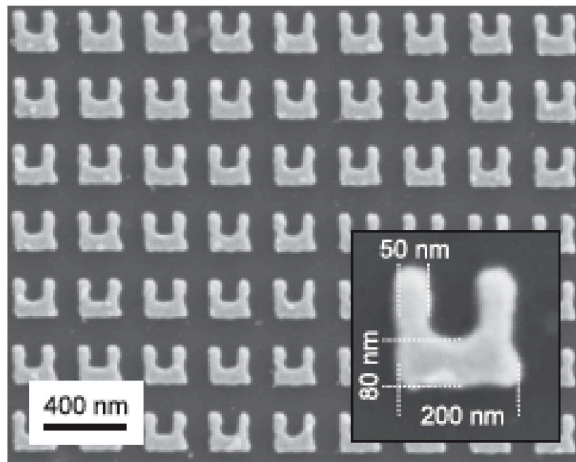


# Récents progrès dans les métamatériaux aux longueurs d'onde de l'optique



- Milieux nanostructurés présentant une réponse magnétique ( $\mu \neq 1$ ) aux longueurs d'onde des télécom. ou du

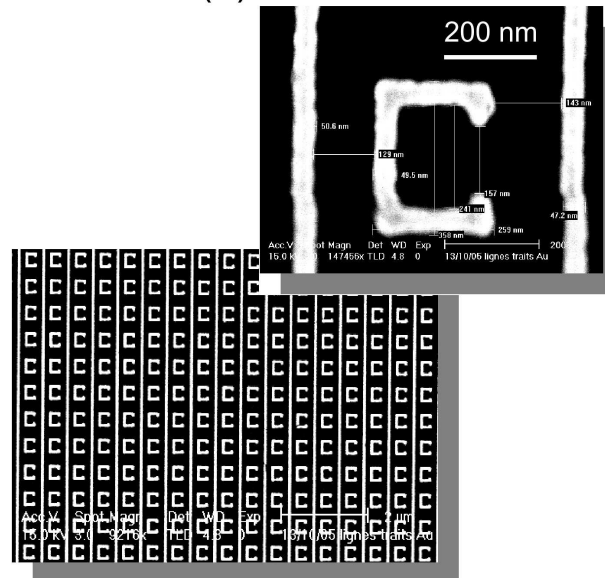
(a)



$\mu < 0$  pour une incidence oblique!

C. Enkrich *et al.*, *PRL* 95, p. 203901, 2005

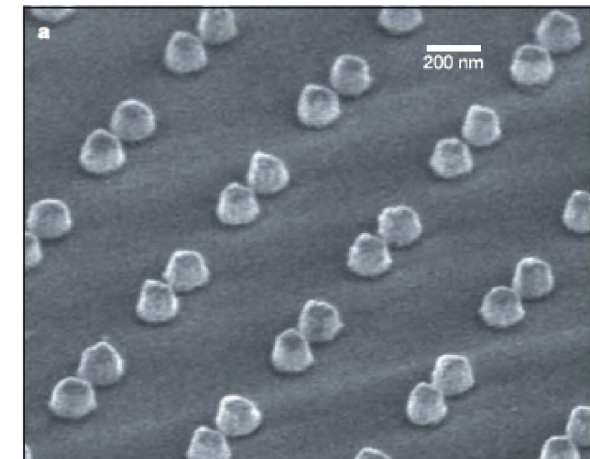
(b)



$\epsilon$  et  $\mu < 0$  pour une incidence normale!

F. Gadot *et al.*, *J. Opt. Quant.*, à paraître en 2007  
(cette conférence)

(c)



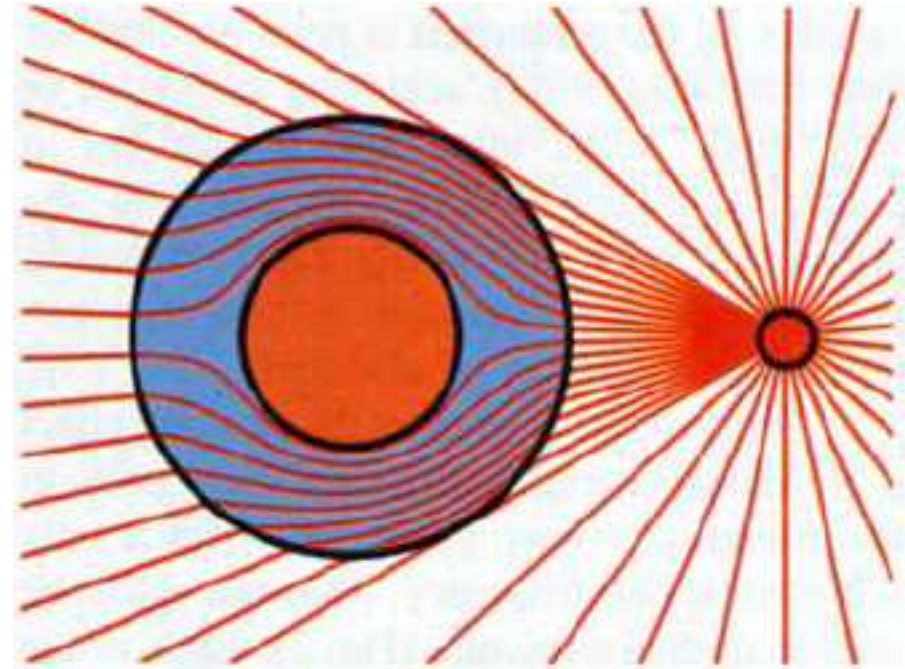
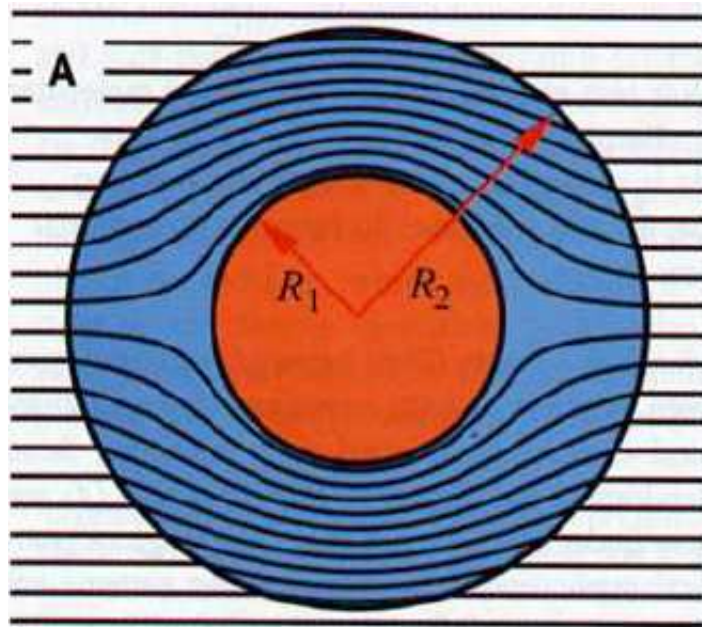
$\mu < 0$  pour une incidence normale!

A.N. Grigorenko *et al.*, *Nature* 438, p.2933, 2005

# Invisibilité



- Conformation des chemins optiques autour d'objets "masqués" électromagnétiquement

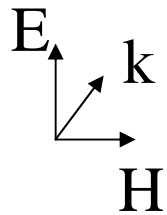
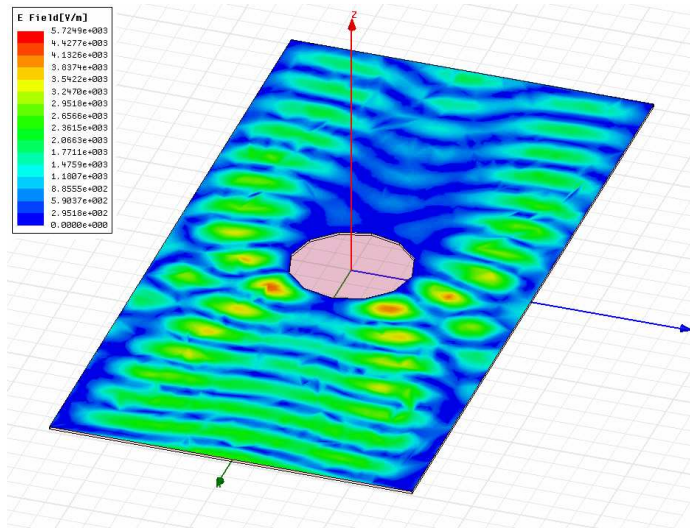


Trajectoires autour d'une sphère masquée (en rouge) avec le matériau de masquage (en bleu).  $[\epsilon(x,y,z), \mu(x,y,z)]$  est choisi pour expulser le champ de la sphère intérieure. À gauche : onde plane incidente. À droite : illumination par une source ponctuelle

