



SÉMINAIRE ANNUEL

Observatoire des Micro
et NanoTechnologies

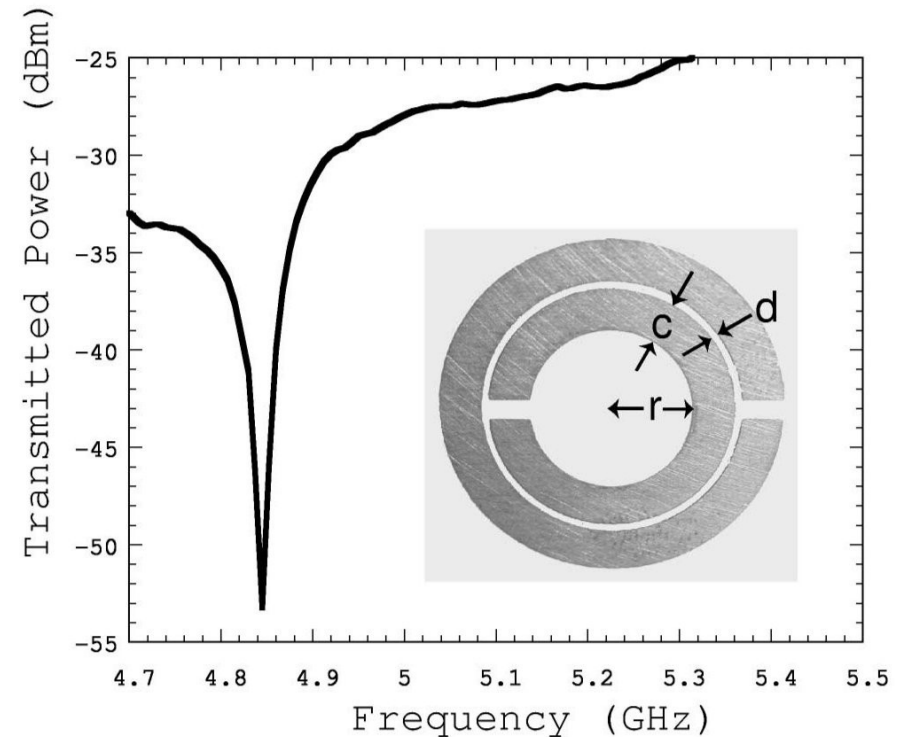
Mardi 3 février 2015
Institut Pasteur, Paris

Métasurfaces et plasmonique Vers de nouvelles applications en nanophotonique ?

Antoine Moreau – Institut Pascal
UMR CNRS/Clermont Université

Métamatériaux

- Autour de 2000
- Pionniers : John Pendry, David Smith
- Micro-ondes
- Utiliser des résonateurs métalliques très sub-longueur d'onde (modèles RLC)
- Obtention de propriétés effectives
 - Indice négatif
 - Optique transformationnelle



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

J. Pendry et al., Microwave Theory and Techniques, 47, 2075 (1999)

D. R. Smith et al., PRL 84, 4184 (2000)

J. Pendry et al., Science 312, 1780 (2006)

La marche vers le visible

■ Démonstrations expérimentales en micro-ondes

- Réfraction négative
- Cape d'invisibilité 2D

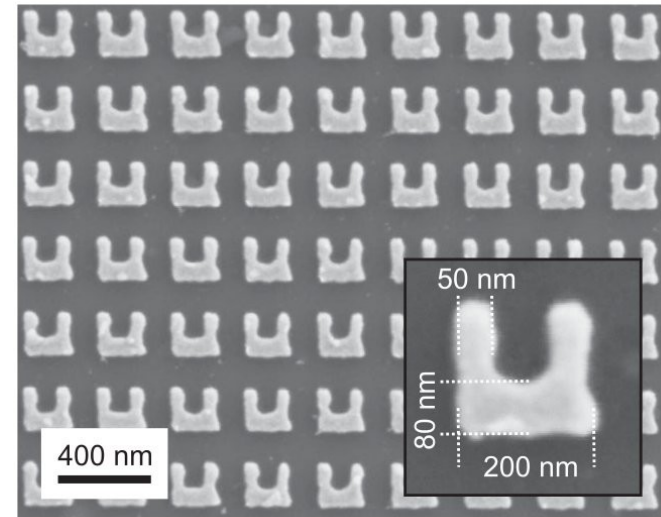
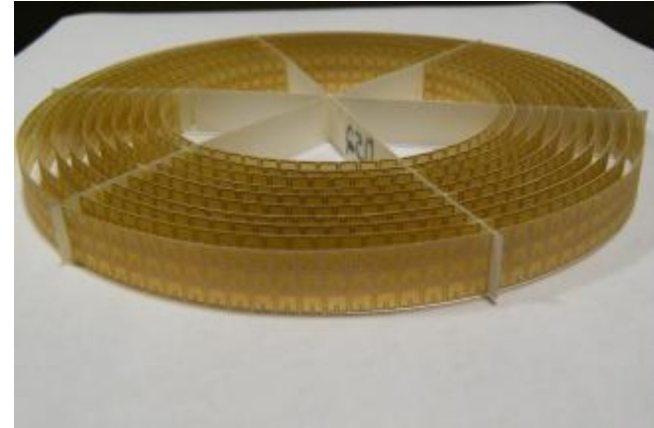
■ Résonateurs téra-hertz, infra-rouges

■ Résonateurs nanométriques

- Simplification géométrique
- Limites de la lithographie
- Limites des modèles

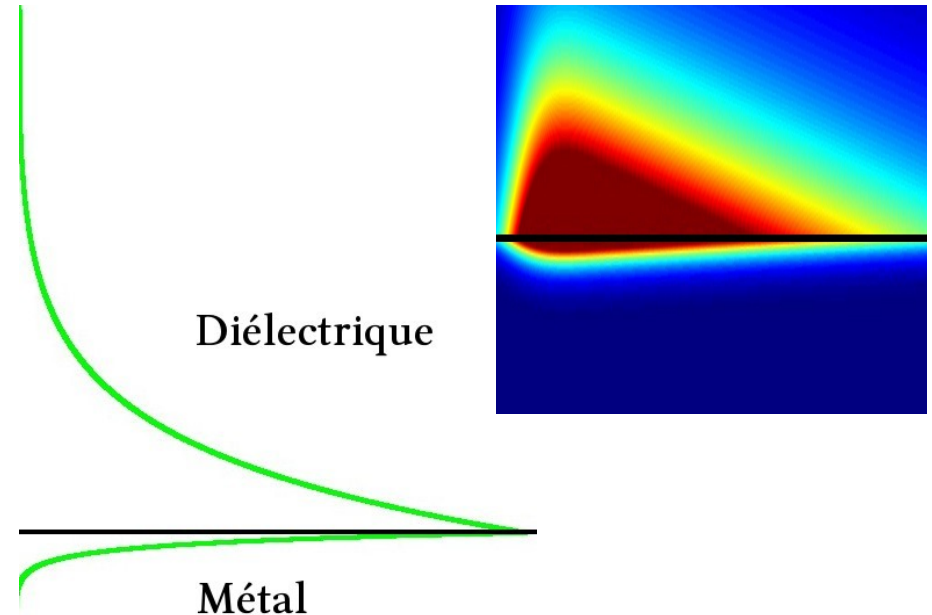
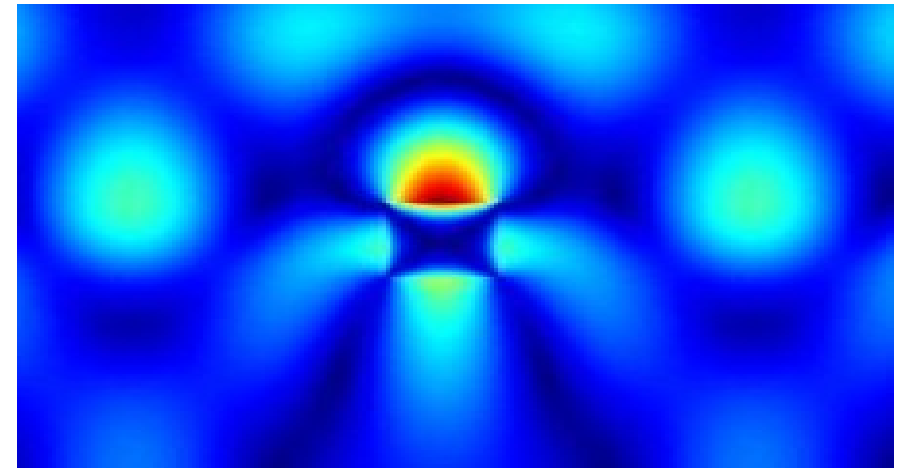
D. Schurig et al., *Science* 314, 5801 (2006)

