

# Transmission exaltée à travers des tamis à photons à ouvertures annulaires nanométriques : simulation et caractérisation

Yannick POUJET

Thèse dirigée par Fadi BAIDA et Jérôme SALVI  
vendredi 14 décembre 2007

# Plan

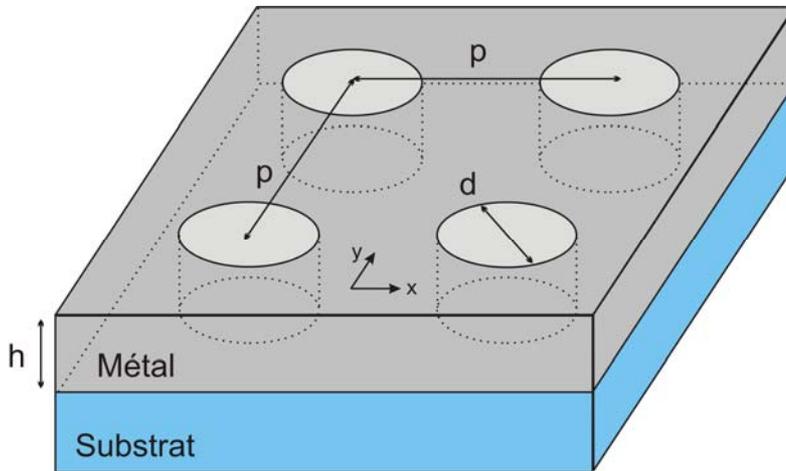
- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Plan

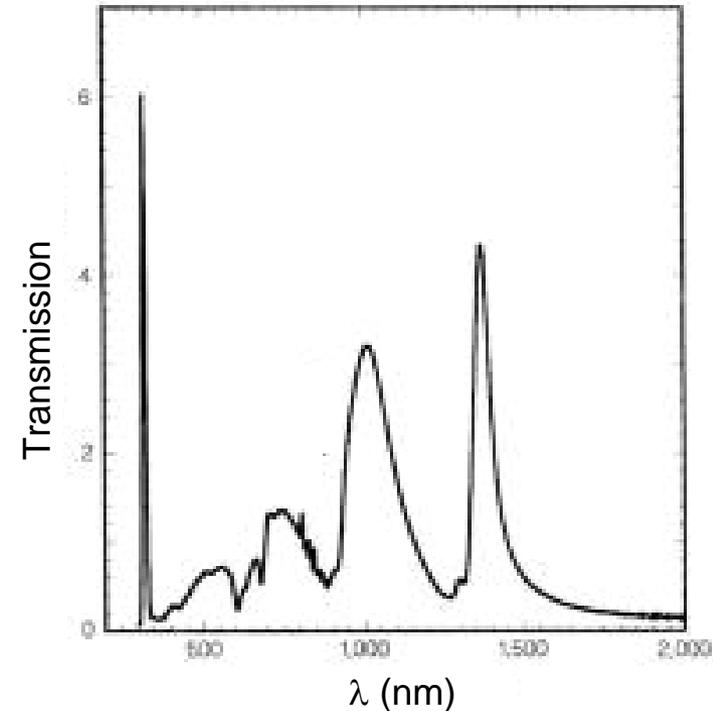
- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Introduction

**1998 : Transmission extraordinaire à travers des ouvertures circulaires sub-longueur d'onde creusées dans un film d'argent**



Ouvertures cylindriques  
diamètre  $d = 150$  nm,  
période  $p = 900$  nm,  
épaisseur  $h = 200$  nm.

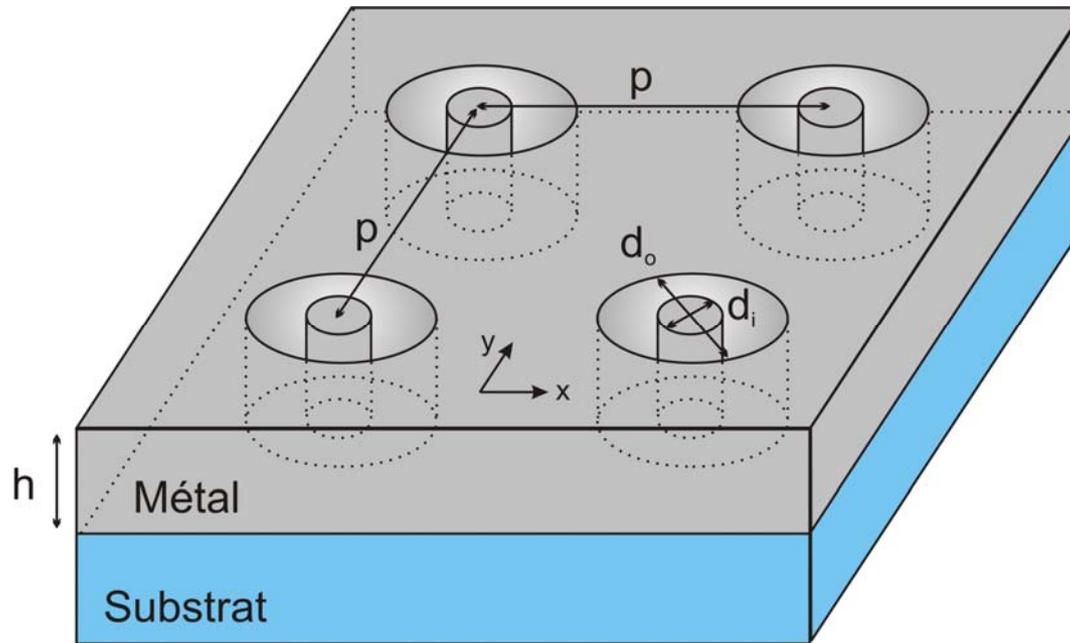


**Couplage entre les plasmons de surfaces**

TW. Ebbesen *et al.*, *Nature* **391**, 667-669 (1998)

# Introduction

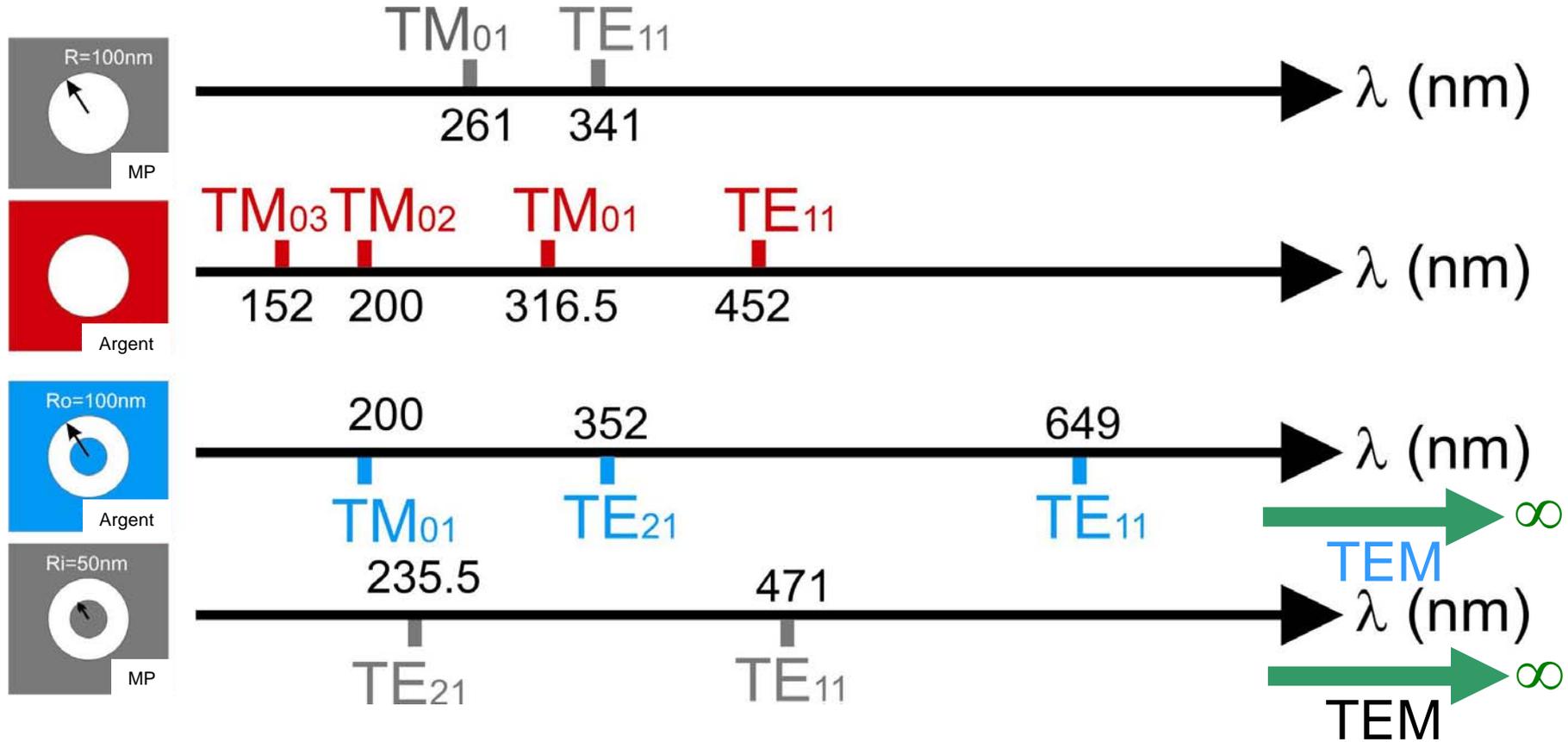
2002 : Nouvelle structure proposée par Baida et Van Labeke  
*Annular Aperture Arrays (AAA)*



