

NANOPHOTONIQUE & PLASMONIQUE

Antoine Moreau

Institut Pascal, Université Blaise Pascal

15 juillet 2014

1 NANOPHOTONIQUE

- Nanophotonique
- Métamatériaux
- Plasmonique

2 RÉSONATEURS À GAP-PLASMONS

- Cavités
- Gap-plasmon
- Résonateurs
- Nanocubes

3 OPTIQUE DES GAP-PLASMONS

- Section efficace
- Contrôle interférométrique

4 NON-LOCALITÉ

- Historique
- Impact sur le gap-plasmon
- Impact sur les résonateurs

1 NANOPHOTONIQUE

- Nanophotonique
- Métamatériaux
- Plasmonique

2 RÉSONATEURS À GAP-PLASMONS

- Cavités
- Gap-plasmon
- Résonateurs
- Nanocubes

3 OPTIQUE DES GAP-PLASMONS

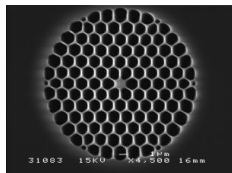
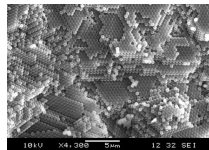
- Section efficace
- Contrôle interférométrique

4 NON-LOCALITÉ

- Historique
- Impact sur le gap-plasmon
- Impact sur les résonateurs

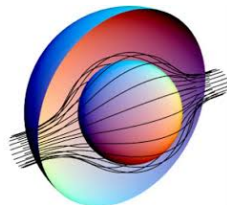
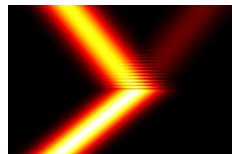
NANOPHOTONIQUE

- Miroirs de Bragg
- Années 90 : généralisation à 2D ou 3D
- Perspectives de contrôle de l'émission spontanée
- Dans la nature :
 - Opales
 - Structures animales (morphos, souris de mer)
- Application : fibres à cristaux photoniques



MÉTAMATÉRIAUX

- Début 2000
- Résonateurs $< \lambda/10$
- Matériaux effectifs avec ϵ et μ contrôlables
- Réfraction négative
- Invisibilité
- Lentille parfaite

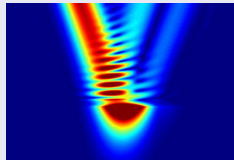


PLASMONIQUE

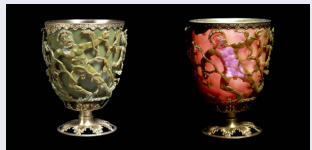
Étude des résonances dûes au métal

- Contrôle de l'émission spontanée
- Concentration des champs (effets NL, Raman)
- Biosensing
- Opérations logiques, nanolasers...
(?)

MODES DE SURFACE



NANOPHOTONIQUE ANTIQUE



PLASMA & LUMIÈRE

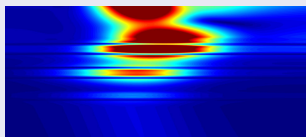
- Courants inclus dans la permittivité
- $\epsilon < 0$
- Poynting en $\frac{1}{\epsilon}$
- Réfraction négative
- Lentilles plates

MODÈLE DE DRUDE

$$\dot{\mathbf{P}}_f = \mathbf{j}$$

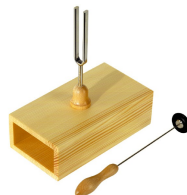
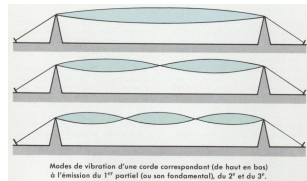
$$\ddot{\mathbf{P}}_f + \gamma \dot{\mathbf{P}}_f = \epsilon_0 \omega_p^2 \mathbf{E}$$

RÉFRACTION NÉGATIVE



RÉSONANCE DE CAVITÉ

- Onde (sonore, corde, lumière)
- Extrêmités réfléchissantes
- Résonances (modes de cavité)
- Taille minimale $\lambda/2$ (cordes)
- Taille minimale $\lambda/4$ (son)
- Caisses de résonance, lasers

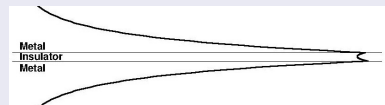


GAP-PLASMON

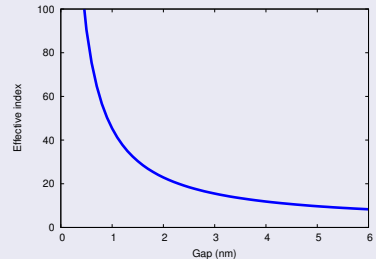
Un mode guidé se propage entre deux demi-espaces métalliques