C. Enkrich et al. *PRL* 95, 203901 (2005)



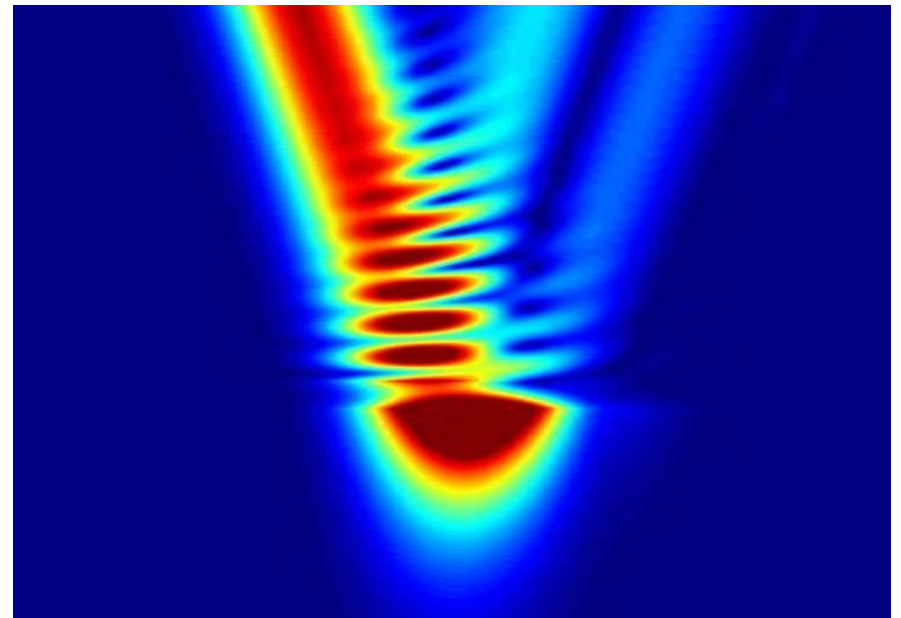
Plasmonique

- Un morceau de métal est un plasma dans une boîte
- Réponse métallique en opposition de phase
- Deux types de phénomènes
 - Résonances de nanoparticules (influence de la géométrie)
 - Modes de surface : plasmon-polariton de surface



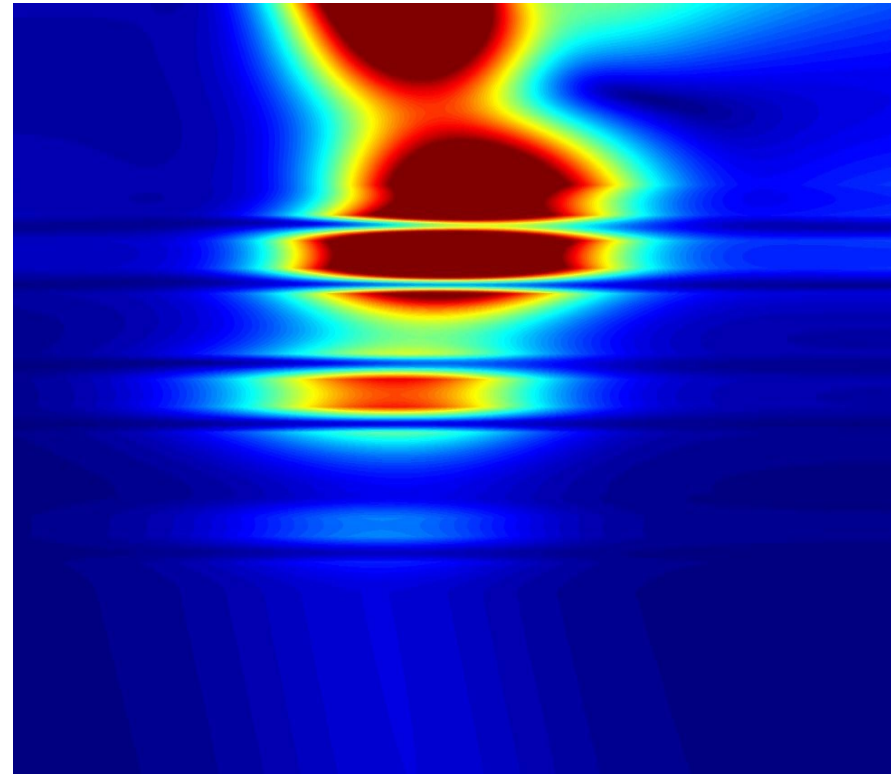
Applications de la plasmonique

- **Colorer le verre**
 - Coupe de Lycurge
 - Vitraux
- **Détection optique de molécules**
 - Résonances de nanoparticules
 - Excitation de plasmon de surface (coupleur à prisme)



Le problème des pertes

- **Fréquence de plasma 150 nm (or, argent)**
- **Transitions interbandes rendent le métal absorbant**
- **Les résonances sont très absorbantes**
- **Les structures 3D réalistes ne laissent presque pas passer la lumière !**