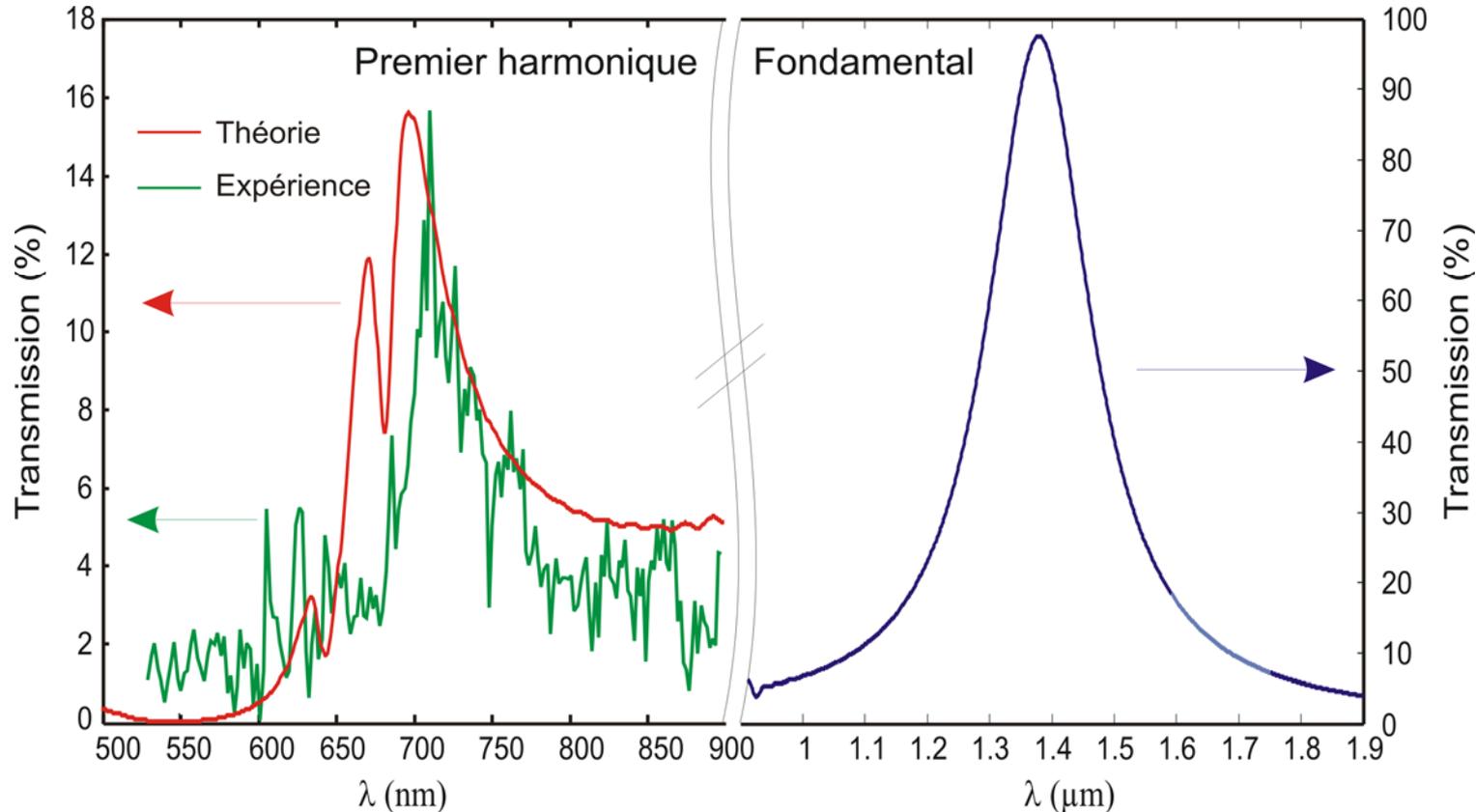
Excitation des modes guidés de la structure (mode TEM en particulier)

F. Baida and D. Van Labeke, *Opt. Commun.* **209**, 17-22 (2002)

# Introduction



# Introduction



AAA  
 $d_o = 330$  nm,  
 $d_i = 250$  nm,  
 $h = 150$  nm,  
 $p = 600$  nm,  
 substrat verre,  
 couche d'or.

Mode TE<sub>11</sub> de la cavité annulaire

J. Salvi *et al.*, *Optics Letters* **30** (13), 1611-1613 (2005)

# Plan

- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
    - Influence des paramètres géométriques
    - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Étude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Méthode de calcul

Méthode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) : résolution numérique des équations de Maxwell

Simulation d'objets 3D

Maillage non uniforme autour de la structure

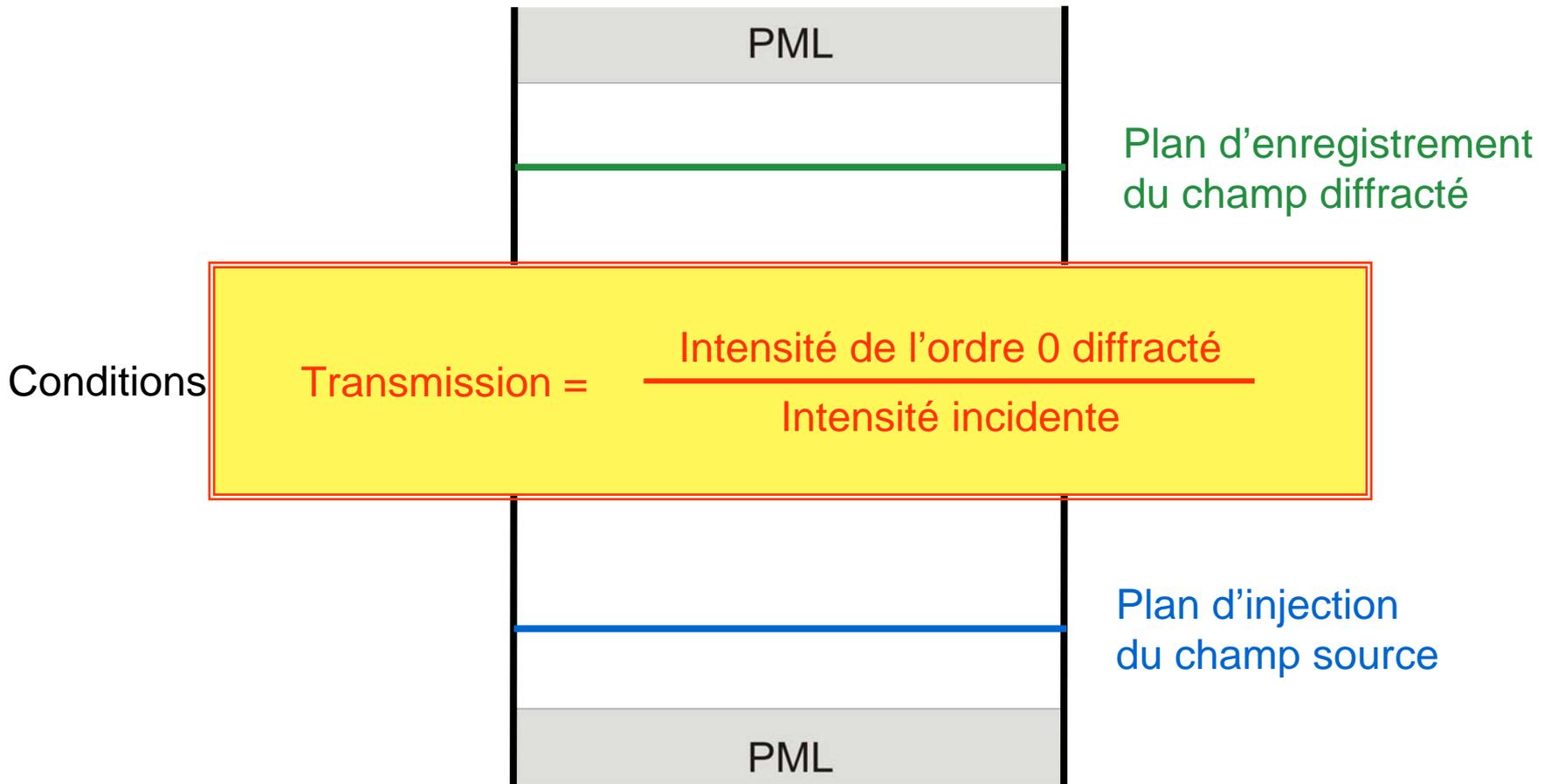
Conditions de bords données par : *Perfectly Matched Layers* (PML) de Bérenger

Dispersion du métal donnée par :

▪ un modèle de Drude  $\epsilon(\omega) = -\frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - \gamma)}$   
(argent, aluminium)

