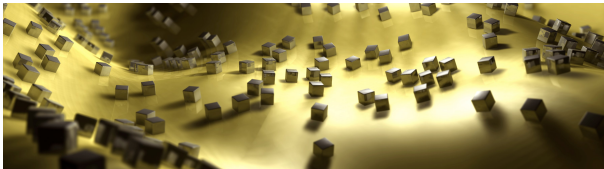


LES NANOCUBES COMME ANTENNES OPTIQUES : CONTRÔLE DE LA RÉFLECTANCE ET NON-LOCALITÉ

Antoine Moreau

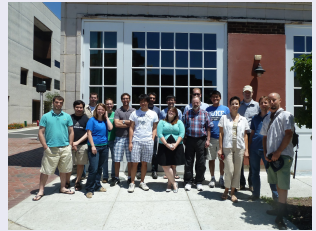
Institut Pascal, Université Blaise Pascal

11 Juin 2013



DUKE UNIVERSITY

- Duke University
 - Durham, North Carolina
 - 13 000 étudiants
 - 1 G\$ de budget Recherche
- Center for Metamaterials and Integrated Plasmonics
 - David R. Smith
 - Groupe d'une quinzaine de personnes
 - Cristian Ciraci
 - Jack Mock

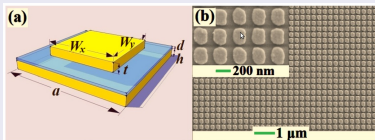
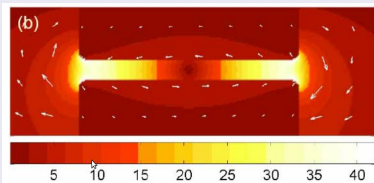


- 1 LA THÉORIE
- 2 LA STRUCTURE
- 3 NON-LOCALITÉ

- 1 LA THÉORIE
- 2 LA STRUCTURE
- 3 NON-LOCALITÉ

RÉSUMÉ DES ÉPISODES PRÉCÉDENTS...

- Quand on approche une nanoantenne d'une surface, de nouvelles résonances apparaissent^a
- Bozhevolnyi^b propose un mécanisme basé sur les gap-plasmons.
- D'un autre côté, les "absorbeurs parfaits"
 - Métamatériaux en micro-ondes^c
 - Patches dans le domaine optique (croix, rectangles)^d



^a G. Lévêque and O. J. F. Martin, *Opt. Expr.* **14**, 9971 (2006)

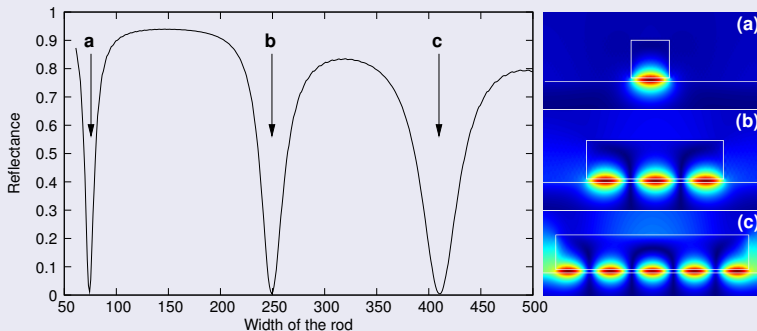
^b S. Bozhevolnyi *et al.*, *Opt. Expr.* **15** 10869 (2007)

^c N. I. Landy *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402 (2008)

^d J. Hao *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **96** 251104 (2010)



NANOPATCH = CAVITÉ NANOMÉTRIQUE

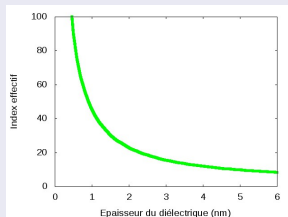


GAP-PLASMON

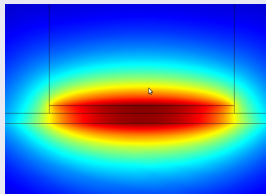
- Un guide métal-diélectrique-métal possède en polarisation TM un mode fondamental sans coupure.
- Lorsque l'épaisseur tend vers zéro, l'indice effectif diverge.
- La longueur d'onde devient très petite (mode lent).