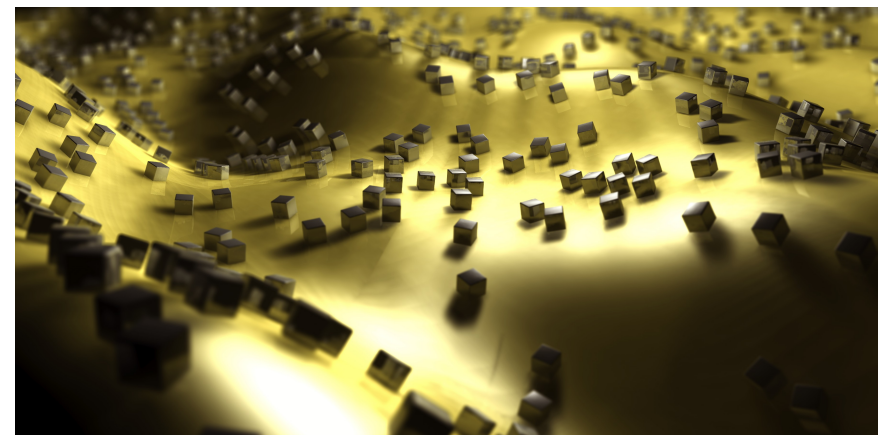
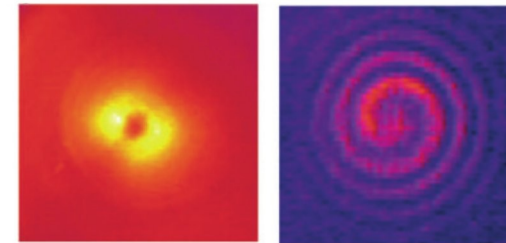
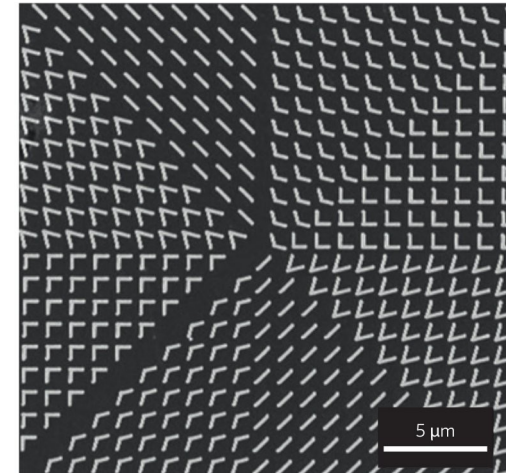
Métamatériaux micro-ondes...

- Applications actuelles
 - Invisibilité ?
 - Réfraction négative ?
- Intellectual ventures
- Kymeta (US, 20 M\$)
 - Antennes plates
 - Emission directionnelle
- Meta-imageur (US, 50 M\$)
 - Surfaces de résonateurs
 - Imagerie non-conventionnelle (compressive sensing)



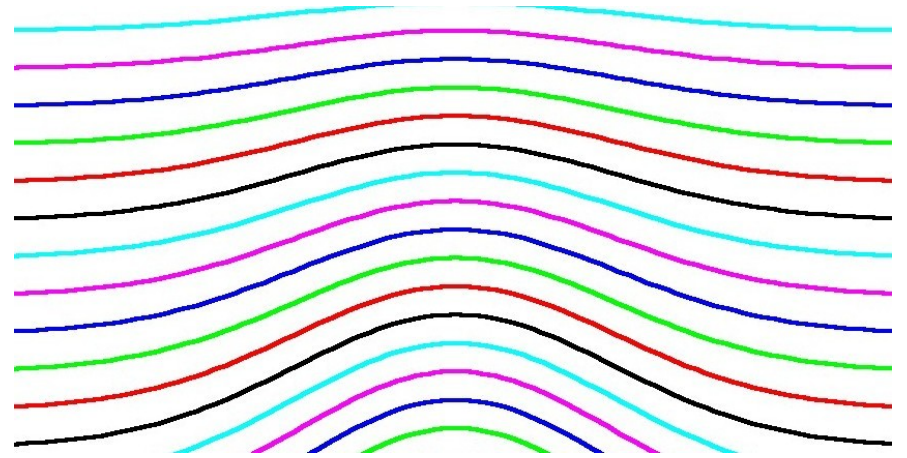
Métasurfaces

- Ensemble à deux dimensions de résonateurs
- Deux classes
 - Par transmission
 - Résonateurs « V », nano-bâtonnets
 - Nanoparticules
 - Par réflexion : antennes patch optiques
 - Résonateurs à gap-plasmons



Le contrôle de la phase

- Dans un milieu d'indice élevé la longueur d'onde raccourcit
- En sortie, l'onde présente un retard de phase
- Contrôler la phase = contrôler les fronts d'ondes
- En général, pas de contrôle de la polarisation en plus



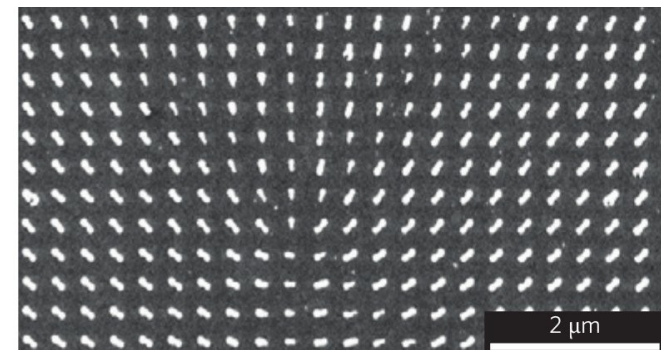
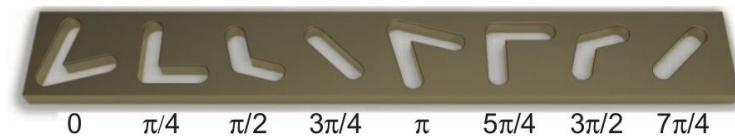
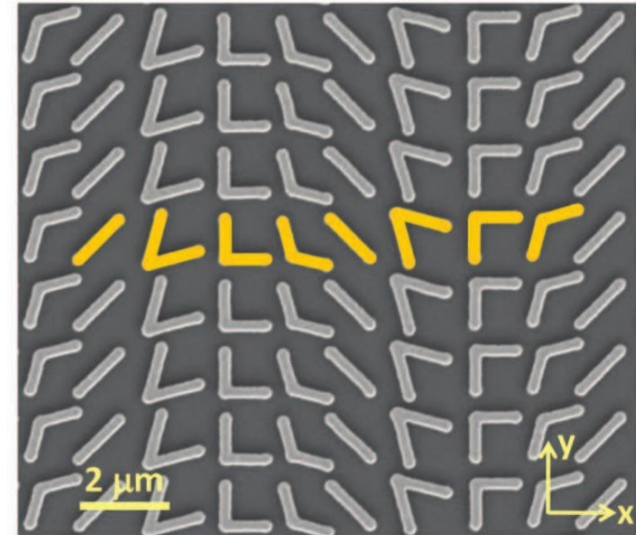
Résonateurs nanoparticulaires

- Construire un objet de phase d'épaisseur presque nulle
- Résonateurs
 - Anisotropes
 - Simples (gravure)
 - Contrôle de la résonance
- Pas besoin de résonateurs extrêmement petits / longueur d'onde
- Résonateurs complémentaires
- Nano-bâtonnets