▪ un modèle de Drude-Lorentz  $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - \gamma)} - \frac{\Delta\epsilon \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + \gamma_0 \omega}$   
(or)

# Méthode de calcul



# Méthode de calcul

Introduction des différences finies centrées

Équation de Maxwell-Faraday  $\vec{\text{rot}} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

$\frac{\partial}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} = -\mu \frac{\partial}{\partial t}$

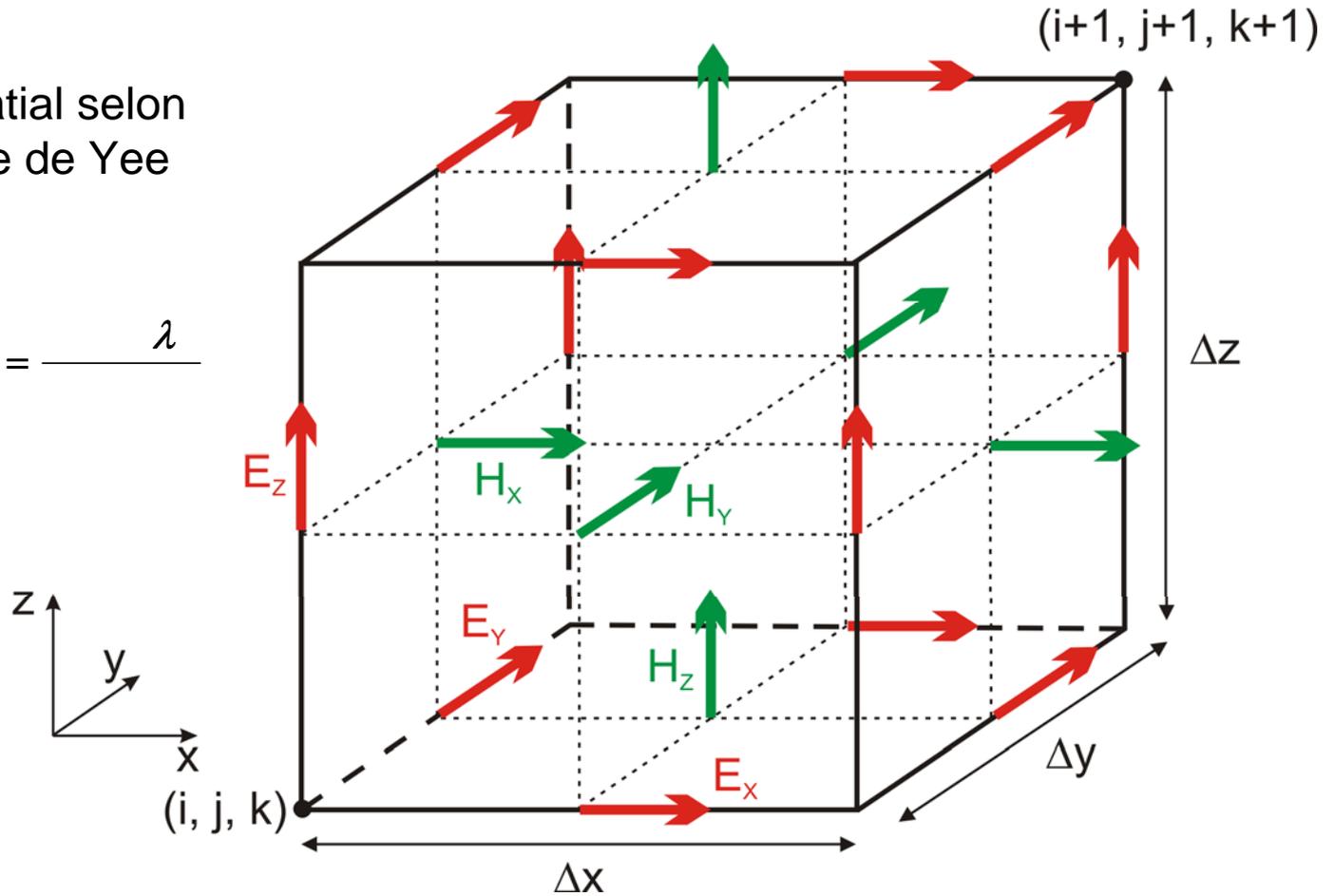
$\frac{\partial}{\partial t} \Rightarrow \frac{+\frac{\Delta}{2} - \frac{\Delta}{2}}{\Delta}$

$\frac{\partial}{\partial t} \Rightarrow \frac{+\frac{\Delta}{2} - \frac{\Delta}{2}}{\Delta}$