INDICE EFFECTIF



GAP-PLASMON SOUS UN CUBE



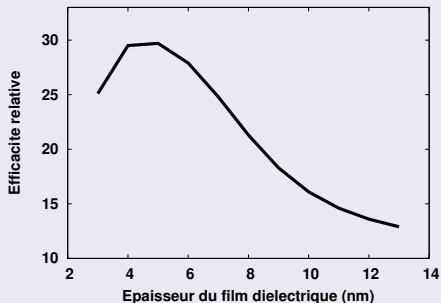
POUR RÉSUMER

- A faible gap, une cavité se forme pour le gap-plasmon en $\frac{\lambda}{2}$.
- Phase anormale du coefficient de réflexion.
- Taille du résonateur $< \frac{\lambda}{10}$: authentique métamatériau.

RÉGIME DE FAIBLE GAP

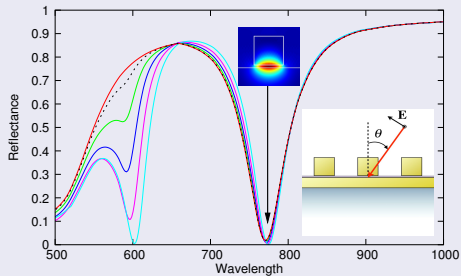
- Pour un gap un peu grand, la cavité est mauvaise (coefficient de réflexion bas).
- Pour un très petit gap, la cavité est bonne, mais difficile à coupler.
- Où est l'optimum ?
- Autour de **5 nm**, avec une couverture théorique de la surface de **30%** !

SECTION EFFICACE RELATIVE

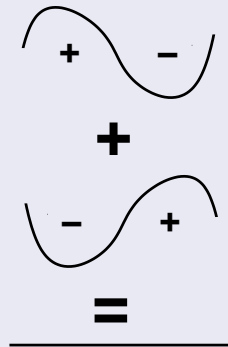


CONTRÔLE INTERFÉROMÉTRIQUE DE L'ABSORPTION

VARIATION ANGULAIRE



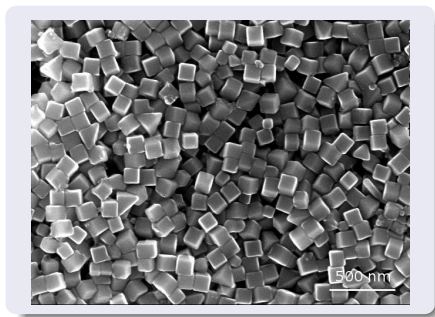
L'EXPLICATION



- 1 LA THÉORIE
- 2 LA STRUCTURE
- 3 NON-LOCALITÉ

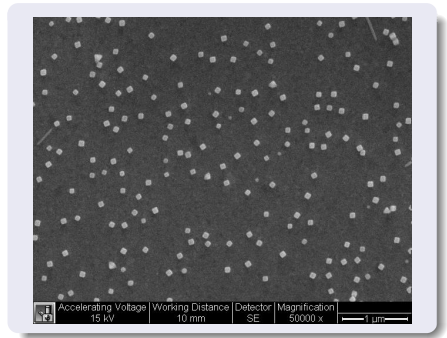
NANOCUBES D'ARGENT

- Synthèse de cubes métalliques par voie chimique
- Marche une fois sur...
- Cubes entourés d'une couche de PVP (3 nm).



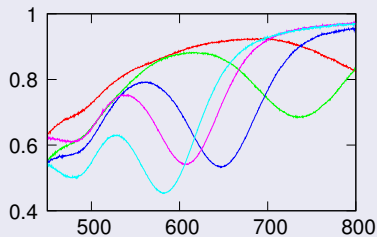
DÉPOSITION

- Polyelectrolyte comme spacer
- Alternance :
 - Solution d'eau salée
 - Solution du monomère
- La concentration se contrôle via le temps de contact
- Cubes chargés ?