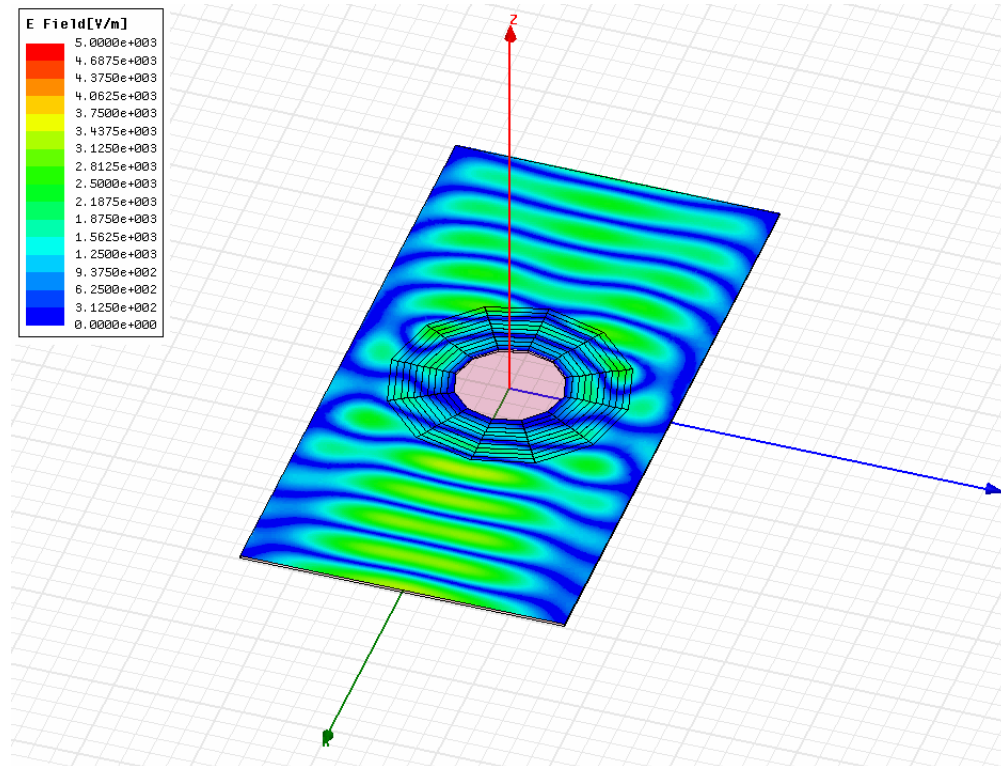
# Invisibilité



## Objet non masqué



## Objet masqué grâce à un métamatériau



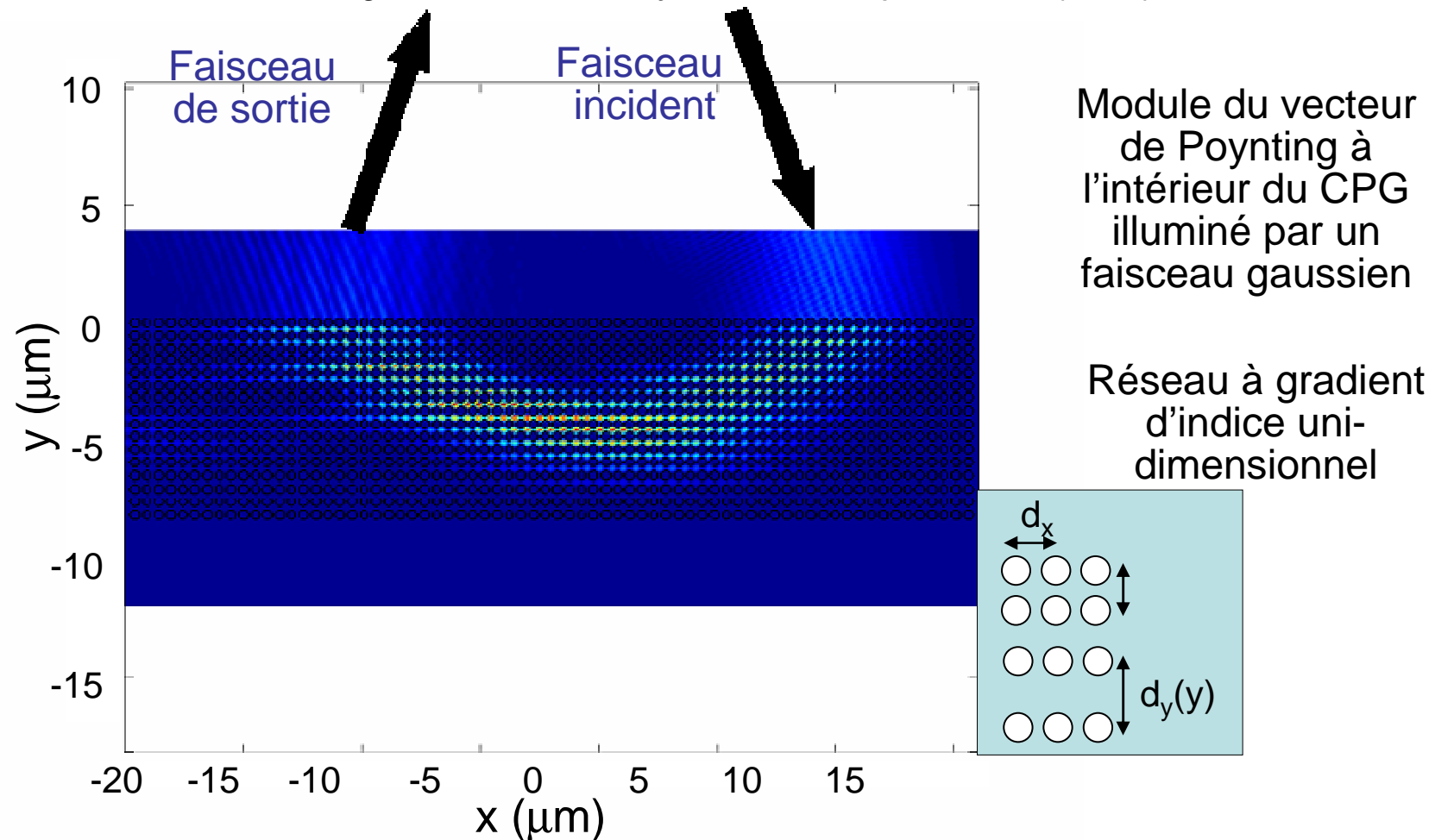
Modélisation : B. Kante *et al.*, *IEF Orsay*, 2007



# Les cristaux photoniques graduels (CPG) peuvent créer des mirages optiques



E. Centeno, D. Cassagne, J-P. Albert, *Phys. Rev. B* 73, p. 235119, (2006)



→ Démonstration expérimentale à l'IEF dans le régime micro-onde (E. Akmansoy et al. 2006)

# Conclusion et perspectives



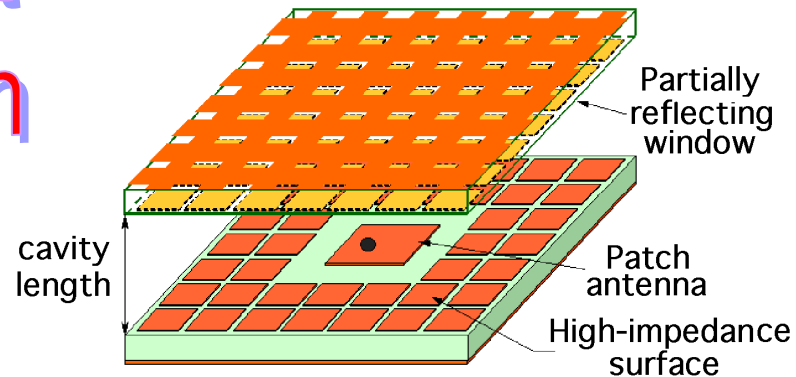
2007 et  
demain

- De nouveaux schémas expérimentaux avec des *cavités de taille ultime* dans les semiconducteurs
- De nouvelles directions à explorer plus en avant :  
*Les composants à « lumière lente »* (ex: le laser Raman en silicium, les lasers à cascade quantique)
- *Les nouveaux effets* (l'imagerie à très haute résolution, l'invisibilité, l'optique non réciproque (*la magnéto-photonique*)...)
- Extension à tous les types d'onde (*la phononique*), ...
- La plasmonique : *l'optique sub- $\lambda$  ... jusqu'au niveau du transistor*