# Méthode de calcul

Maillage spatial selon l'algorithme de Yee

$$\Delta \Delta \Delta = \frac{\lambda}{3}$$

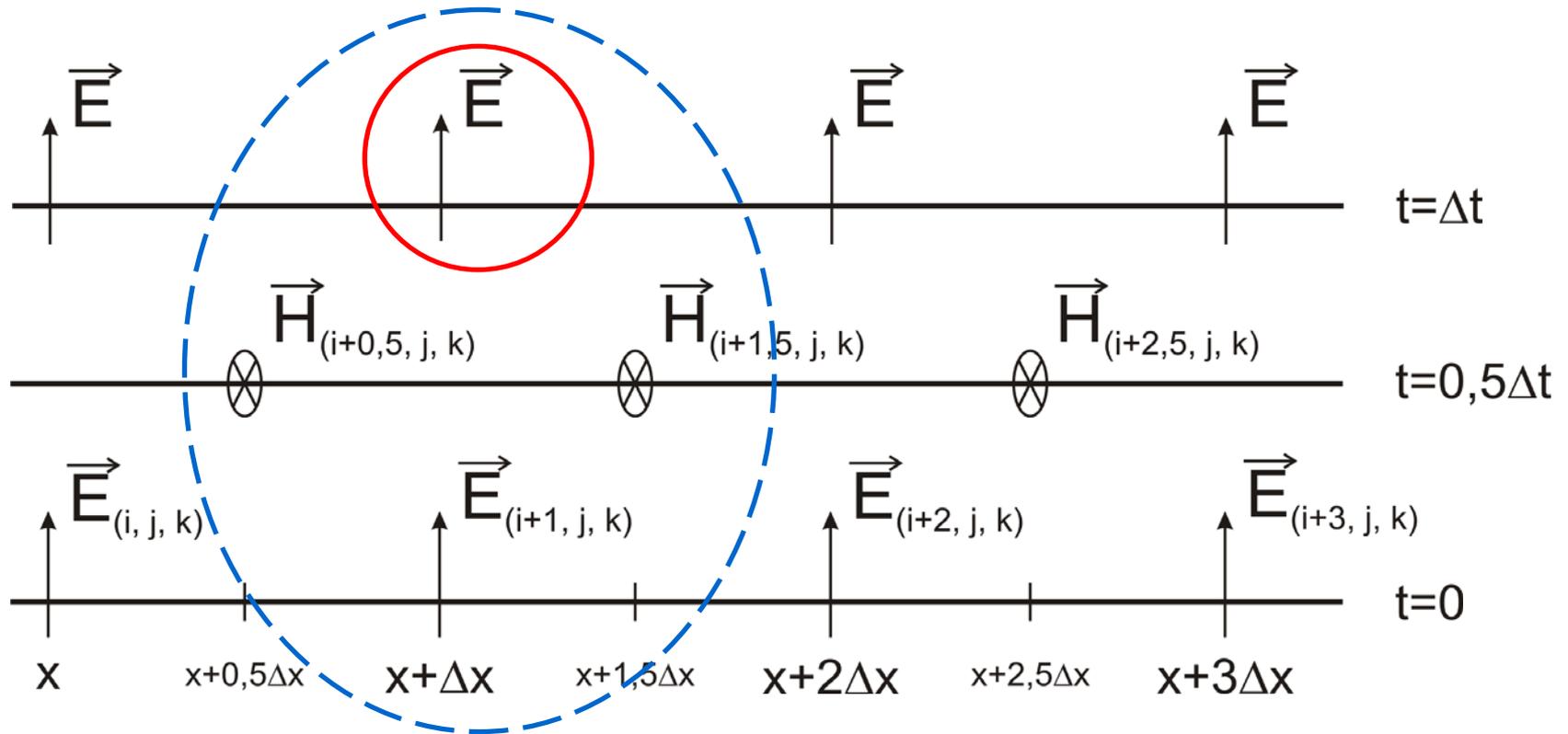


A. Taflove and S.C. Hagness, *Computational electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain method* (2000)

# Méthode de calcul

Maillage temporel

$$\Delta = \frac{\Delta \quad \Delta \quad \Delta}{\quad}$$

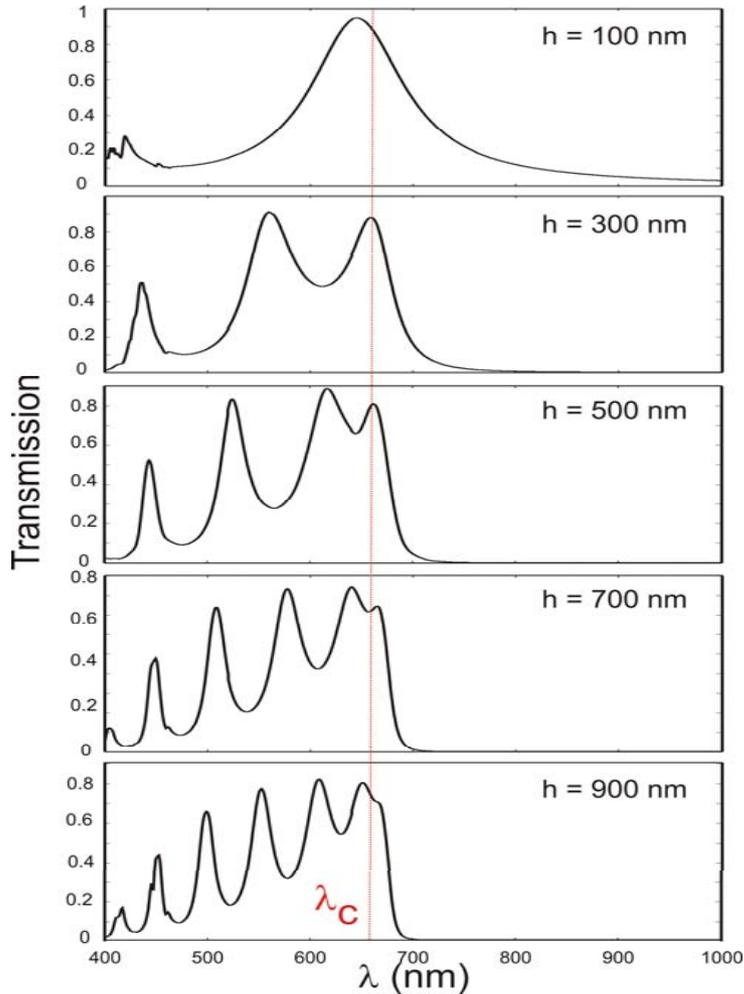


A. Taflove and S.C. Hagness, *Computational electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain method* (2000)

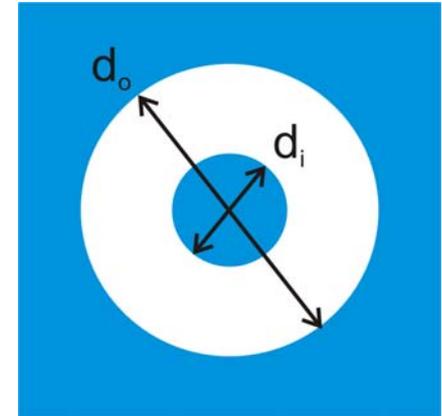
# Plan

- Introduction
- **Outil numérique**
  - Méthode de calcul
  - **Influence des paramètres géométriques**
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Influence de l'épaisseur



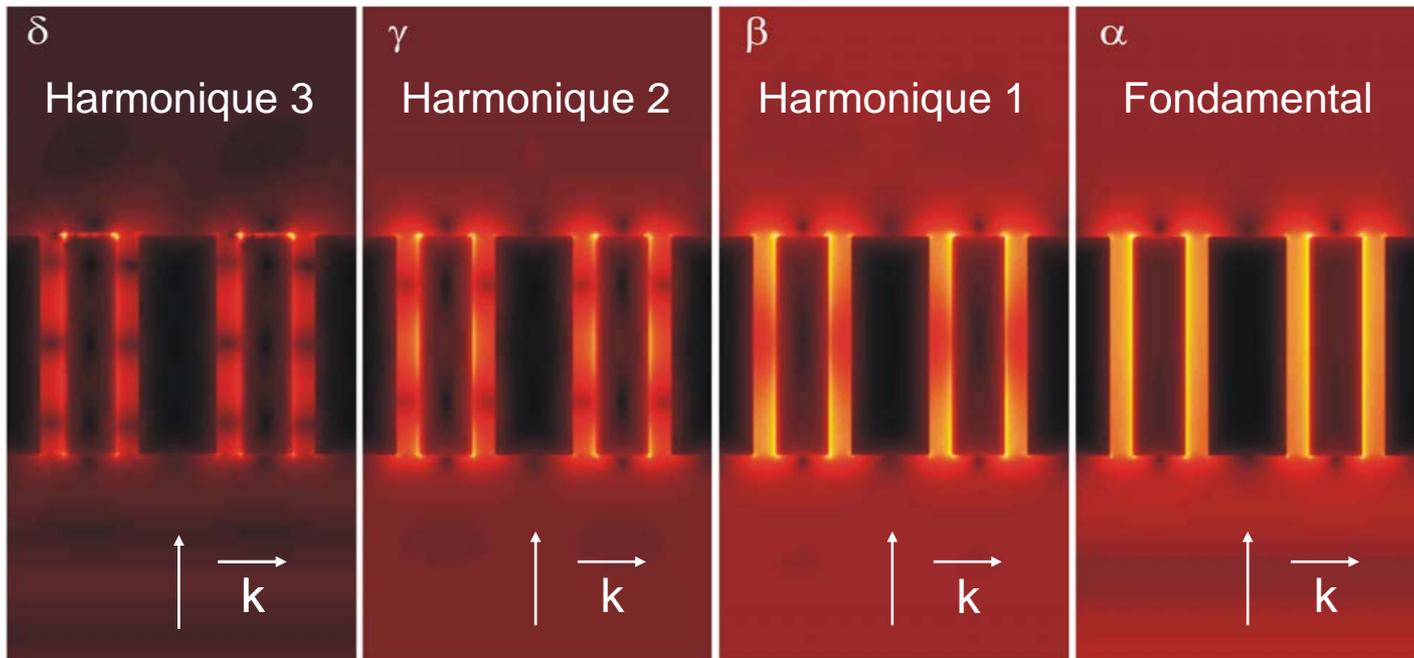
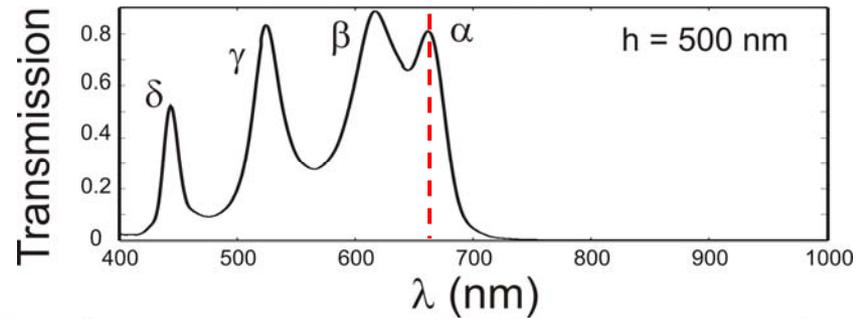
AAA  
 $d_o = 200 \text{ nm}$ ,  
 $d_i = 100 \text{ nm}$ ,  
 $p = 350 \text{ nm}$ ,  
 pas de substrat,  
 couche d'argent seule.