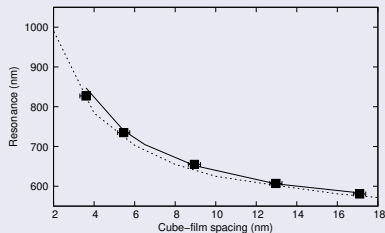


PREMIERS RÉSULTATS

REFLECTANCES À 7%

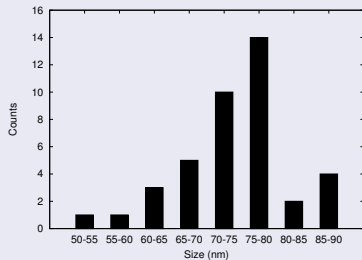


SENSIBILITÉ EXTRÊME

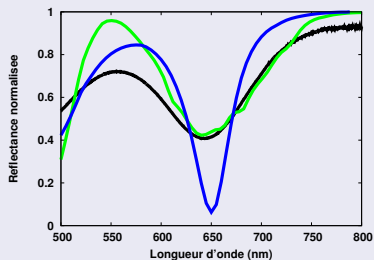


DISPERSION EN TAILLE

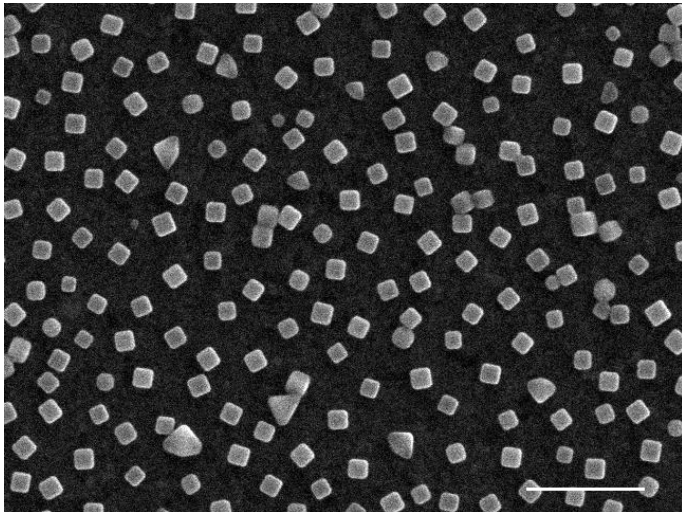
HISTOGRAMME DES TAILLES



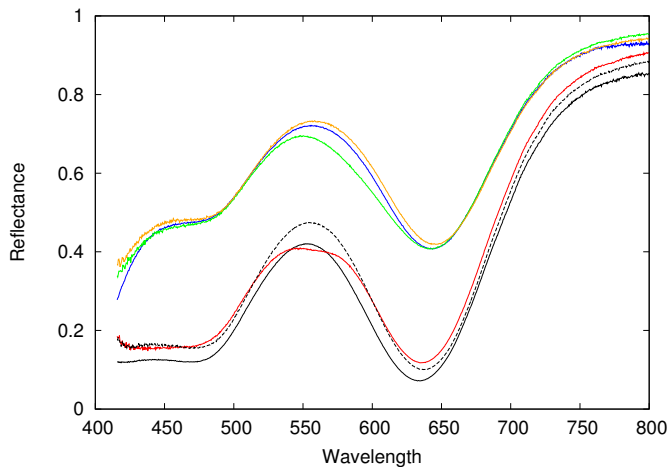
SIMULATION



HAUTE CONCENTRATION

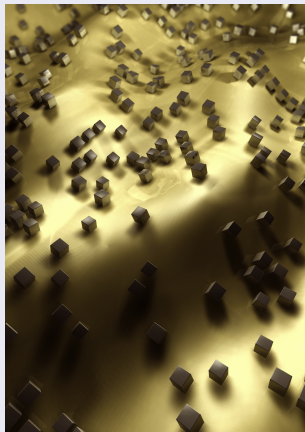


HAUTE CONCENTRATION



PERSPECTIVES

- Fabrication très bon marché
- Purification des cubes (meilleurs résultats !)
- Grande qualité des surfaces obtenues
- Extrême sensibilité (nano-interféromètres)
- Extrême concentration du champ
- Applications potentielles : biosensing, effet Raman exalté, spasers...



- 1 LA THÉORIE
- 2 LA STRUCTURE
- 3 NON-LOCALITÉ

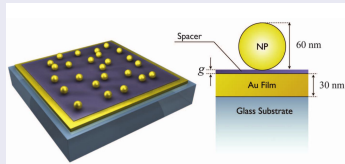
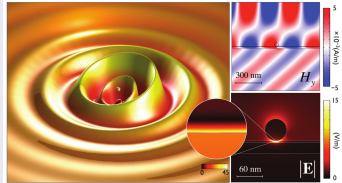
NONLOCALITÉ

- Usuellement $\vec{j} = \sigma \vec{E}$.
- En réalité, un métal est un plasma et les électrons interagissent (modèle hydrodynamique)

$$-\beta^2 \nabla (\nabla \cdot \mathbf{P}_f) + \ddot{\mathbf{P}}_f + \gamma \dot{\mathbf{P}}_f = \epsilon_0 \omega_p^2 \mathbf{E}$$

où $\dot{\mathbf{P}}_f = \mathbf{j}$.