N. Yu et al., *Science*, 334, 333 (2011)

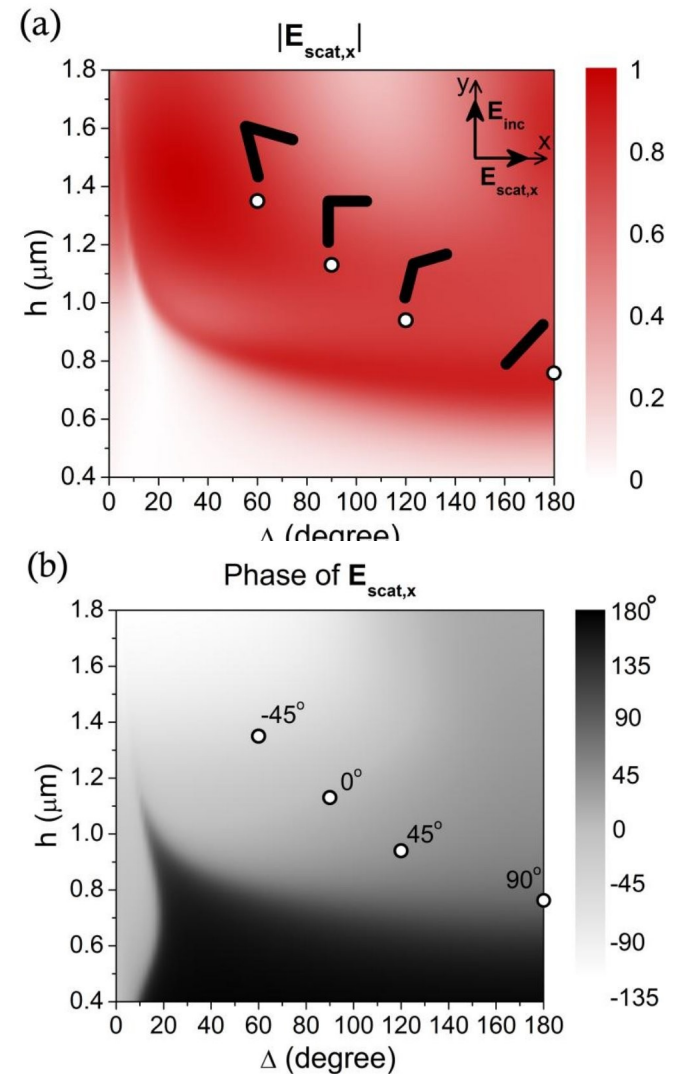
X. Ni et al., *Light : Science and Appl.*, 2, e72 (2013)

X. Chen, *Nat. Comm.* 2207 (2012)



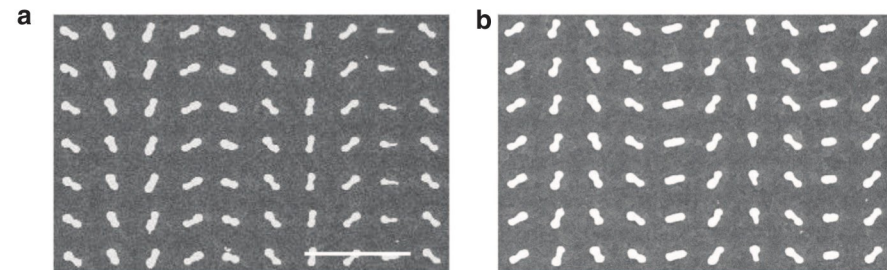
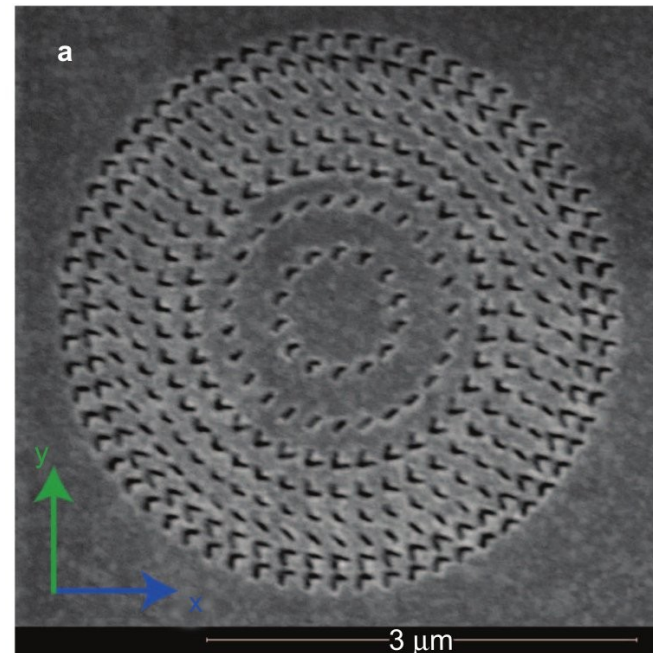
Principe de fonctionnement

- Un résonateur émet un champ déphasé par rapport à l'excitation
- La phase dépend de la proximité de la résonance
- Résonateurs en V
 - Fréquence de résonance contrôlable via l'angle
 - Phase contrôlable en sortie
- Contrôle du front d'onde



Métalentes

- Lentilles ultra-plates et de très petites dimensions
- Reproduire le déphasage introduit par l'épaisseur
- Comportements différents selon la polarisation



X. Ni et al., *Light : Science and Appl.*, 2, e72 (2013)

X. Chen, *Nat. Comm.* 4, 2207 (2012)

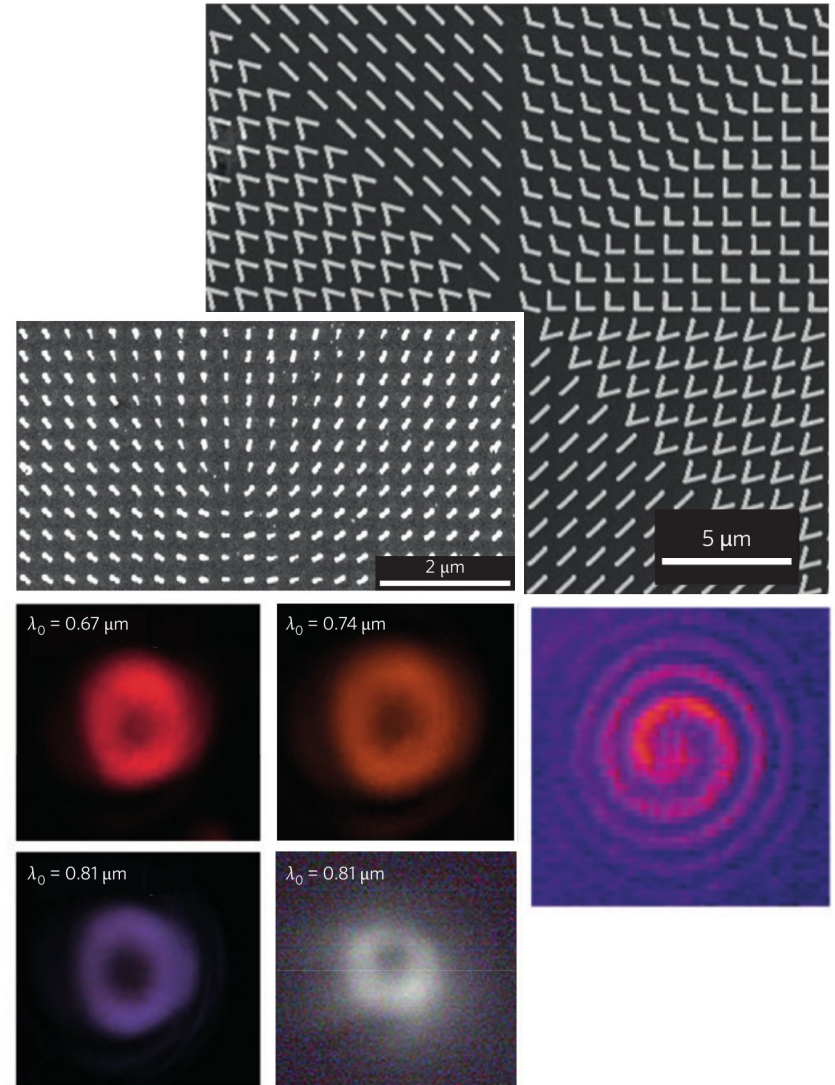
F. Aieta et al. *Nanoletters* 12, 4932 (2012)