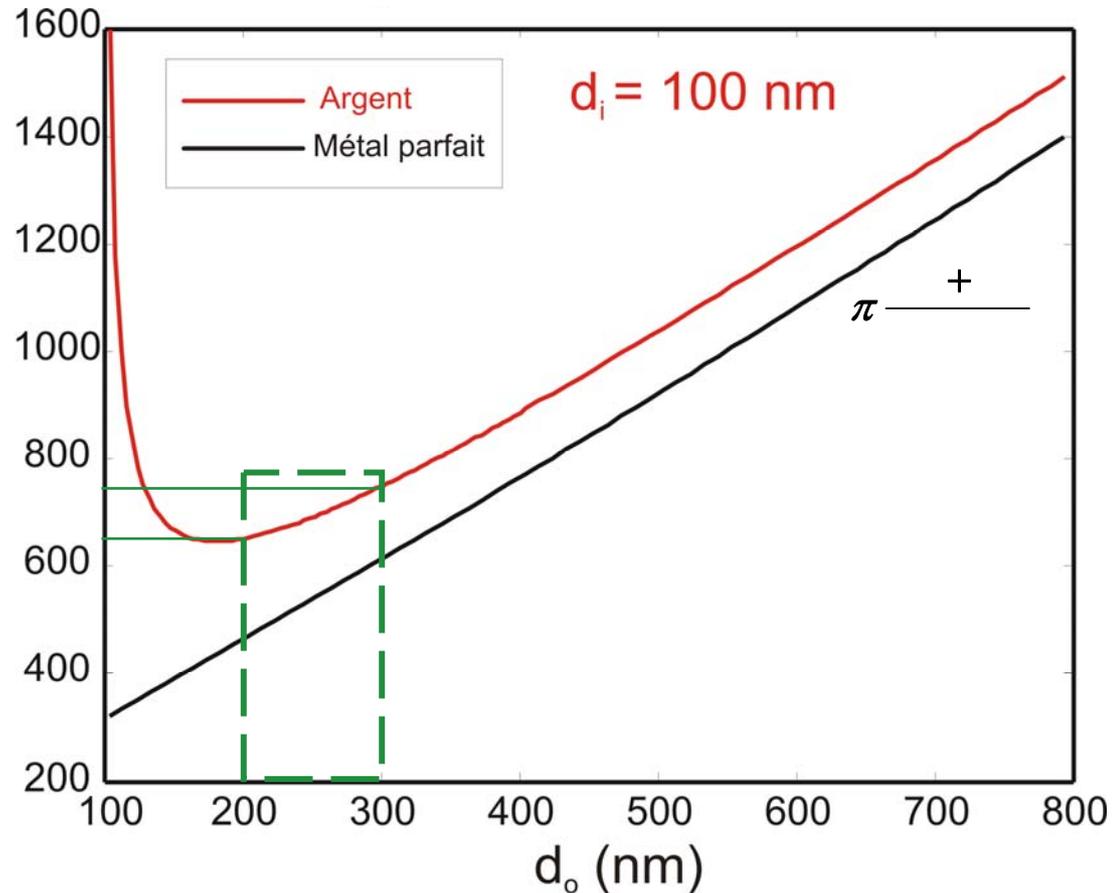
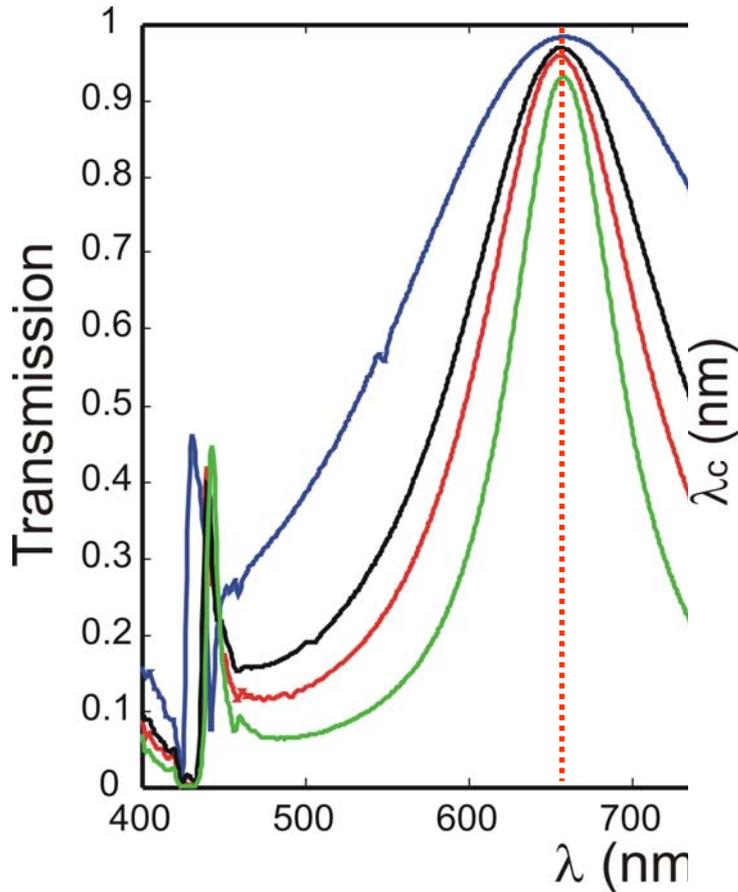
Cavité Fabry-Pérot formée par les faces supérieure et inférieure de l'ouverture annulaire

$\lambda_c$  = longueur d'onde de coupure du mode  $TE_{11}$   
 pour un guide d'onde infini

# Influence de l'épaisseur

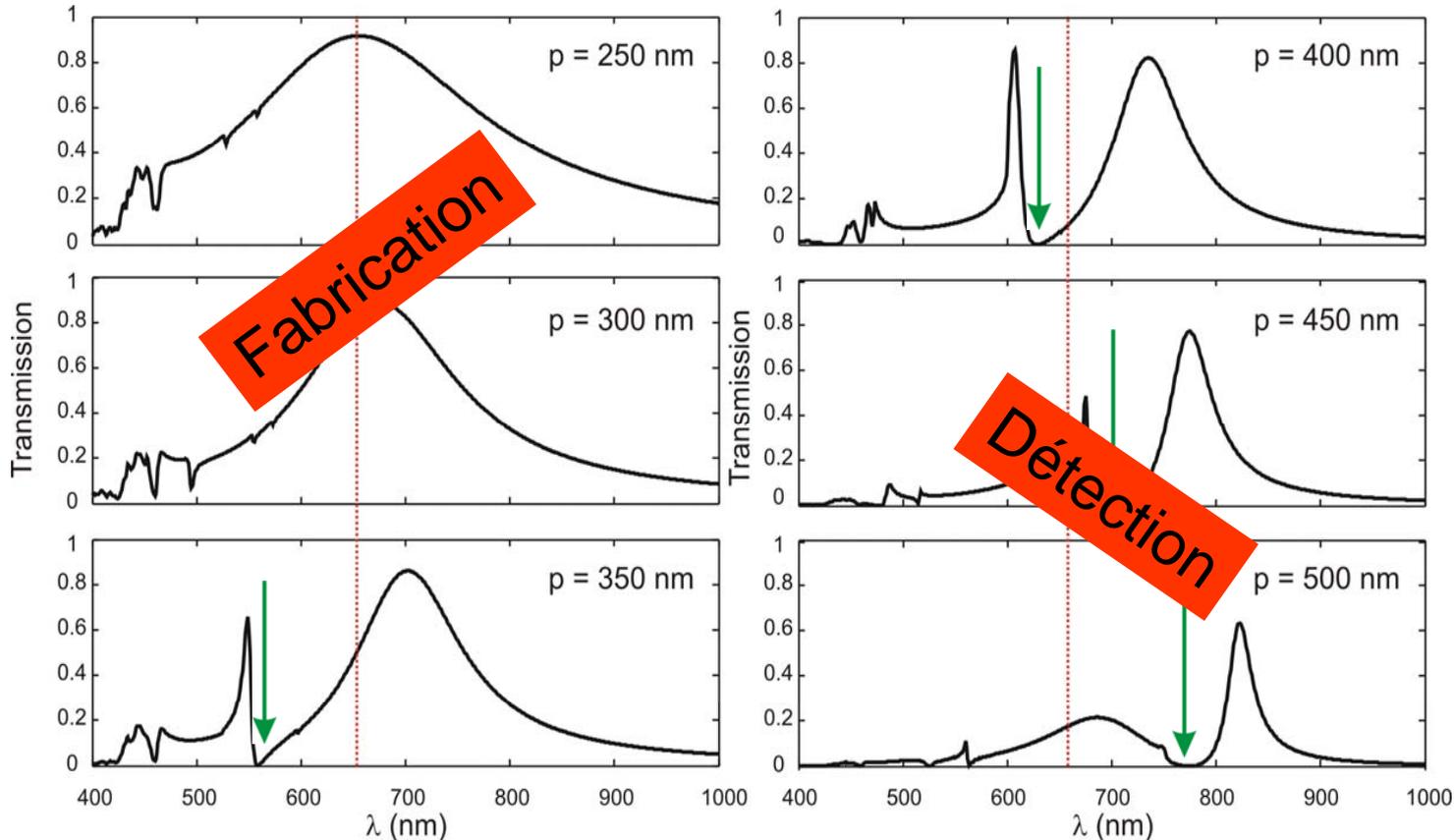


# Influence du diamètre extérieur



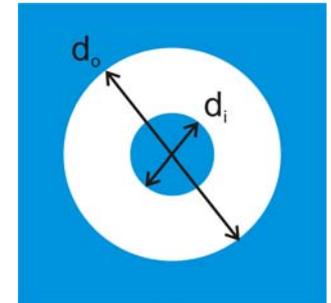
Diminution du diamètre largeur à mi-hauteur du pic plus petite

# Influence de la période



Période augmente    décalage vers le rouge

AAA  
 $d_o = 200$  nm,  
 $d_i = 100$  nm,  
 $h = 100$  nm,  
 substrat verre,  
 couche d'argent.