- En polarisation $H_{//}$
- Pour toute épaisseur (pas de coupure)
- En dessous de 50 nm @600nm, effet plasmonique
- Le mode ralentit
- L'indice effectif diverge

PROFIL DU MODE

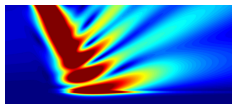
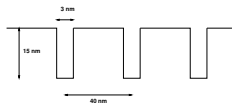
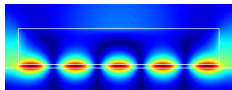


INDICE EFFECTIF



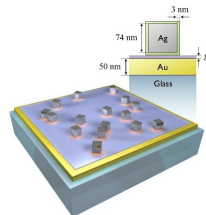
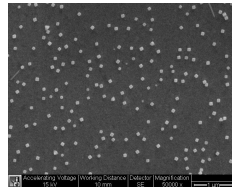
RÉSONATEURS À GAP-PLASMONS

- Gap-plasmon : onde à très faible λ
- Coefficient de réflexion important (guide ouvert ou fermé)
- Résonateurs $\lambda/2$
- Résonateurs $\lambda/4$
- Excitation via un prisme



METASURFACE ABSORBANTE

- Utilisation de cubes synthétisés chimiquement
- Réflexion aux bords,
- Résonances de cavité (malgré la taille $< \lambda/10$),
- Grande sensibilité
- Grande section efficace !

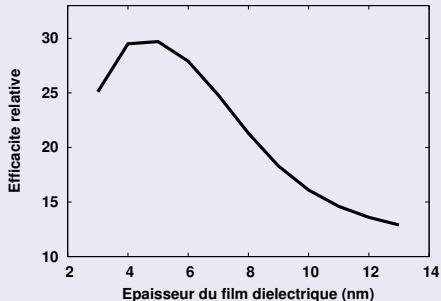


- 1 NANOPHOTONIQUE
 - Nanophotonique
 - Métamatériaux
 - Plasmonique
- 2 RÉSONATEURS À GAP-PLASMONS
 - Cavités
 - Gap-plasmon
 - Résonateurs
 - Nanocubes
- 3 OPTIQUE DES GAP-PLASMONS
 - Section efficace
 - Contrôle interférométrique
- 4 NON-LOCALITÉ
 - Historique
 - Impact sur le gap-plasmon
 - Impact sur les résonateurs

SECTION EFFICACE D'ABSORPTION

- 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 3% !

SECTION EFFICACE RELATIVE

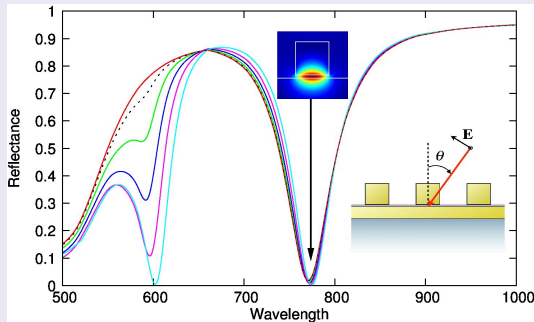


CONTRÔLE INTERFÉROMÉTRIQUE DE L'ABSORPTION

Le contrôle interférométrique

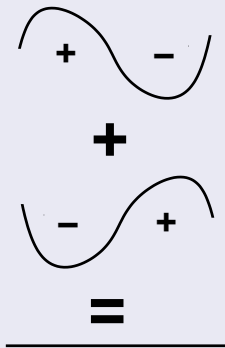
- Tue les résonances impaires en incidence normale
- Augmente l'efficacité de l'absorption par les résonances paires

ABSORPTION ET ANGLE D'INCIDENCE

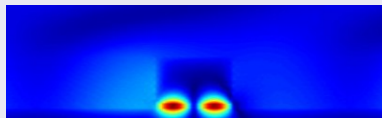


RÉSONANCES IMPAIRES

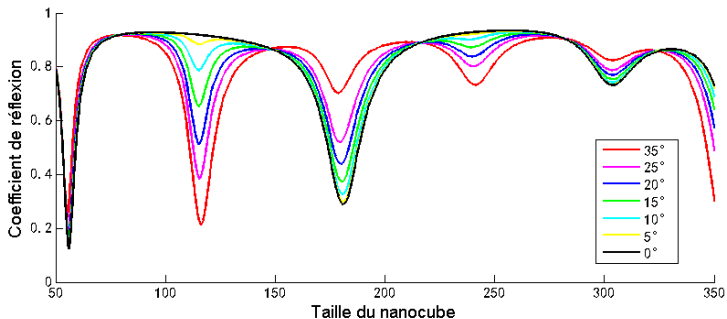
SUPPRESSION DES RÉSONANCES
IMPAIRES...