- Récents résultats expérimentaux^a

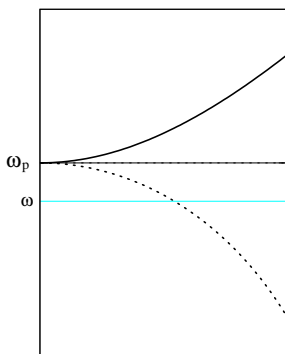


^aC. Ciraci et al., Science **337** 1072 (2012)

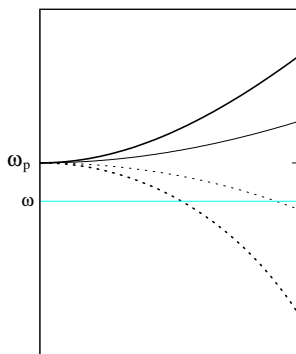
PLASMONS

Deux types d'ondes existent

- Les ondes "standard"
- Les plasmons "bulk"



(a)



(b)

QUELQUES REMARQUES

- Gros travail théorique dans les années 70-80.
- Pas d'expérience probante → stop.
- Nanostructures métalliques.
- Approches
 - Feibelman (semi-classique, supporte mal les pertes)
 - Modèle hydrodynamique (ABC, surestimation, mais analytique)
 - Density Functional Theory (quantique)
- Améliorations du modèle hydrodynamique^a
 - Prise en compte de la réponse (locale) des électrons liés
 - Condition aux limites unique !

^aA. Moreau, C. Ciraci and D. R. Smith, Phys. Rev. B **87** 045401 (2013)

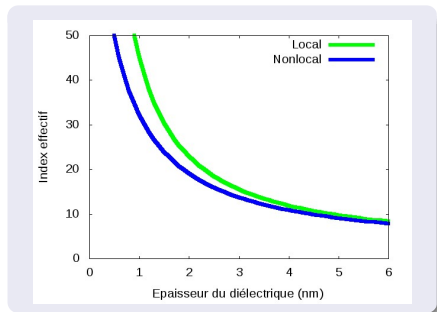
IMPACT SUR LE GAP-PLASMON

- Résultats analytiques^a

$$\frac{\kappa_z}{\varepsilon_d} \tanh \frac{\kappa_z h}{2} + \frac{\kappa_t}{\varepsilon} = \Omega$$

where $\Omega = \frac{k_x^2}{\kappa_l} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{1+\chi_b} \right)$

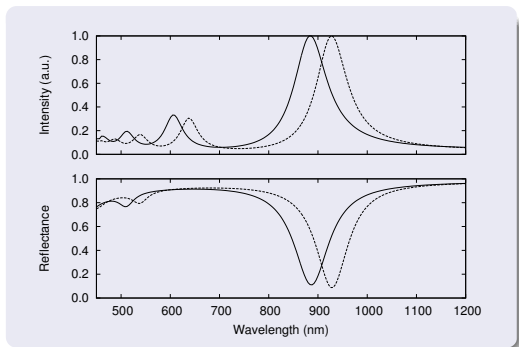
- A faible épaisseur k_x élevé
→ effets non-locaux !
- Mode *idéal* pour étudier la non-localité.



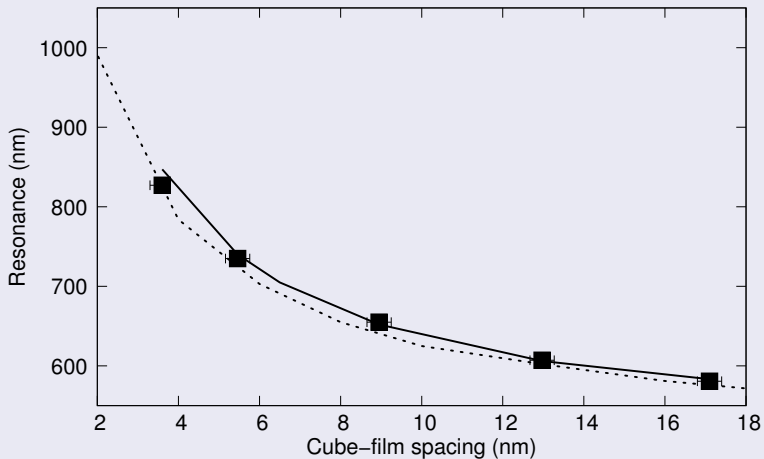
^aA. Moreau et al., Phys. Rev. B **87**, 045401 (2013)

INFLUENCE SUR LES NANOANTENNES PATCH

- En temps normal, on ne saurait pas exciter des gap-plasmons avec une si faible épaisseur.
- Avec des nanoantennes patch, on peut !
- Conduit à un décalage (mesurable) de la résonance.



ET QUAND ON Y PENSE...



PERSPECTIVES

Deux grandes tendances :

- Résonateurs à gap-plasmons (MIM)
 - Biocapteurs
 - Non-linéaire, Raman exalté
 - Encre dynamique...
- Non-localité
 - Réseaux de fentes fines
 - Influence sur les lentilles plates