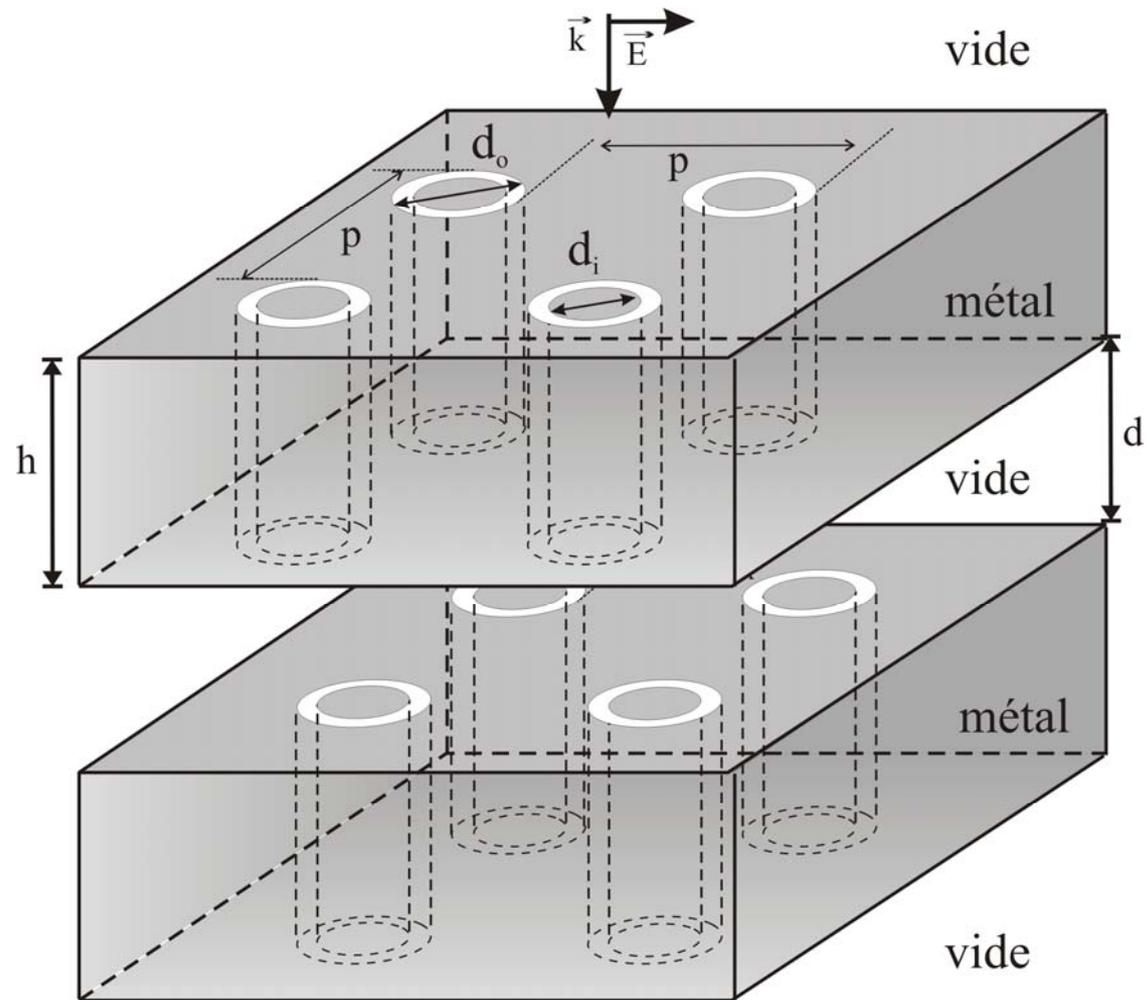


# Plan

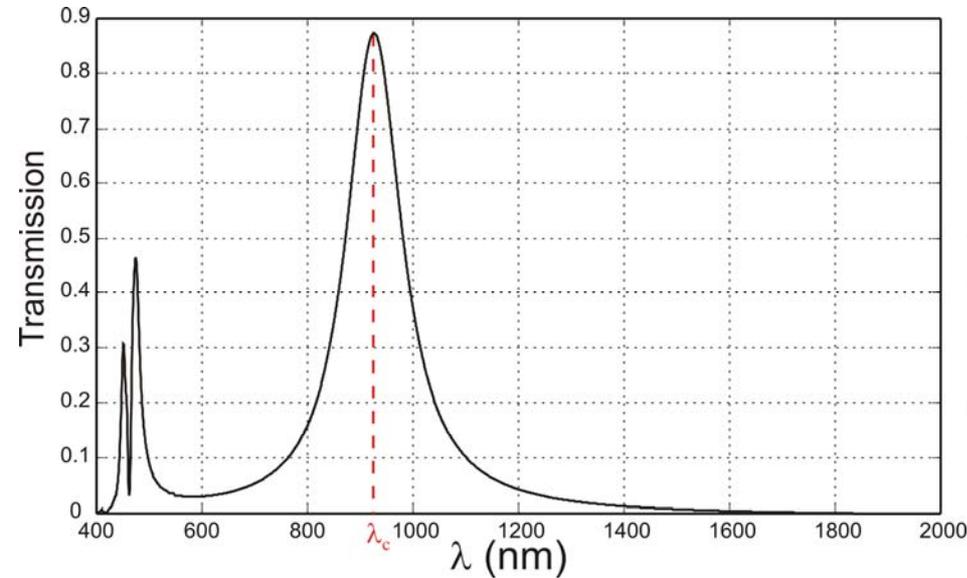
- Introduction
- **Outil numérique**
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - **Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés**
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Cavité Fabry-Pérot

AAA  
 $d_o = 200 \text{ nm}$ ,  
 $d_i = 150 \text{ nm}$ ,  
 $h = 100 \text{ nm}$ ,  
 $p = 350 \text{ nm}$ ,  
 couche d'argent.

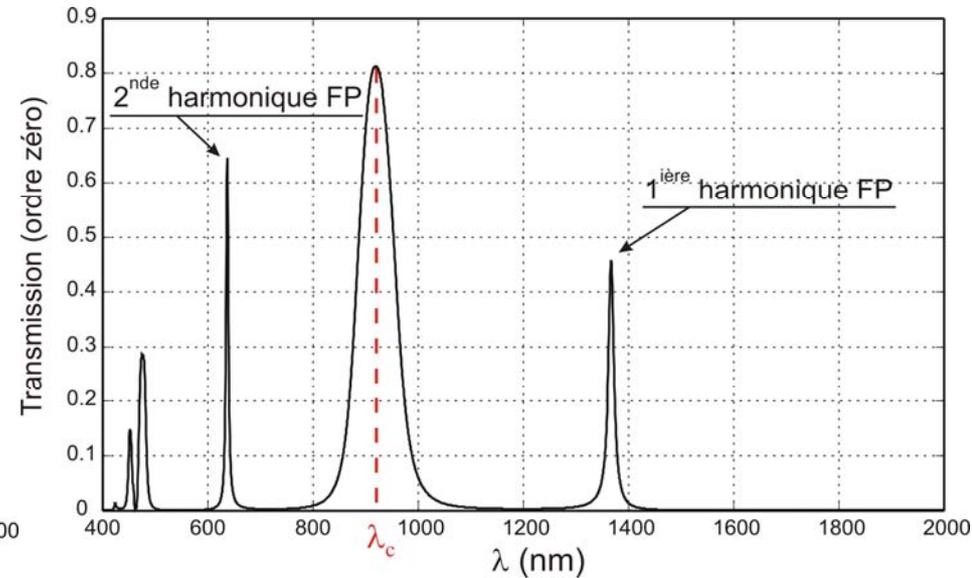


# Cavité Fabry-Pérot



Une couche

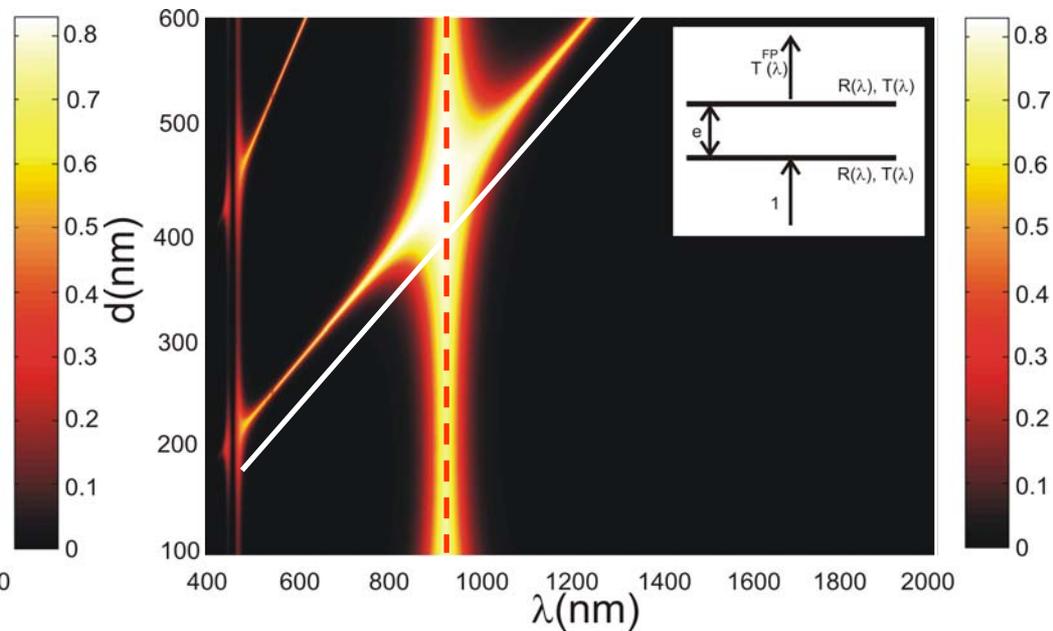
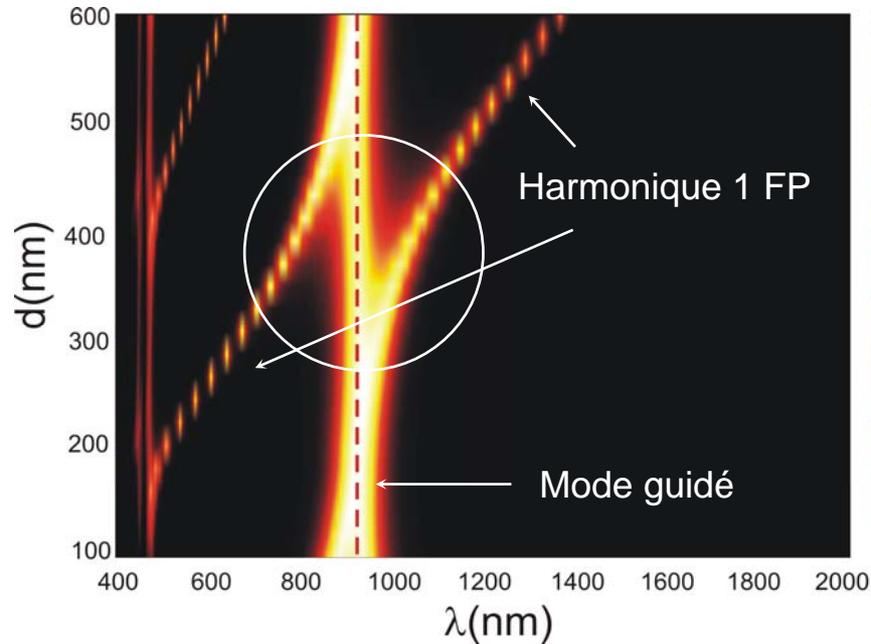
$d = 600 \text{ nm}$