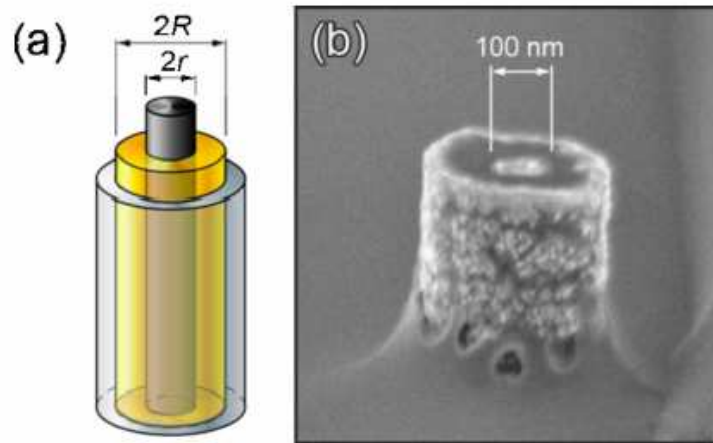
# Des RF à l'optique et de l'optique aux RF



2007 et  
demain



A. Ourir, A. De Lustrac, J-M. Lourtioz,  
*APL*, 88, p.084103, 2006  
**“subwavelength cavities  
( $\lambda/60$ ) for ultra-thin antennas”**



J.Rybczynski *et al.*, *APL* 90, p.  
2021104, 2006  
**“subwavelength waveguide  
for visible light”**

FIG. 1. (Color online) Schematic of a coaxial cable (a) and SEM image of a nanocoax (b).

# Remerciements



## IEF

André De LUSTRAC  
Xavier CHECOURY  
Anatole LUPU  
Frederique GADOT  
Eric AKMANSOY  
Philippe BOUCAUD  
Sylvain DAVID  
S.N. BUROKUR  
Abdelwaheb OURIR  
Boubakar KANTE  
Philippe GOGOL  
Mathias VANWOLLEGHEM  
Pierre BEAUVILLAIN  
Eric CASSAN

...



## PhC Book

(Springer, April 2005)

Henri BENISTY (IOTA)  
Daniel MAYSTRE (IF)  
Alexei CHELNOKOV (CEA-LETI)  
Jean-Michel GÉRARD (CEA-CNRS)  
Vincent BERGER (Univ. Paris VII)

## Collaborations

Guang-Hua DUAN (Alcatel)  
Françoise LOZES (LAAS)  
Anne TALNEAU (LPN)  
David CASSAGNE (GES)  
COST P11  
METAMORPHOSE  
(Alcatel, Univ. Würzburg,  
EPFL, CNRS, Glasgow, ... )

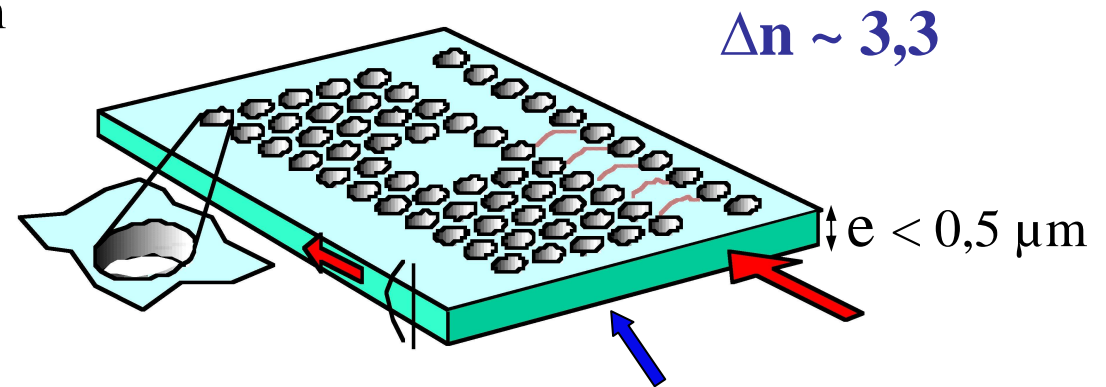
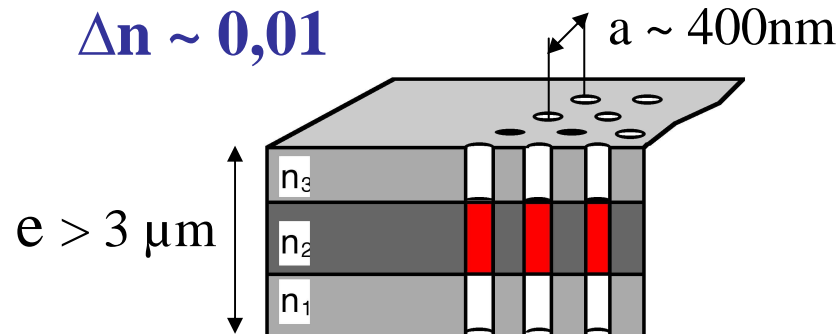
...

# Cristaux photoniques 2D, quel confinement dans la direction verticale ?



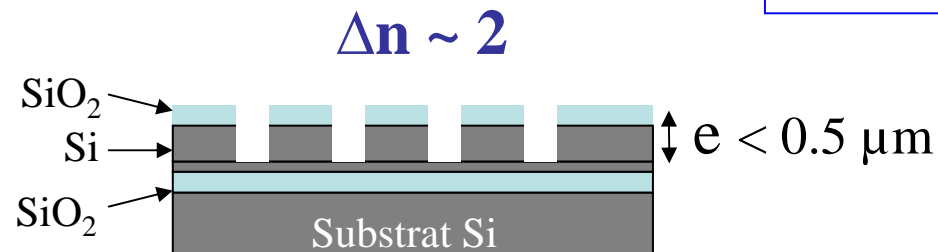
Faible contraste d'indice vertical  
le guide d'onde planaire «enterré»

Fort contraste d'indice vertical  
le guide d'onde membranaire



La voie standard  
de l'optoélectronique

Résultats impressionnants  
sur les composants à haut  
facteur de qualité



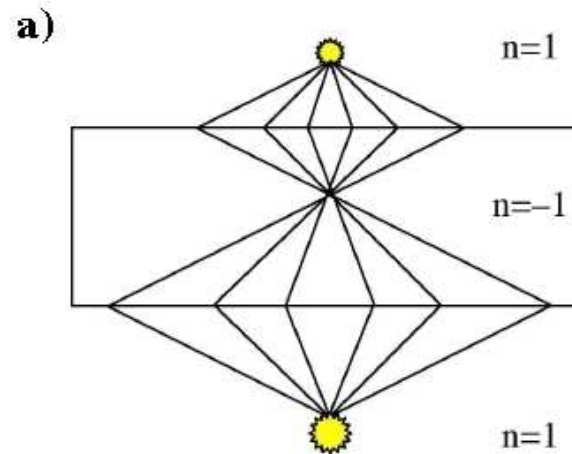
Nanophotonique sur SOI (silicium sur isolant)

# Applications de la réfraction négative à l'imagerie: la superlentille

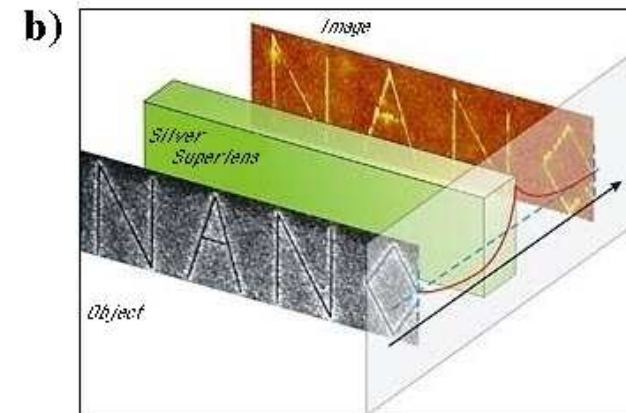


## • Systèmes de focalisation à haute résolution

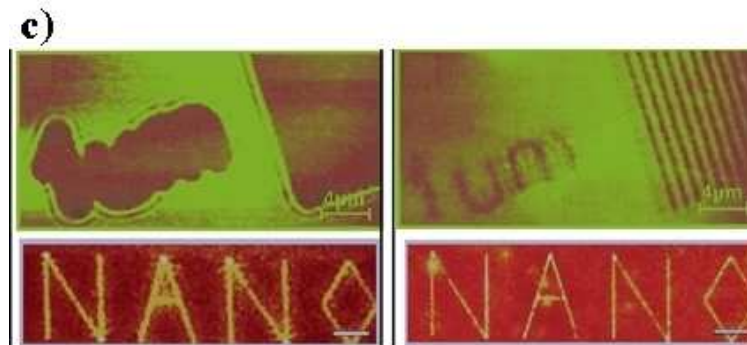
a) Schéma de superlentille



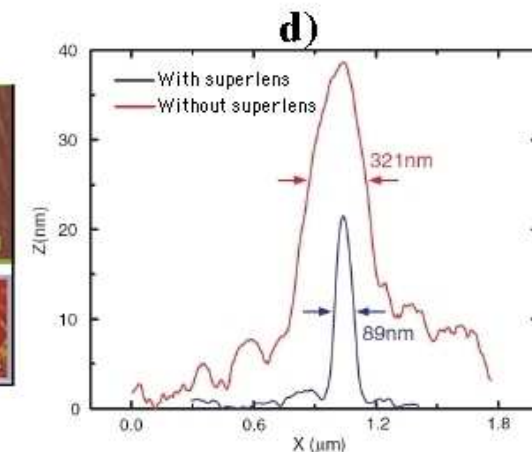
b) Superlentille formée d'une lame d'argent située entre les plans objet et image



c) A gauche: image obtenue avec une lentille classique - A droite: image améliorée obtenue avec la superlentille