Maîtrise spatiale de la polarisation

- **Lame 1/4 d'onde en méta-matériaux**
- **Séparer des polarisations circulaires**
- **Génération de faisceaux de type « vortex optique »**

N. Yu et al., *Nanoletters* 12, 6328 (2012)

L. Huang et al., *Nanoletters* 12, 5750 (2012)

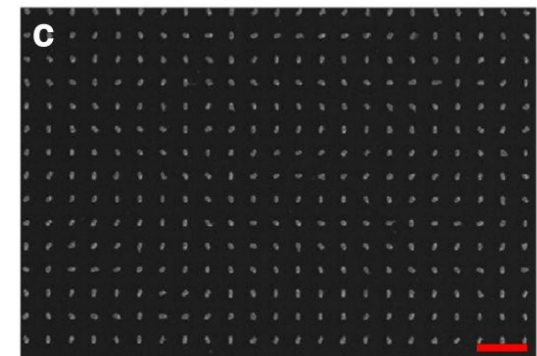
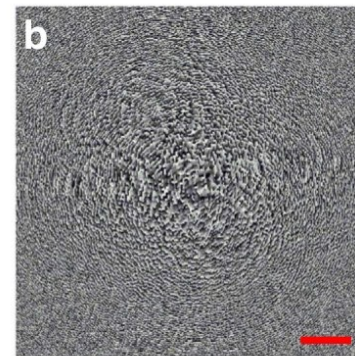
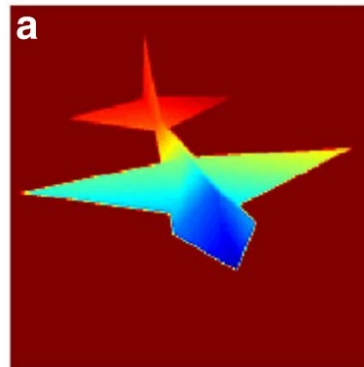
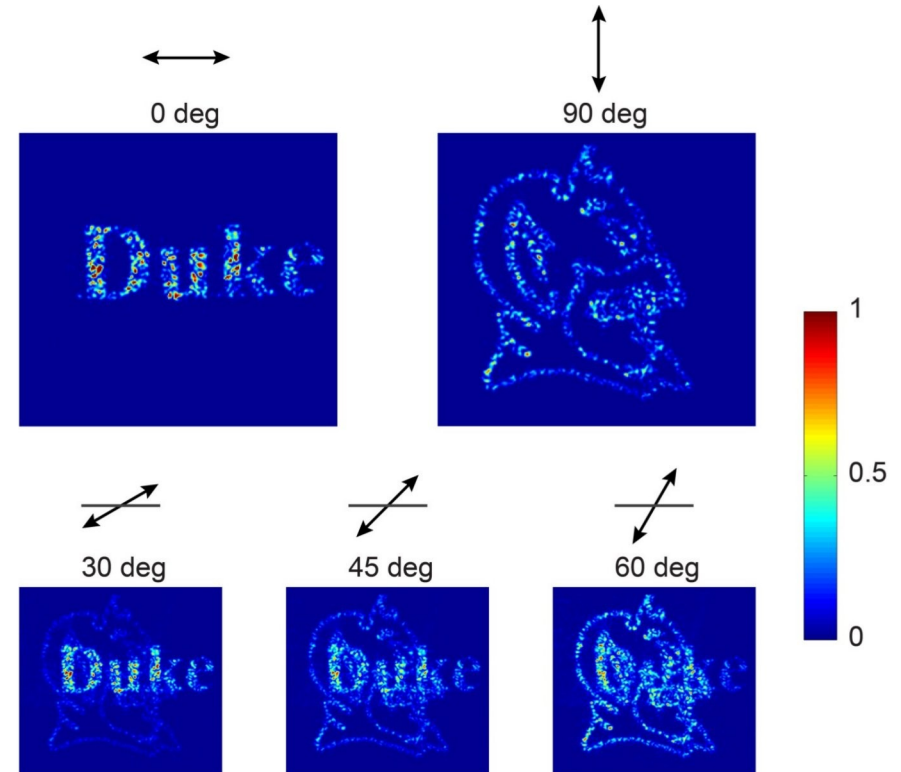


Holographie

- Démonstration du contrôle spatial ultime de du déphasage : holographie
- Fonctionnement large bande (nano-bâtonnets)
- Hologrammes dépendants de la polarisation

S. Larouche et al., *Nature Materials*, 11, 450 (2012)

L. Huang et al., *Nature Communications*, 4, 2808 (2013)



Perspectives

■ Points forts

- Structure 2D, coût relativement réduit (compétitif ?)
- Pertes limitées
- Grand degré de contrôle spatial
- Couplage phase / polarisation

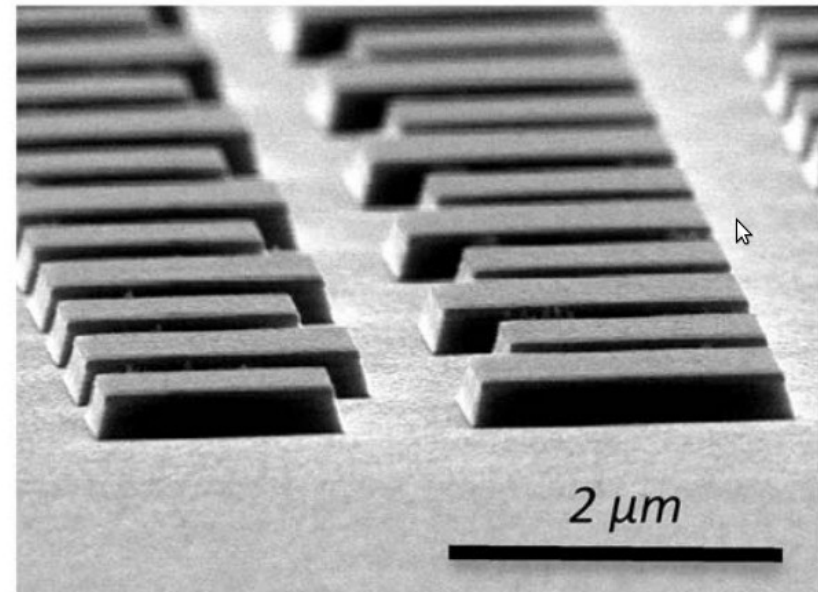
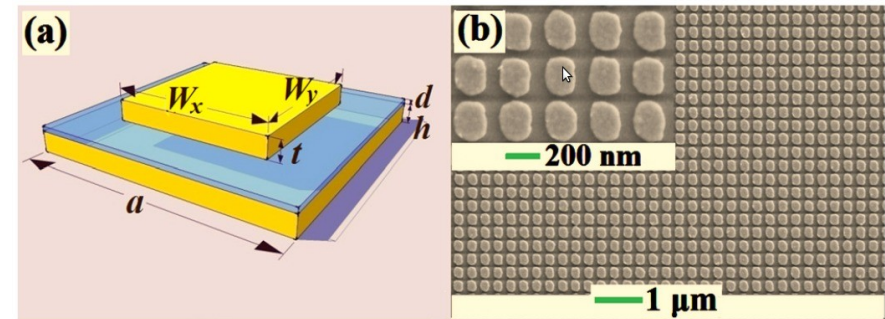
■ Points faibles