Deux couches

**Mode guidé et résonance de cavité Fabry-Pérot**

# Cavité Fabry-Pérot

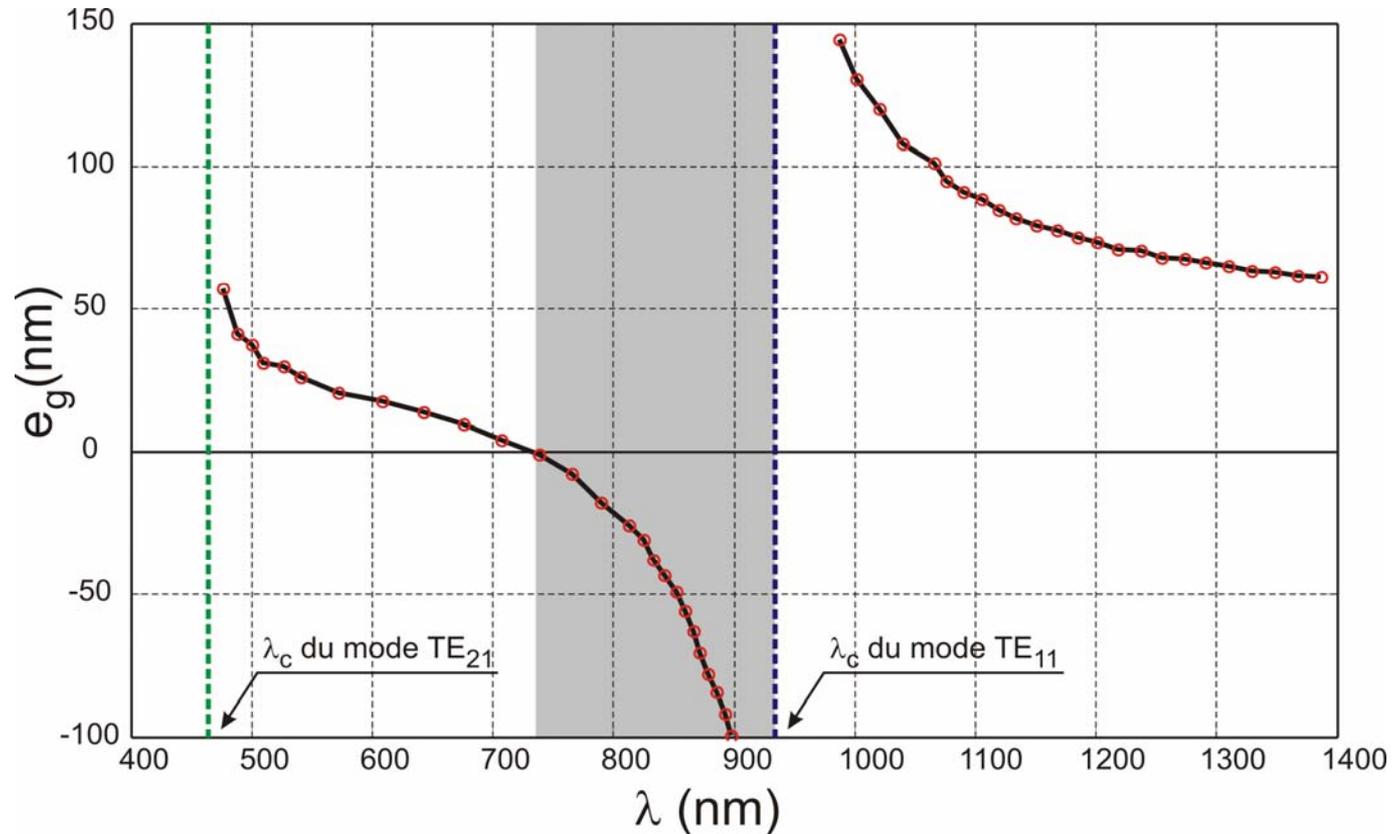


Calcul de la transmission  
en fonction de la distance

$$T^{FP}(\lambda) = \frac{T^2(\lambda)}{[1 - R(\lambda)]^2 + 4R(\lambda) \sin \phi / 2}$$

$$e(\lambda) = d + 2e_m(\lambda) + 2e_g(\lambda)$$

# Cavité Fabry-Pérot



Indice effectif inférieur à 1  $e_g$  négatif

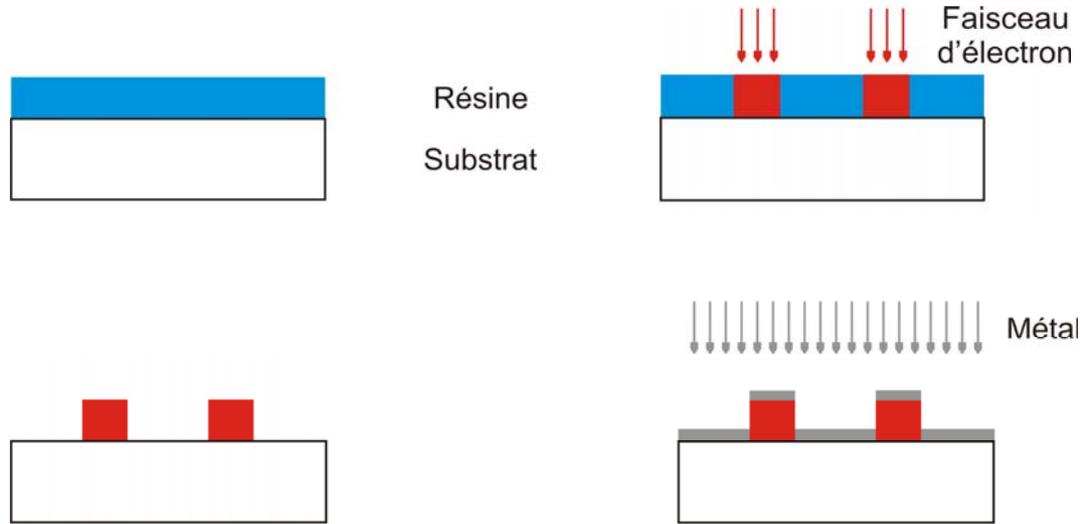
F. Baida, *Phys. Rev. B* **74**, 205419 (2006)

# Plan

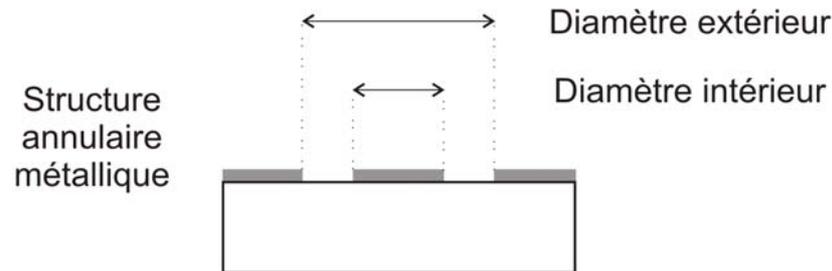
- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Lithographie électronique