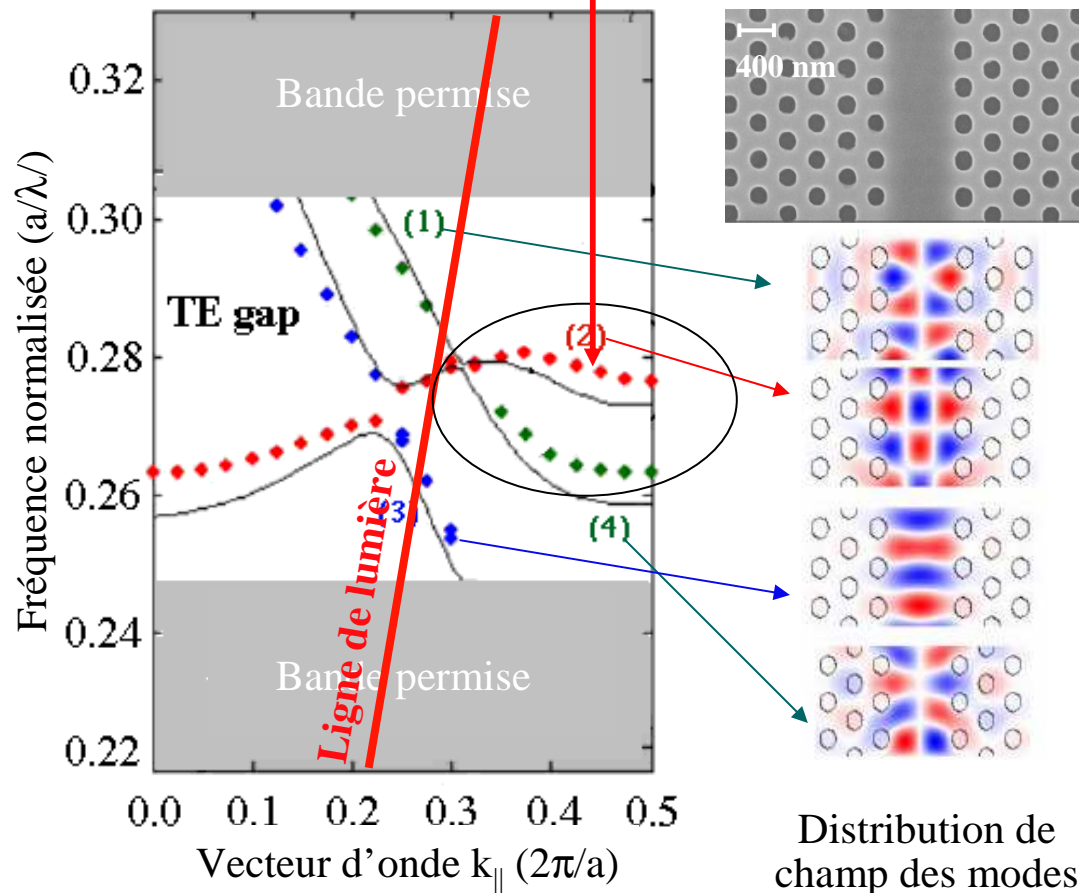
d) Résolutions comparées des deux lentilles



# Microguides à cristal photonique 2D sur membrane ou substrat SOI

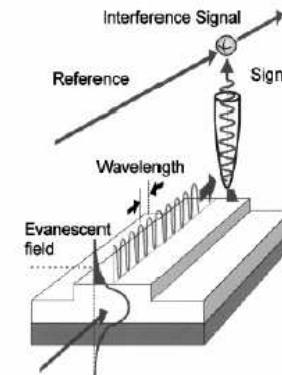
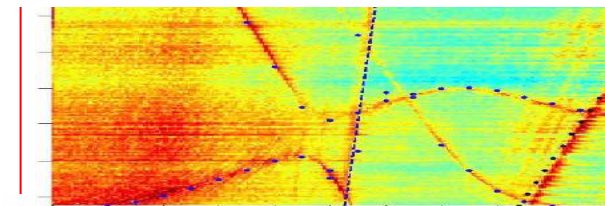


faible vitesse de groupe ( $\sim c/100$ ) : interactions lumière-matière renforcées



## Structure de bande obtenue à partir de mesures PSNOM

M.D. Settle, ... , T. Krauss (UK)  
*Opt. Express* 15, n°1, p. 219, 2007



Reconstruction à partir de mesures de phase et d'amplitude

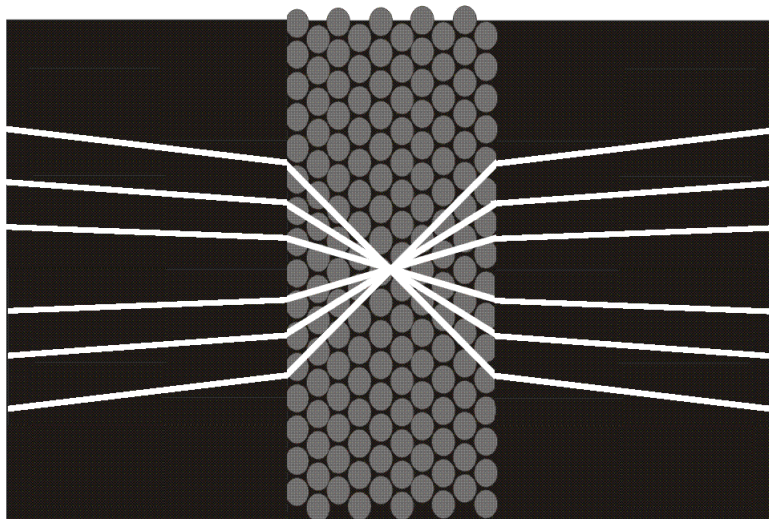
soigneusement

# Jouer avec la dispersion des cristaux photoniques : l'ultra-réfraction



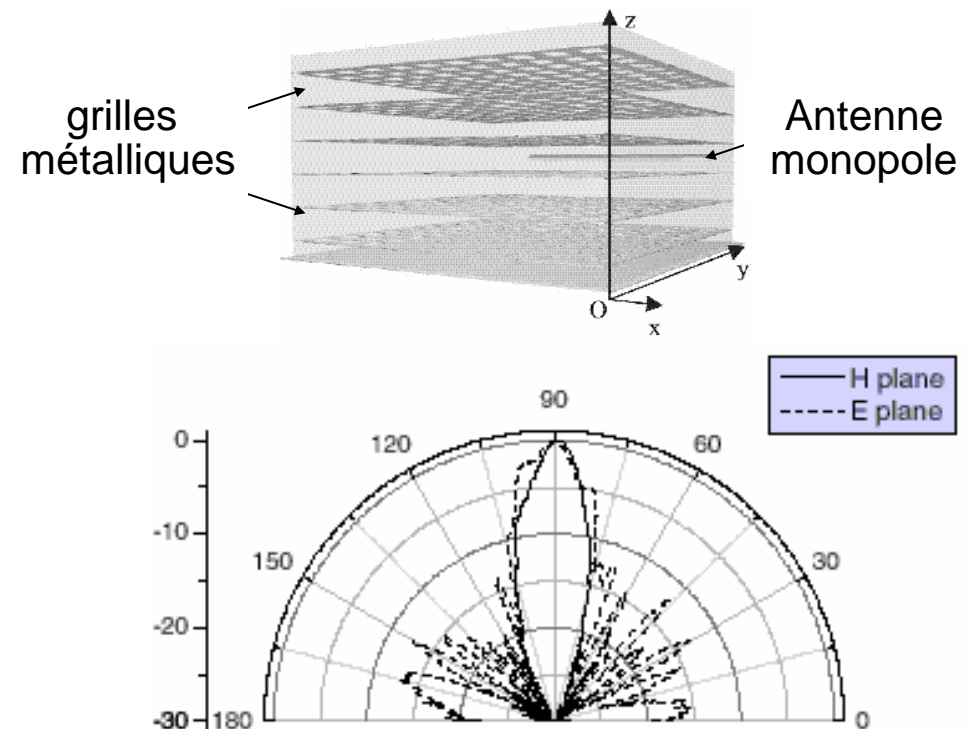
$$0 < n \ll 1$$

Source interne dans le cristal photonique :  
Faisceau de sortie  
faiblement divergent