...SAUF EN INCIDENCE OBLIQUE.



EFFICACITÉ DES RÉSONANCES PAIRES



OPTIQUE DES GAP-PLASMONS

- Beaucoup de résonances liées aux gap-plasmons
- Physique intéressante à développer
- Importance de la section efficace pour l'auto-assemblage
- Application directe : biosensing

- 1 NANOPHOTONIQUE
 - Nanophotonique
 - Métamatériaux
 - Plasmonique
- 2 RÉSONATEURS À GAP-PLASMONS
 - Cavités
 - Gap-plasmon
 - Résonateurs
 - Nanocubes
- 3 OPTIQUE DES GAP-PLASMONS
 - Section efficace
 - Contrôle interférométrique
- 4 NON-LOCALITÉ
 - Historique
 - Impact sur le gap-plasmon
 - Impact sur les résonateurs

NON-LOCALITÉ

- Modèle de Drude, sans interactions entre électrons

$$\ddot{\mathbf{P}}_f + \gamma \dot{\mathbf{P}}_f = \epsilon_0 \omega_p^2 \mathbf{E}$$

où $\dot{\mathbf{P}}_f = \mathbf{j}$.

- En réalité les électrons se repoussent (coulomb, échange)
- Si on linéarise les équations de l'hydrodynamique

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

- “Libre parcours moyen” 20 nm !

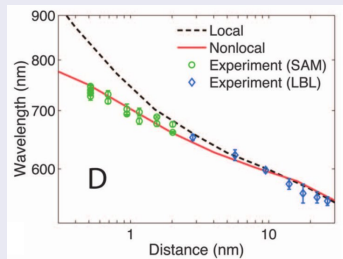
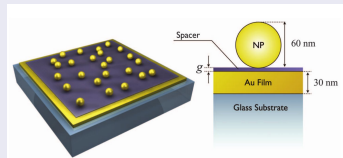
LE FLOP.

- Étude dans les années 70-80, mais deux écueils
 - Quelles conditions aux limites choisir ?
 - Le plasmon est-il sensible ?
 - → Pas d'expérience permettant de valider les modèles.
 - Deux livres. Stop.

RÉSULTATS RÉCENTS

- En utilisant des nanosphères
- Un poly-électrolyte comme spacer
- Ecart à Drude, bien décrit par le modèle hydrodynamique

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



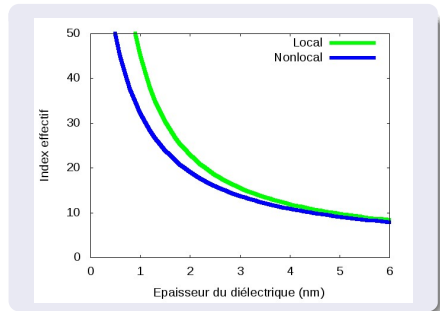
IMPACT SUR LE GAP-PLASMON

- Résultats analytiques^a

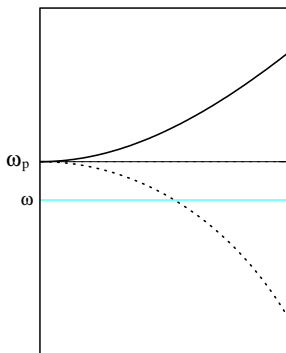
$$\frac{\kappa_z}{\epsilon_d} \tanh \frac{\kappa_z h}{2} + \frac{\kappa_t}{\epsilon} = \Omega$$

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

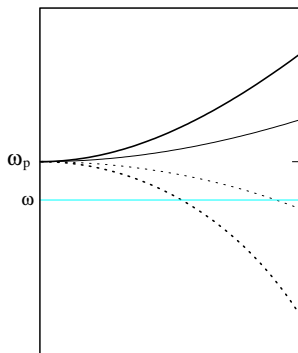
- A faible épaisseur k_x élevé \rightarrow effets non-locaux !
- Mode *idéal* pour étudier la non-localité.