- Limites de la lithographie
- Efficacité

■ Résonateurs diélectriques

Antennes patch optiques

- Patches métalliques disposés au dessus d'une surface métallique
- Résonances différentes des résonances de particules
- Semblables aux antennes patch micro-ondes
- Avec des effets plasmoniques
- Résonateurs à gap-plasmons



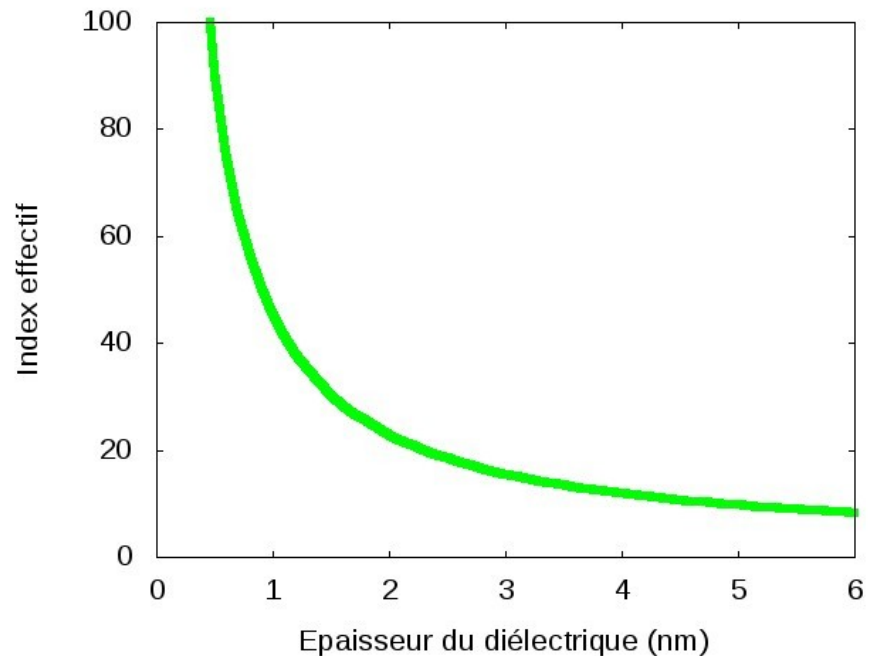
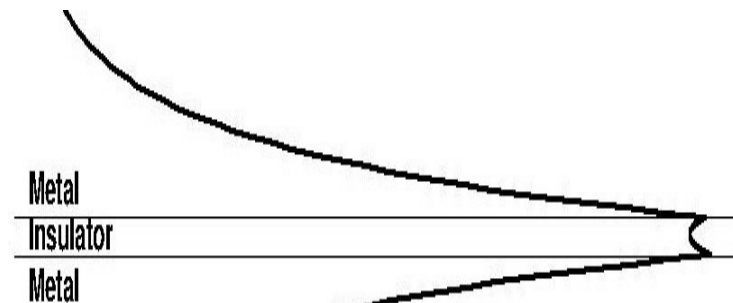
J. Hao, *Applied Physics Letters*, 96, 251104 (2010)

C. Koechlin et al. *Optics Letters* 37, 1038 (2012)

Gap-plasmon

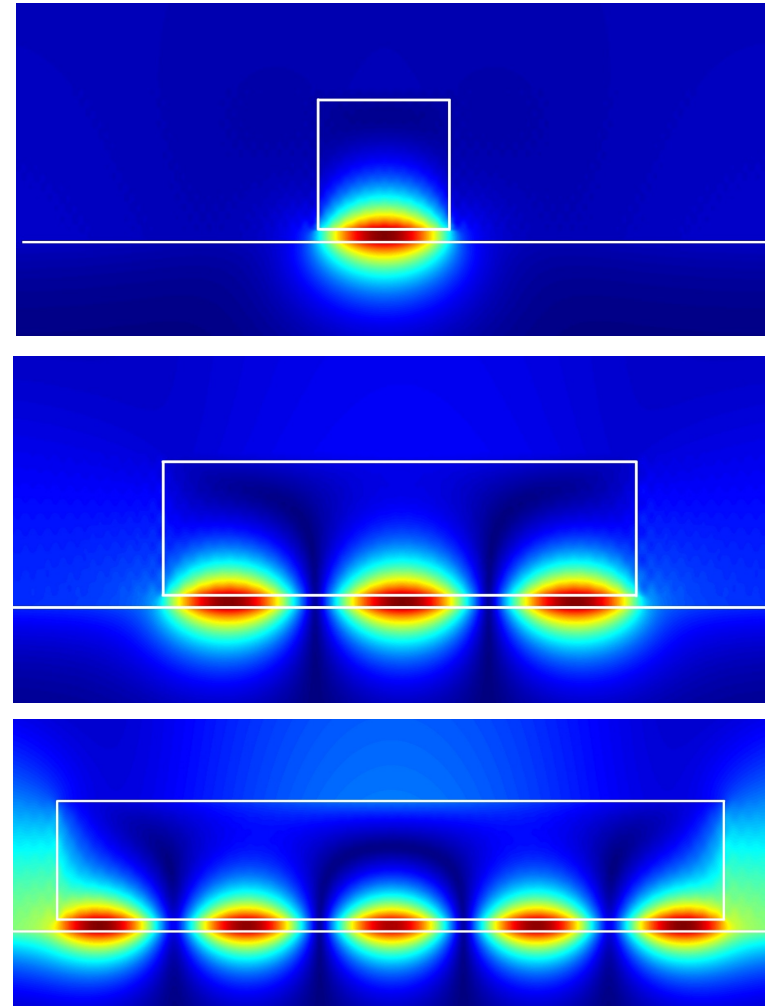
■ Mode guidé se propageant entre deux métaux

- Polarisation TM
- Epaisseur de diélectrique < 50 nm
- Ralentissement (effet de « trainée plasmonique »)



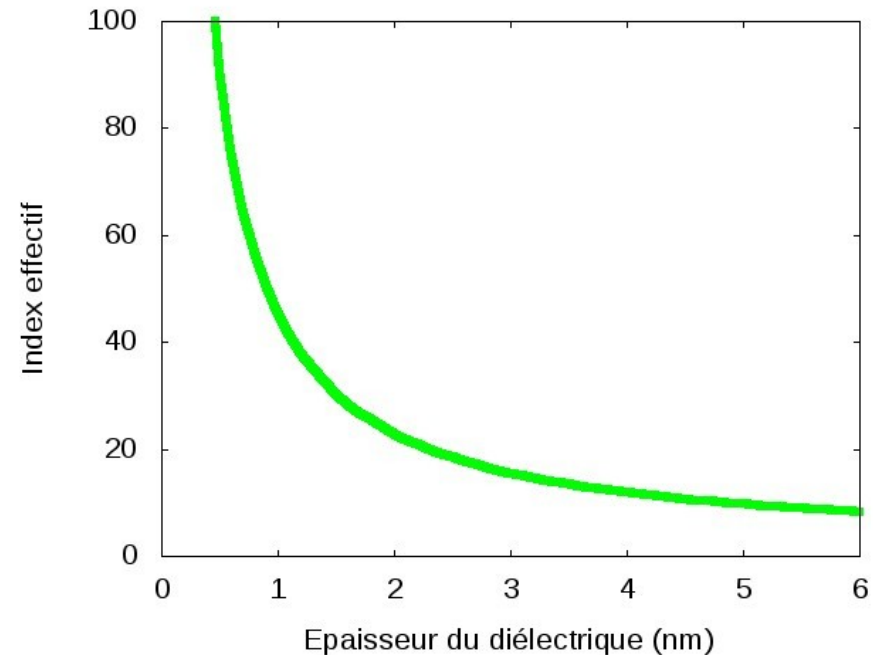
Résonateurs à gap-plasmons

- Cas du résonateur 2D
- Arrêt du guide : réflexion du gap-plasmon
 - Réflexion très importante
 - Résonances de cavité
- Analogue optique de la corde vibrante
 - Longueur d'onde effective
 - Résonateurs de taille très réduite