Enoch et al., *APL* 81, p.1588, 2002

Demonstration dans le régime micro-onde

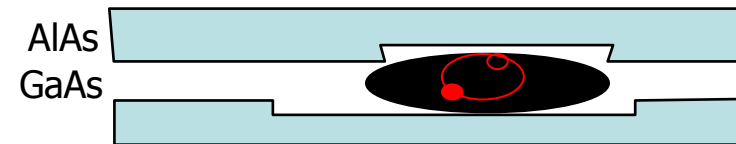
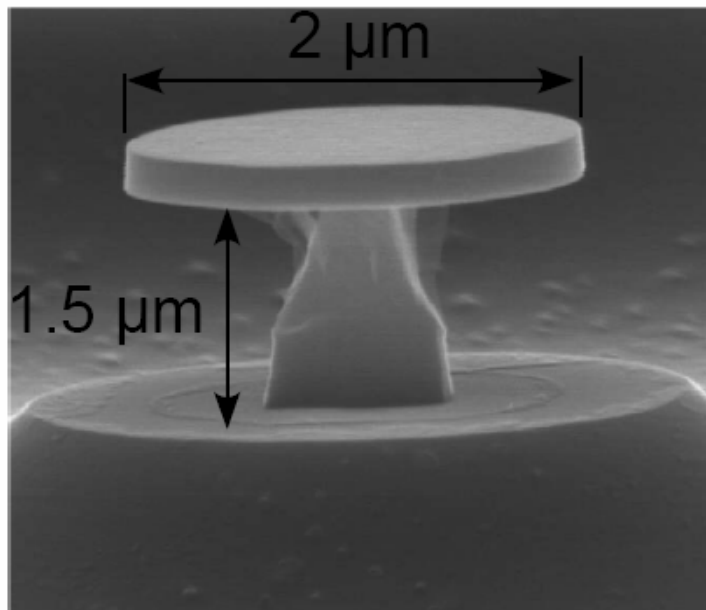




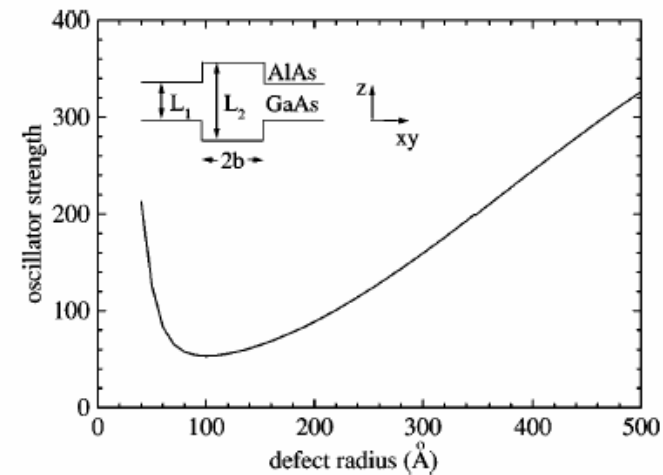
# Few GaAs QDs in a microdisk



*E. Peter et al, Phys. Rev. Lett 95, 067401(2005)*



**Giant oscillator strength** due to exciton center of mass delocalization



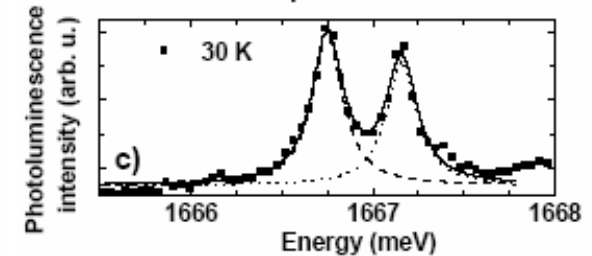
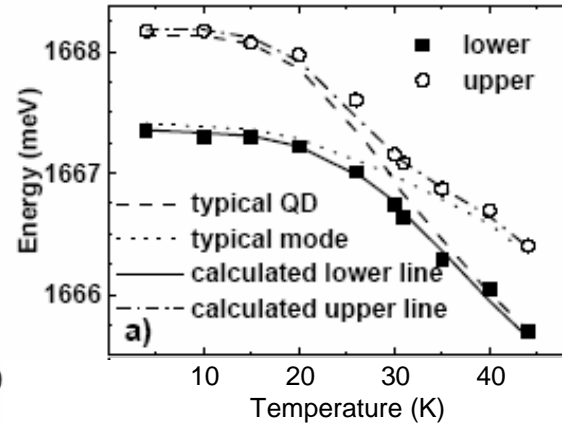
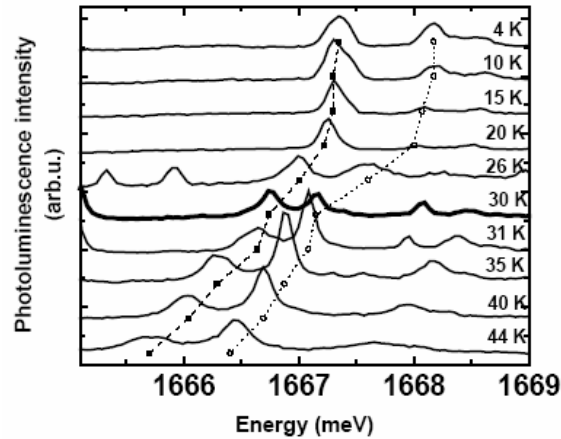
(N.B.:  $f \sim 10$  for InAs QDs)

*Proposal :LC Andreani et al, PRB 60, 13276 (1999)*

# Single GaAs QD in a microdisk (CNRS/LPN)



*E. Peter et al, PRL 95, 067401(2005)*



Clear anticrossing of the « QD line » and « cavity line »

Same linewidth at resonance

⇒ Strong coupling regime

Decoherence still strong !

Further improvement of Q necessary for cavities containing QDs

Parameters:

$$\Delta E_{\text{cav}} = 140 \mu\text{eV}$$

$$\Delta E_{\text{em}} = 280 \mu\text{eV}$$

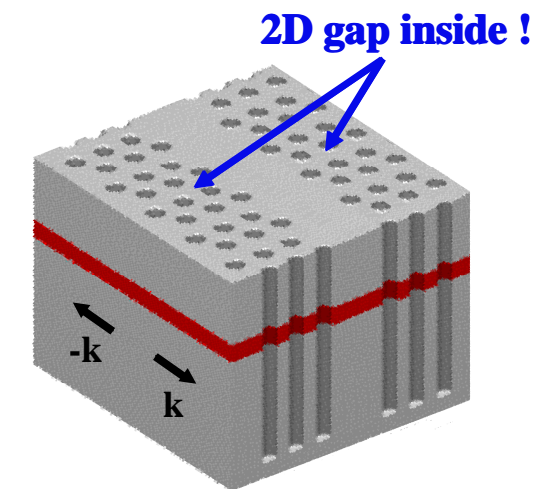
$$\Rightarrow 2\hbar\Omega = 400 \mu\text{eV}$$