PLASMONS



(a)

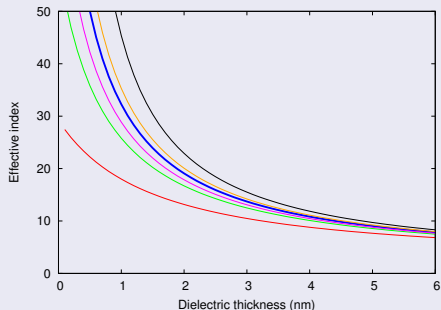


(b)

CONDITIONS AUX LIMITES SUPPLEMENTAIRES

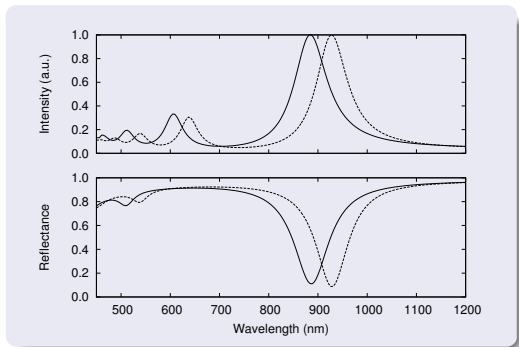
- Modèle hydro connu pour exagérer les effets non-locaux
- Forcément via les conditions aux limites
- En tenant compte des transitions interbandes
 - Conditions aux limites
 - Impact moindre
 - Résultats plus réalistes ?

INFLUENCE DES CONDITIONS AUX LIMITES



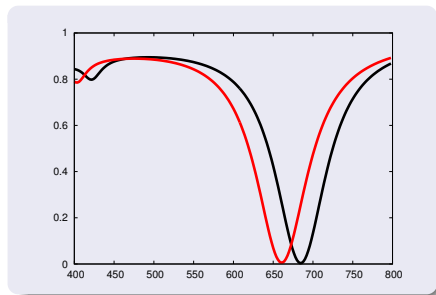
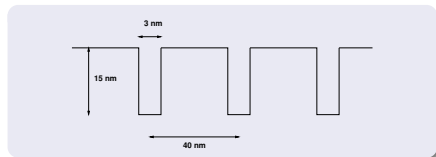
INFLUENCE SUR LES NANOANTENNES PATCH

- 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.



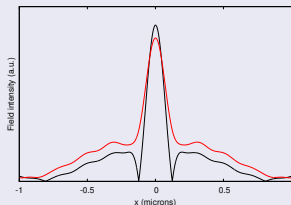
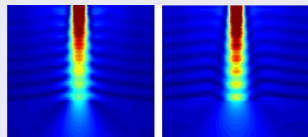
- Nanoréseau
 - Fentes de 2 à 5 nm de large
 - 15 nm de profondeur
 - Résonateurs à gap-plasmons $\frac{\lambda}{4}$
- Mécanisme clair de sensibilité à la non-localité
- Le gap-plasmon n'est pas le seul impliqué dans la résonance.
- Seul à être sensible.

⁴Le Percec et al. PRL 100 066408 (2008)



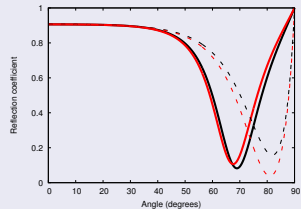
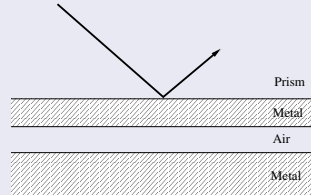
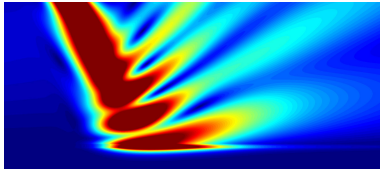
MILIEUX LAMELLAIRES

- Solution analytique dans chaque couche
- Matrices de scattering généralisées
- Simulation possible de tous les empilements métallo-diélectriques
- Impact important pour des faibles épaisseurs de métal (5 nm)
- En général, une meilleure transmission !



COUPLEUR À PRISME POUR GAP-PLASMON

- Excitation du gap-plasmon via un prisme
- Indice élevé (TiO_2), @543 nm
- Décalage mesurable autour de 70°



PERSPECTIVES

- Optique des gap-plasmons
 - Réflexion, section efficace
 - Autres résonateurs (dimères de cubes)
- Fabrication
 - Sylvie Marguet (CEA Saclay) : les cubes
 - Jérôme Plain et Renaud Bachelot (UTT) : photopolymères
 - Impact de la non-localité ?
- “Plasmonique Quantique”
 - Strasbourg
 - Validité du modèle hydrodynamique
 - Inclure le spill-out