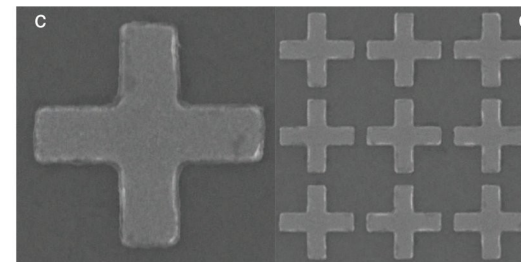
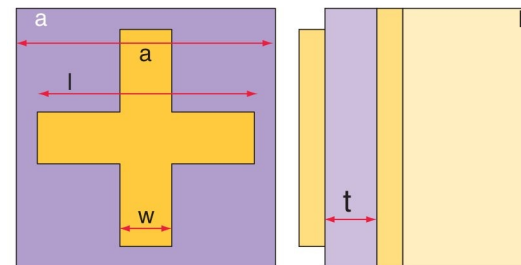
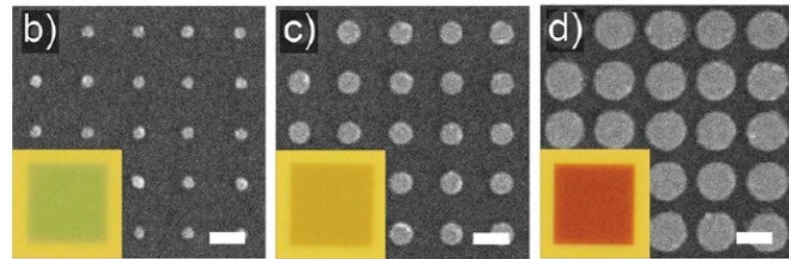
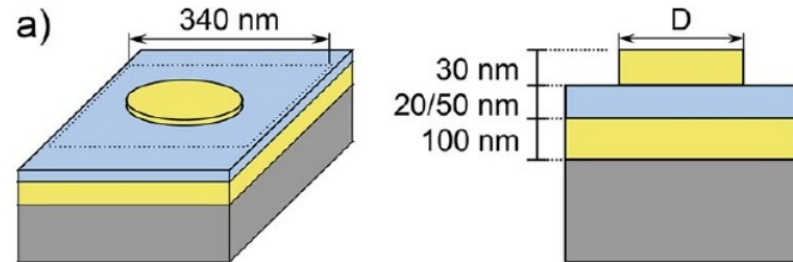
Réduction en taille

- Réduction du gap
- Ralentissement du gap-plasmon (vitesse de phase et groupe)
- Longueur d'onde effective diminue (inverse de l'indice effectif)
- Résonateurs $\lambda/2$ pour le gap-plasmon
- Résonateurs de taille inférieur à $1/10$ de la longueur d'onde dans le vide
- Facteur de qualité stable !



Zoologie des antennes patch

- Patches 2D
- Patch carrés
 - Insensibilité à la polarisation
- Patches rectangulaires
 - Anisotropie contrôlable
- Patches circulaires
- Patches en croix



Absorption

■ Absorption

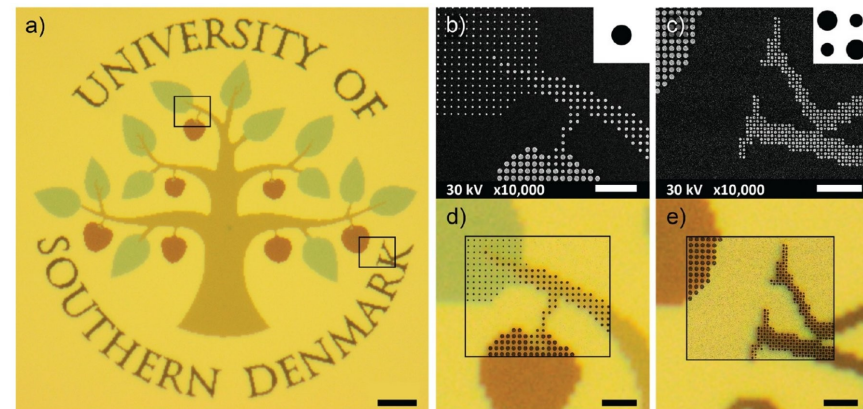
- Section efficace d'absorption très grande
- Concentration du champ

■ Détection de molécules

- Sensibilité

■ Impression plasmonique

- Patches circulaires
- Surface d'or



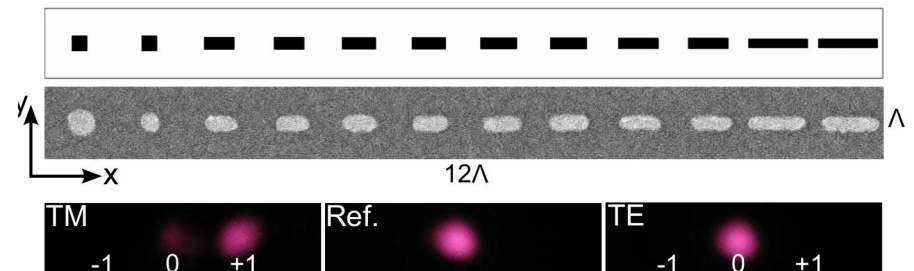
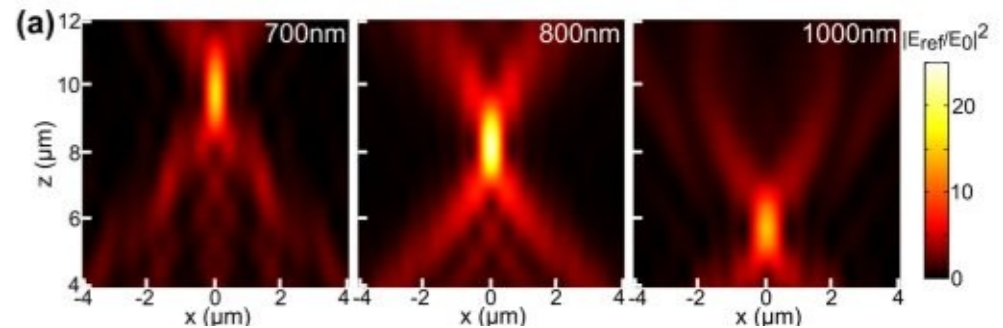
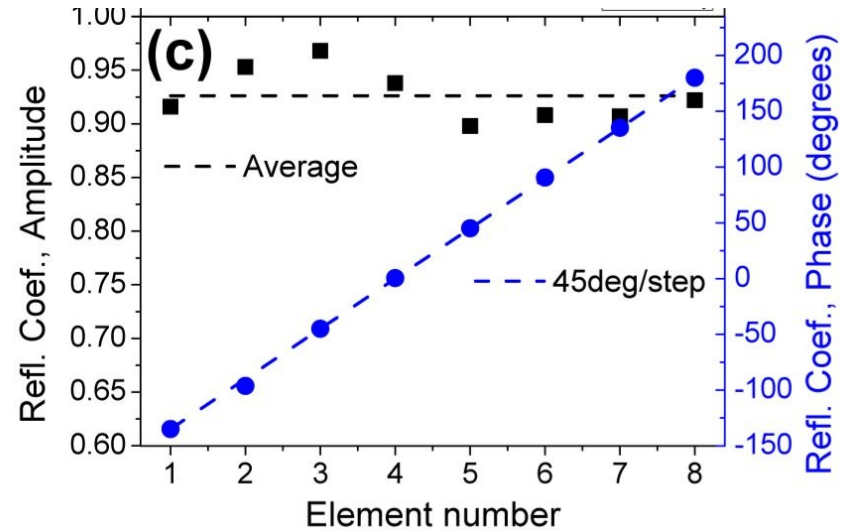
A. Roberts et al., *Nanoletters* 14, 783 (2014)