$$f > 100$$

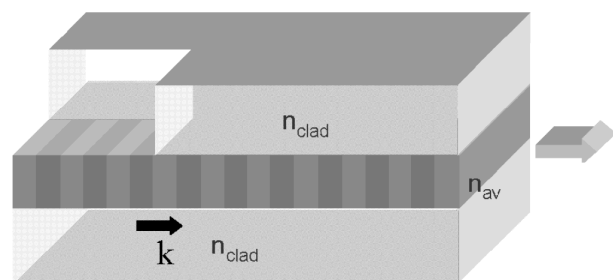


# Fundamental mode folding : Distributed Feedback (DFB) laser emission

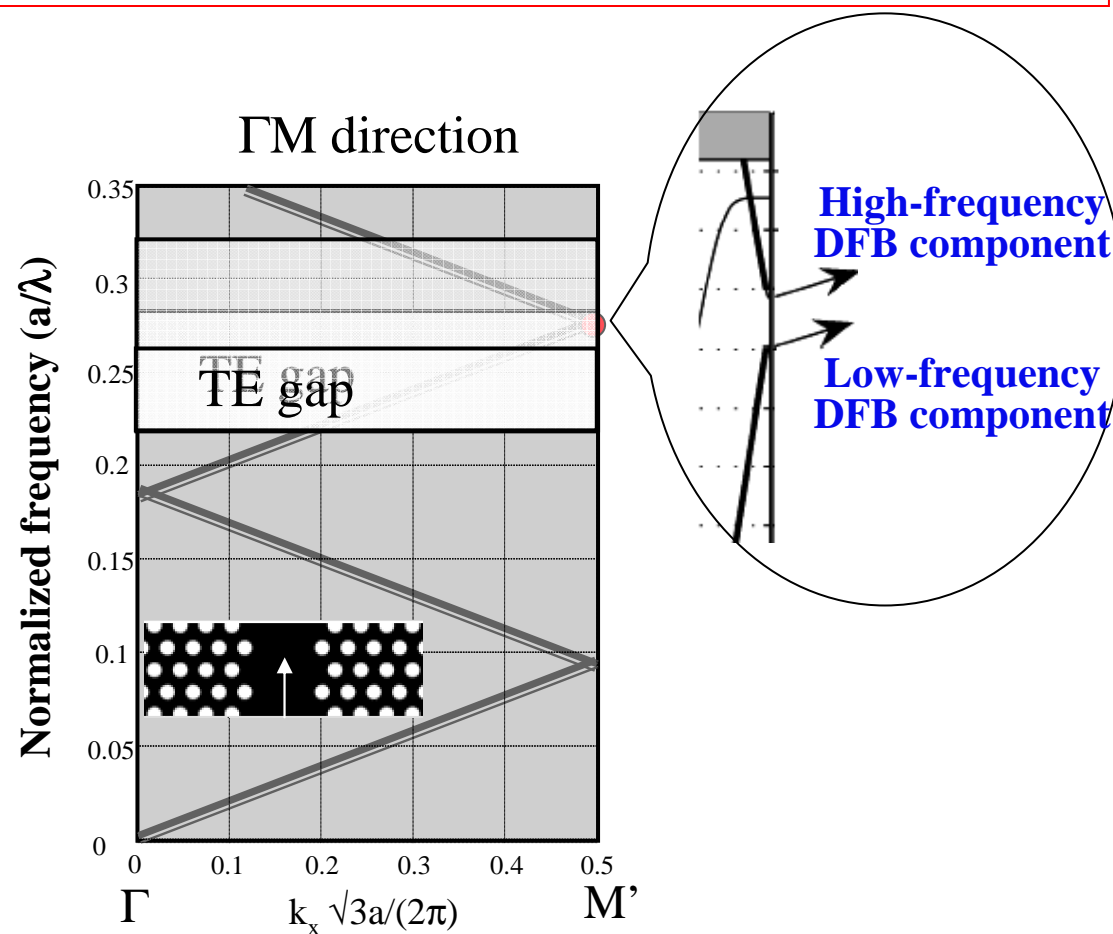
## Schematic band diagram of the triangular lattice



2D PhC «DFB like» Laser



Classical DFB Laser

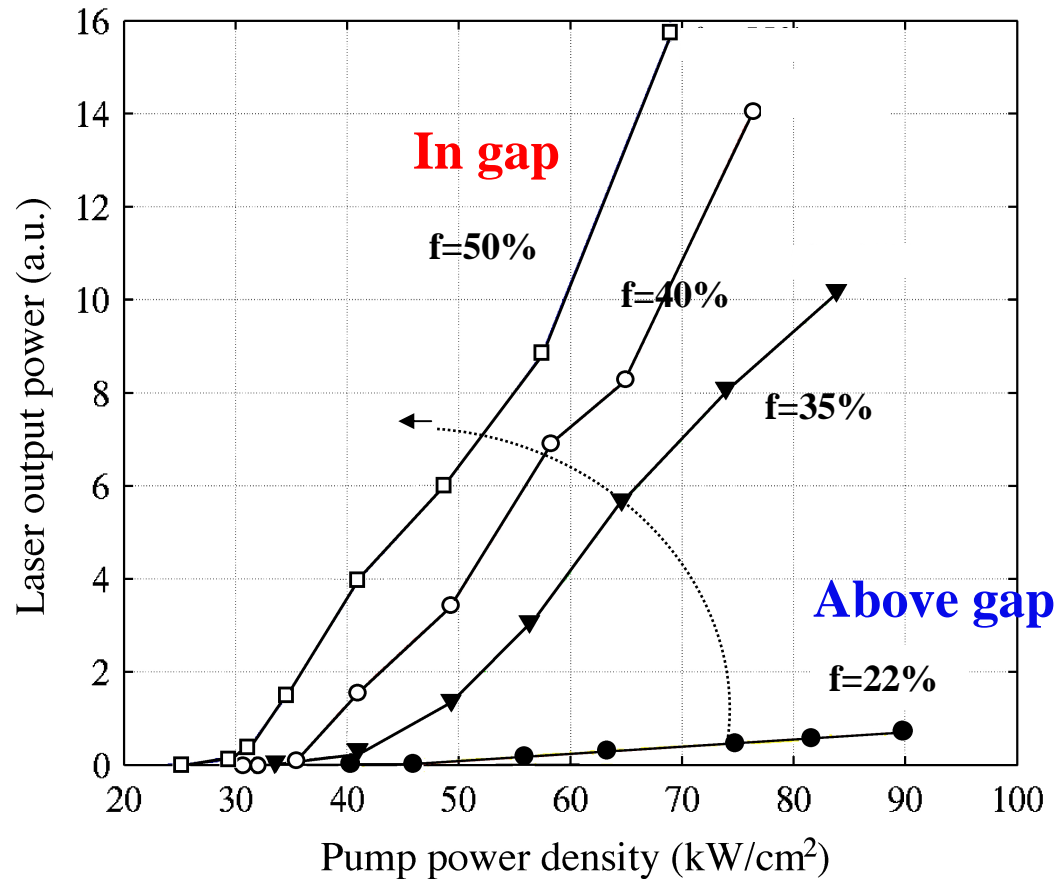


Standard hole diameter  $\sim$  30% air filling factor

# W2-3 laser at the M-point : evolution of the laser threshold and efficiency



Lasing threshold reduced by a factor  $> 2$



Laser efficiency increased by a factor of  $\sim 15$

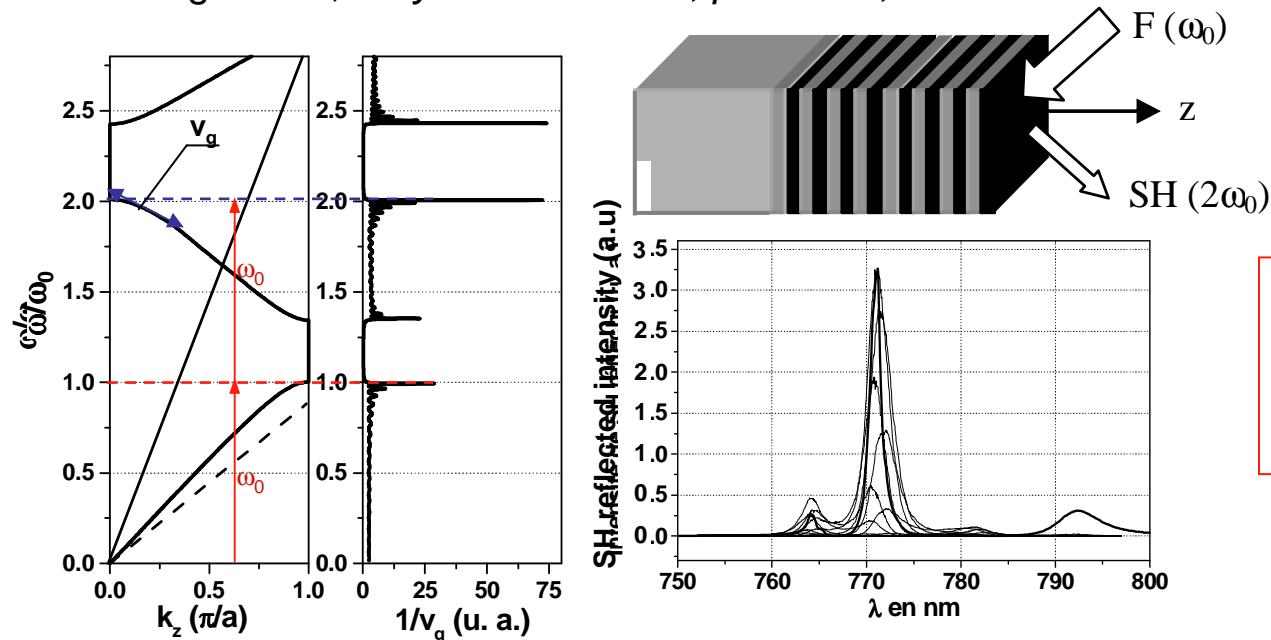
**OPERATE WAVEGUIDE PhC LASERS  
DEEPLY in TE GAP !! USE WIDE GAPS !!**

# Photonic Crystals + non-linear optics : A win-win strategy



## Second-harmonic generation in AlGaAs/AlO<sub>x</sub> 1D Photonic Crystal

Y. Dumeige et al., *Phys Rev. Lett.* 89, p.043901, 2002



$$I_{2\omega} \propto N^6$$

N, number of layers

Photonic crystals can simultaneously provide :

- phase matching ( $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_{\omega} = 0$ )
- reduction of the group velocity  $\rightarrow$  stronger non-linearities
- group velocity matching

**Extension to 2D** -->

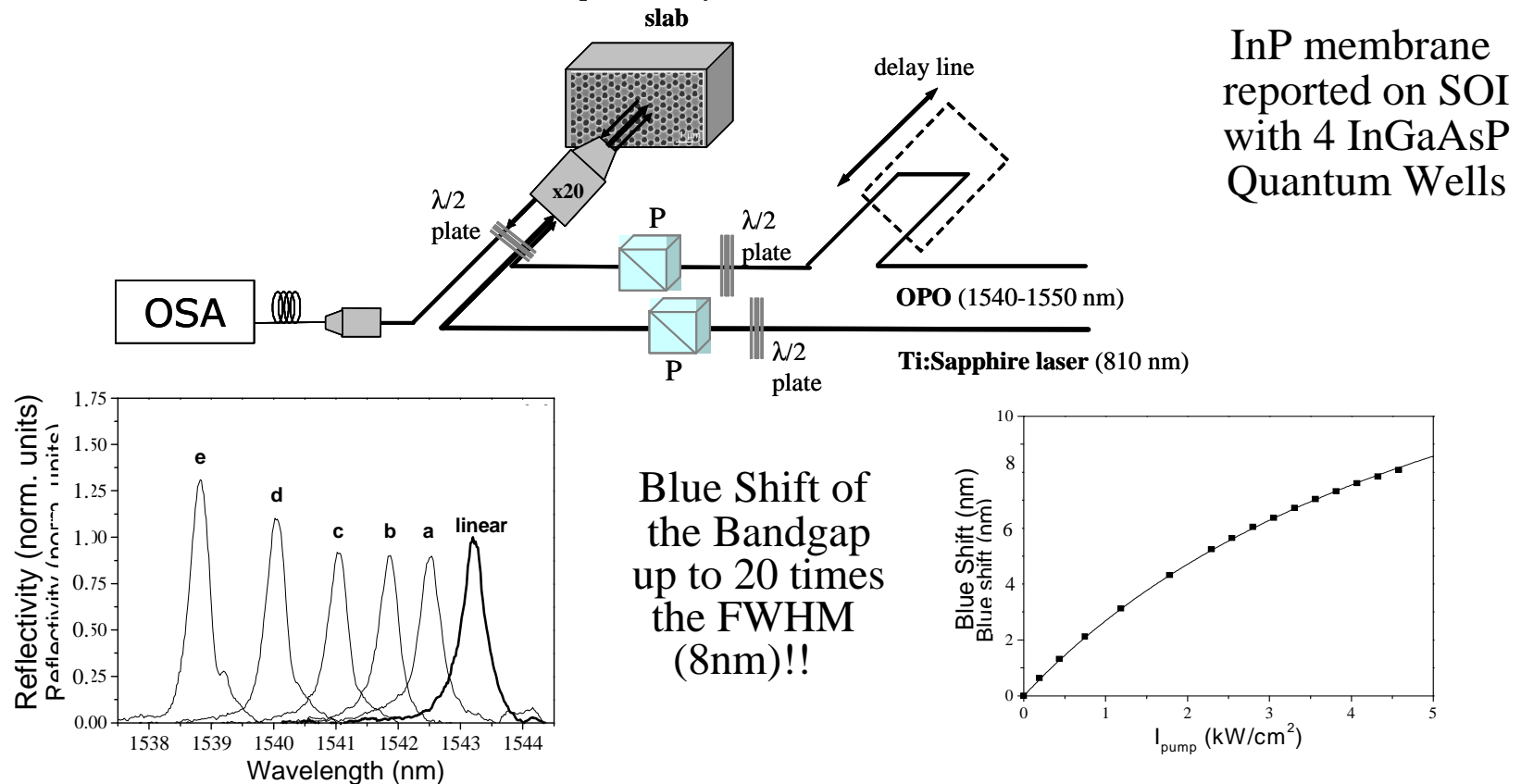
J.P. Mondia et al., *Opt. Lett.* 28, p.2500, 2003

# Photonic Crystals + non-linear optics : A win-win strategy



Reconfigurable Non-Linear Photonic Crystal → Application  
to fast Optical Switching

F. Raineri et al., *SPIE Photonics Europe*, p. 5450-81, 2004



**In-plane version on SoI -->**

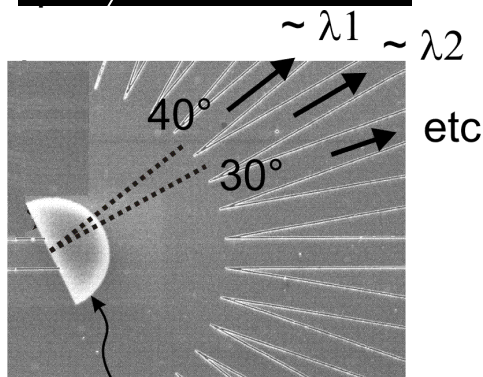
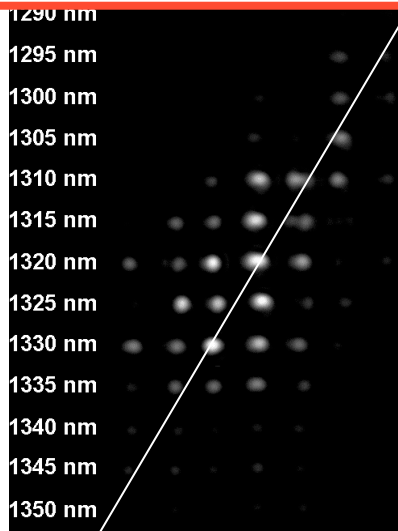
M. Notomi et al., *Opt. Express* 13, p.2678, 2005

# Superprism and spectrometer-on-a chip : (results at IEF)



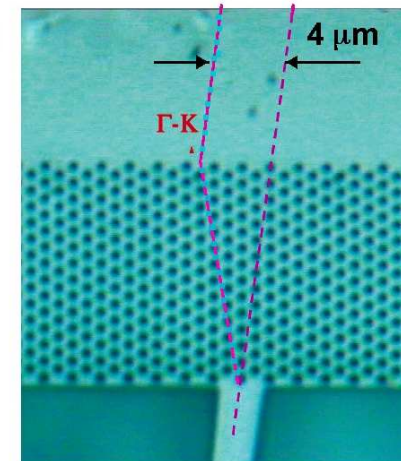
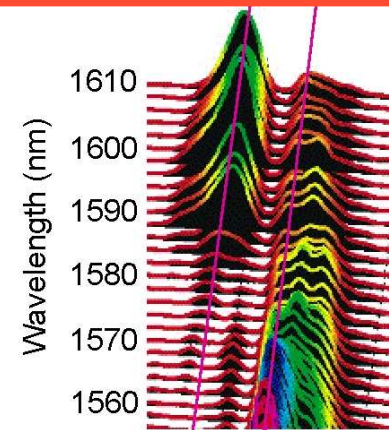
Half-circular geometry  
on SOI :  
Strong negative  
refraction  $\approx -1.3^\circ/\text{nm}$   
PhC Losses : 12 dB

E. Cassan,  
A. Lupu,  
*Opt. Express*  
12, p. 5690,  
2004



Parallel plate geometry  
on InP :  
Discontinuous refraction, an-  
gular shift of  $30^\circ$  for  $\Delta\lambda \sim 30 \text{ nm}$   
PhC Losses : 7 dB