Contrôle du front d'onde

- Comme dans le cas des métasurfaces en transmission
- Contrôle du déphasage
 - Focalisation en réflexion
 - Réseaux de phase ultra-plats
 - Dépendance vis-à-vis de la polarisation (patchs anisotropes)

A. Pors et al., *Nanoletters* 13, 829 (2013)

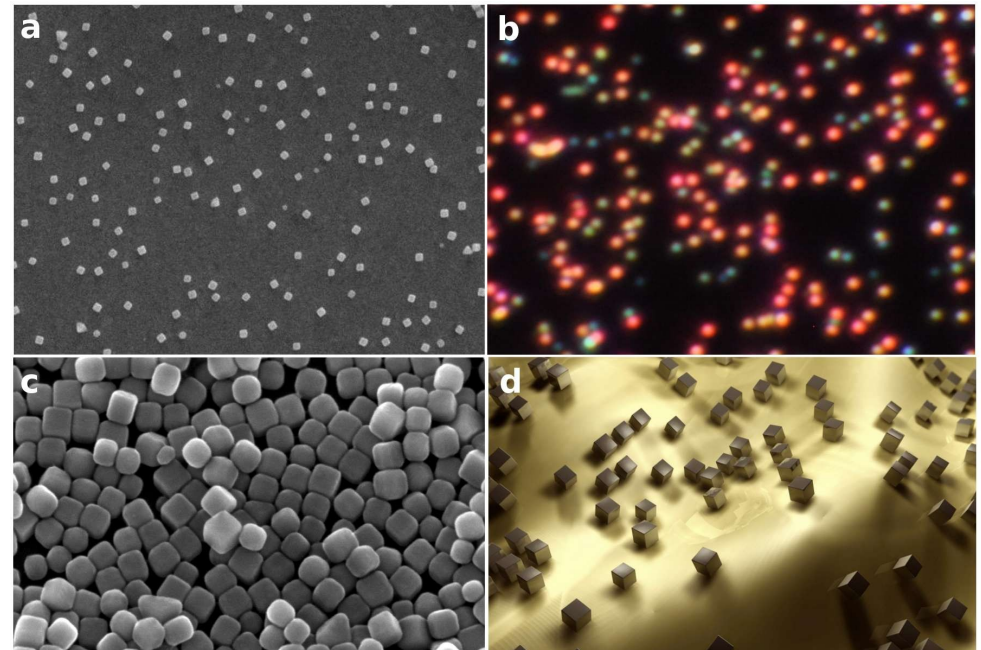
A. Pors et al., *Scientific Reports*, 3 2155 (2013)



Auto-assemblage

- Synthèse chimique de nanocubes
- Dépôt sur une couche de polymère
- Gaps extrêmement fins
 - Validité de la description des métaux
 - Résonateurs de 70 nm
- Technique très bas coût, mais soucis de dispersion en taille
- Contrôler la couleur d'une surface métallique

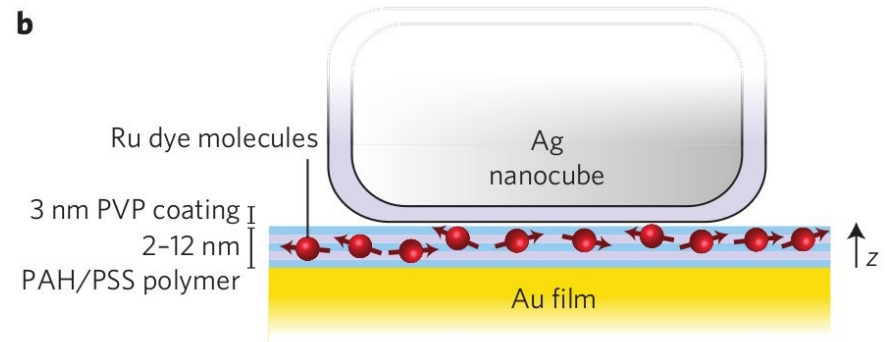
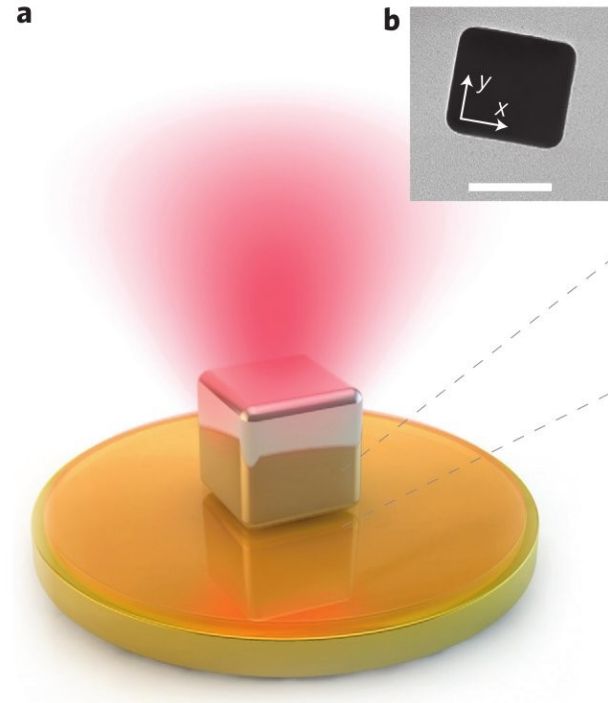
A. Moreau et al. Nature 86, 492 (2012)



Exaltation de fluorescence

- En plaçant des molécules fluorescentes sous un nanocube
 - Facile à exciter
 - Temps de désexcitation divisé par 100 à 1000
 - La lumière est rayonnée à plus de 50 %
 - Relativement directive
 - Exaltation d'un facteur 80
- Vers des métasurfaces sources de lumière ?
 - Sources à un photon
 - Emission ultra-rapide

A. Akselrod et al., Nature Photonics 8, 835 (2014)



Perspectives

■ Points forts

- Réduction des résonateurs en taille
- Contrôle spatial phase, réflexion et polarisation
- Approche bottom-up possible
- Utilisation comme sources

■ Points faibles

- En réflexion
- Encore peu de démonstrations (contrôle de la phase)

Conclusion

- Si les métamatériaux doivent avoir des applications commercialisables, ce seront d'abord des métasurfaces
 - Relative facilité de fabrication
 - Coût plus raisonnable
- Pertes limitées
- Degré de contrôle sans précédent
 - Phase
 - Polarisation
- Perspectives nouvelles
 - Contrôle dynamique ?