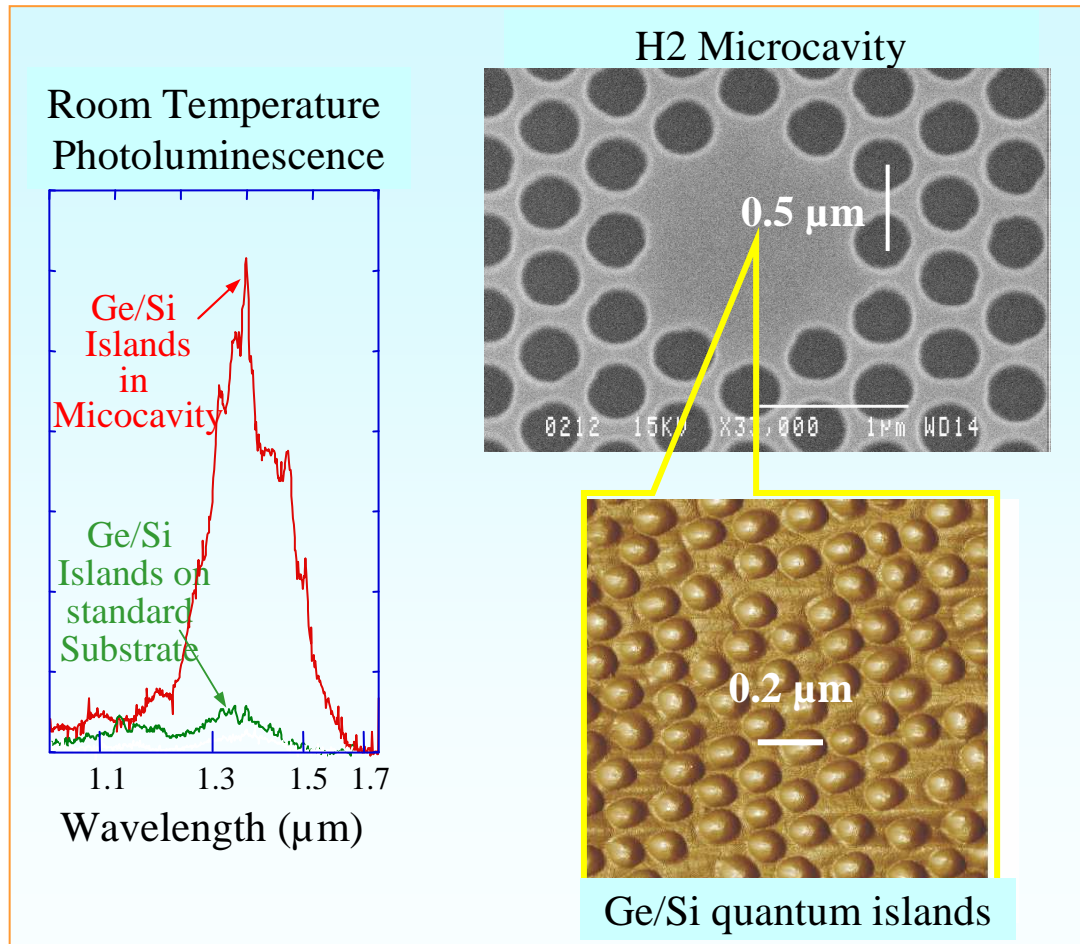
A. Lupu,  
A. de Lustrac  
*Opt. Express*  
14, p. 2003,  
2006



# PhC Light sources : Micro-emitters on silicon



## Ge/Si Quantum Islands in PhC Microcavity onSOI



S. David et al., *APL* 83,  
p. 2509, 2003

Luminescence  
Efficiency

$\times 100$

$> 0,1\%$

at  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$

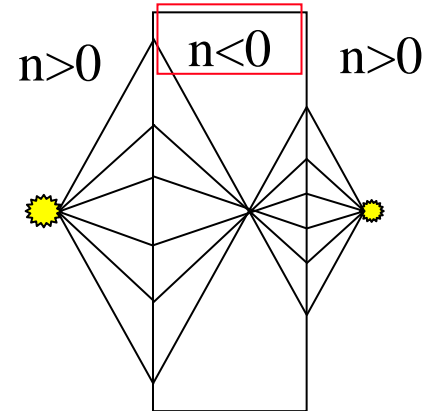


# Perfect Lens in integrated optics ?



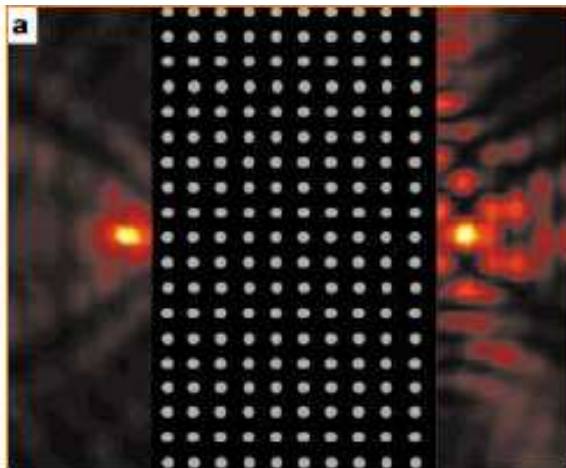
## Negative Index Material → proposal of a perfect (flat) lens

J. Pendry et al., *PRL* 85, p.3966, 2000



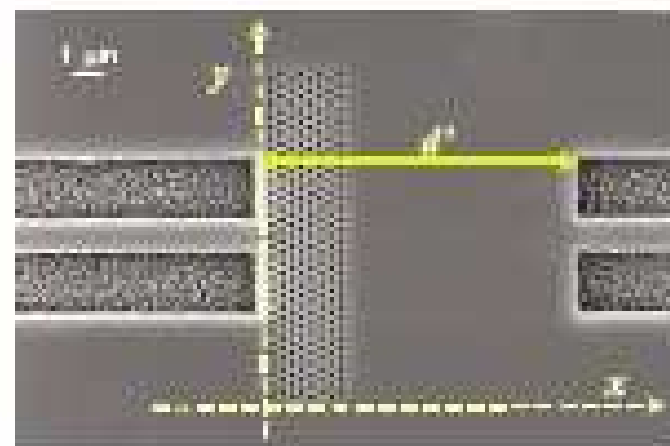
## Theoretical modeling

P.V. Parimi et al., *Nature* 426, p.404, 2003



## Experimental demonstration on InP

A. Berrier et al., *PRL* 93, 073902, 2004

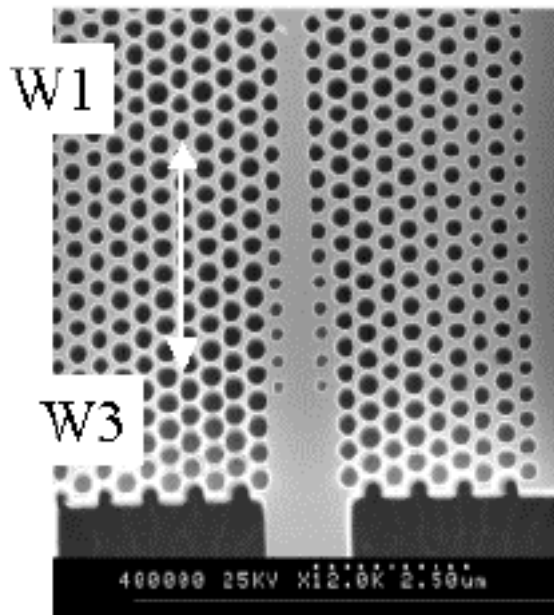


# Sharp bends in PhC waveguides



P. Lalanne et al.  
*Opt. Express* 10, p. 254, (2002)

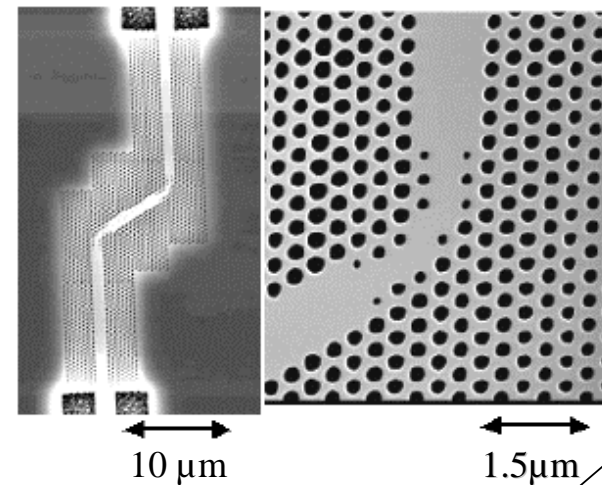
W3  $\rightarrow$  W1 converter



High transmission : 70%  
Low reflection : < 1%  
Wide spectral coverage

**Deep etch waveguides on InP**  
Use of a W3  $\leftrightarrow$  W1 converter

A. Talneau et al., *PECS V* 2004



**< 1.5 dB  
per bend**