Résine négative

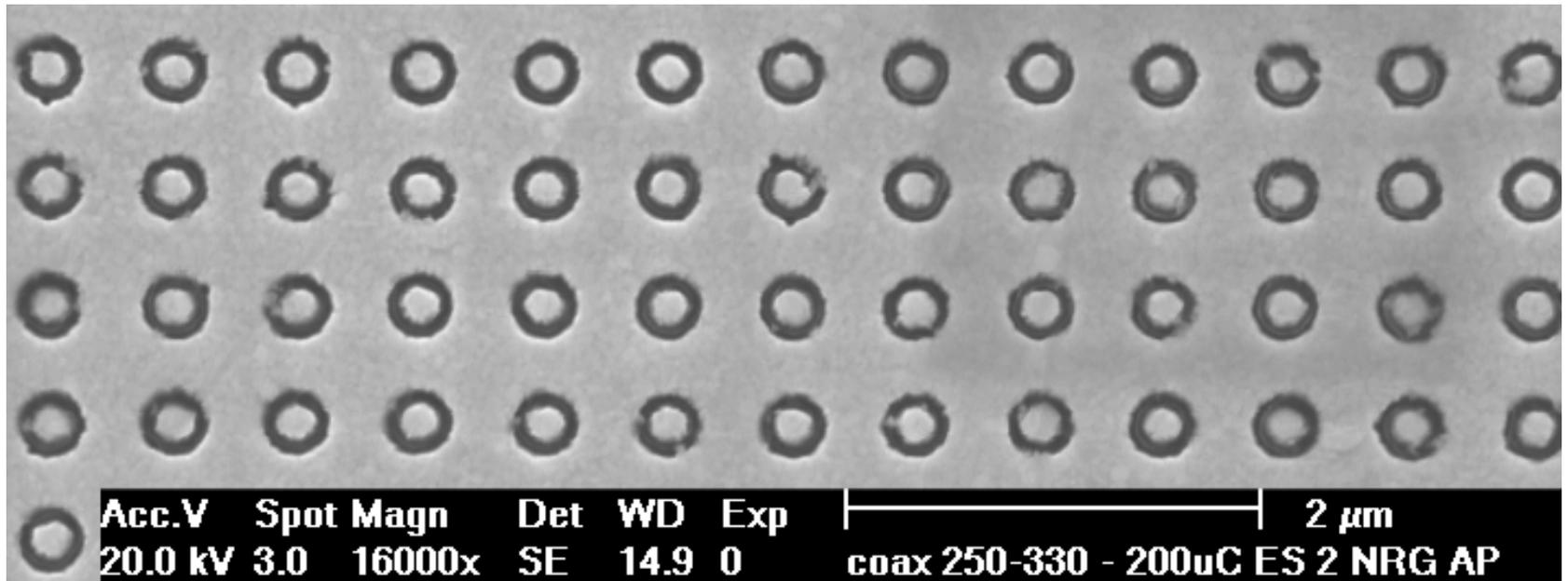


Procédé lift-off



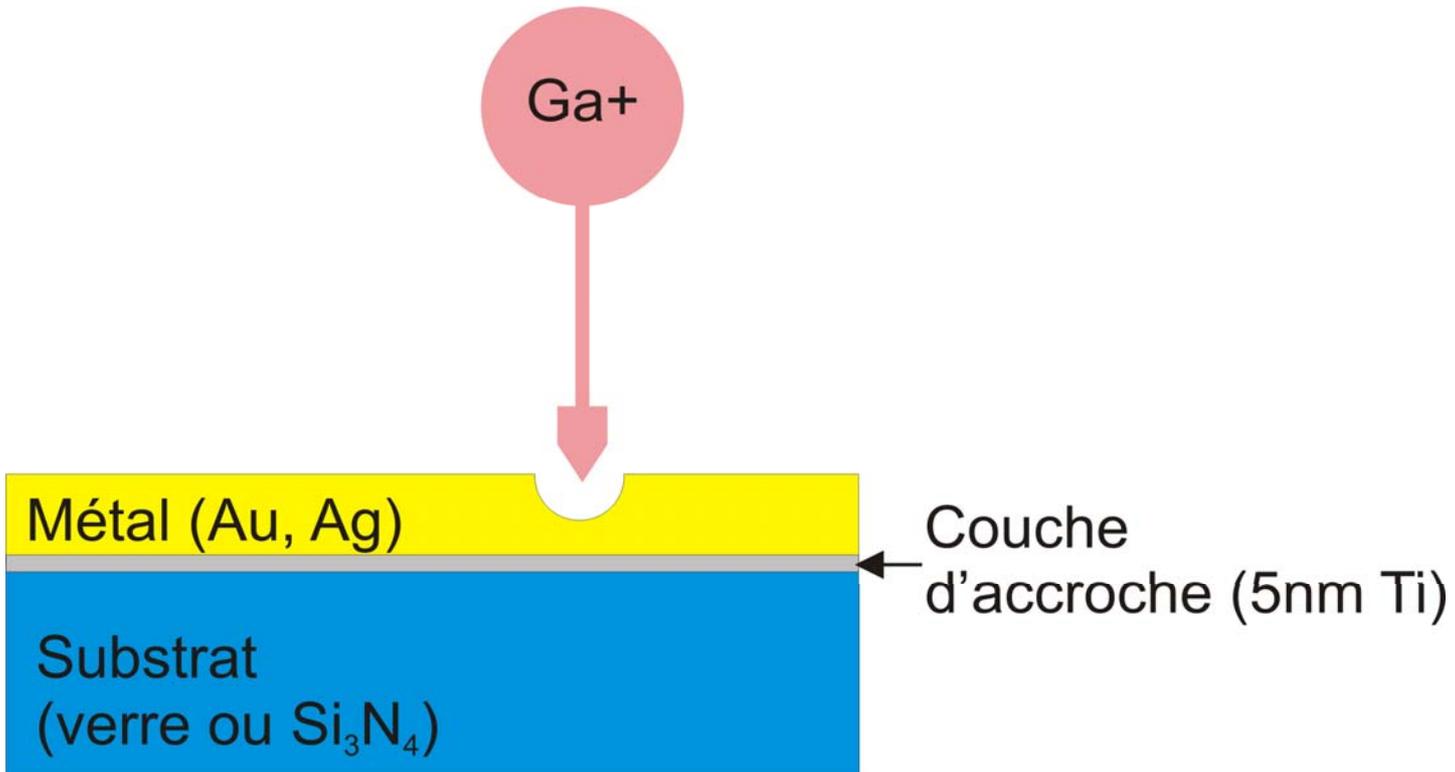
# Lithographie électronique

AAA en or :  $d_o = 330$  nm,  $d_i = 250$  nm,  $p = 600$  nm,  $h = 150$  nm.



Équipe de Patrik Hoffmann

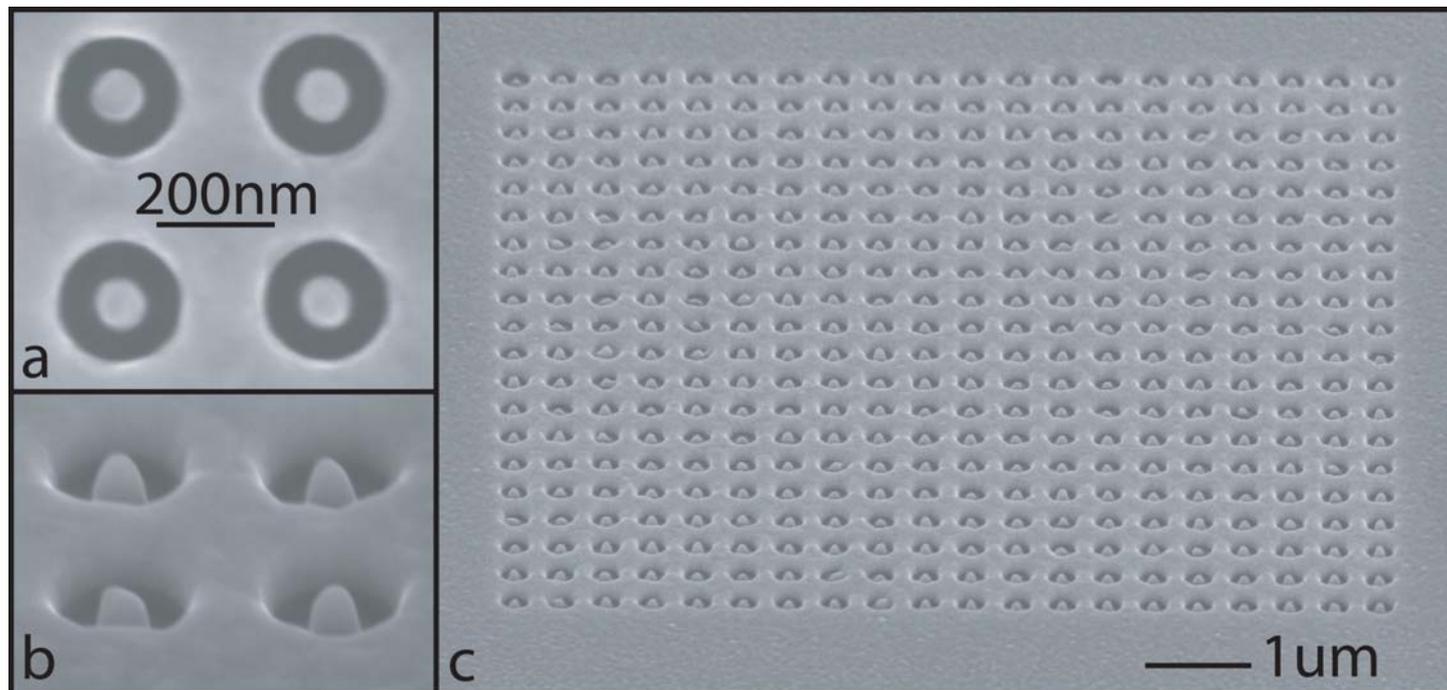
# Gravure ionique



- FIB : 30 kV et 12 pA (faisceau de environ 10 nm de diamètre pour l'EPFL, 30 nm pour MIMENTO)
- Technique rapide et efficace pour obtenir des nano-structures

# Gravure ionique

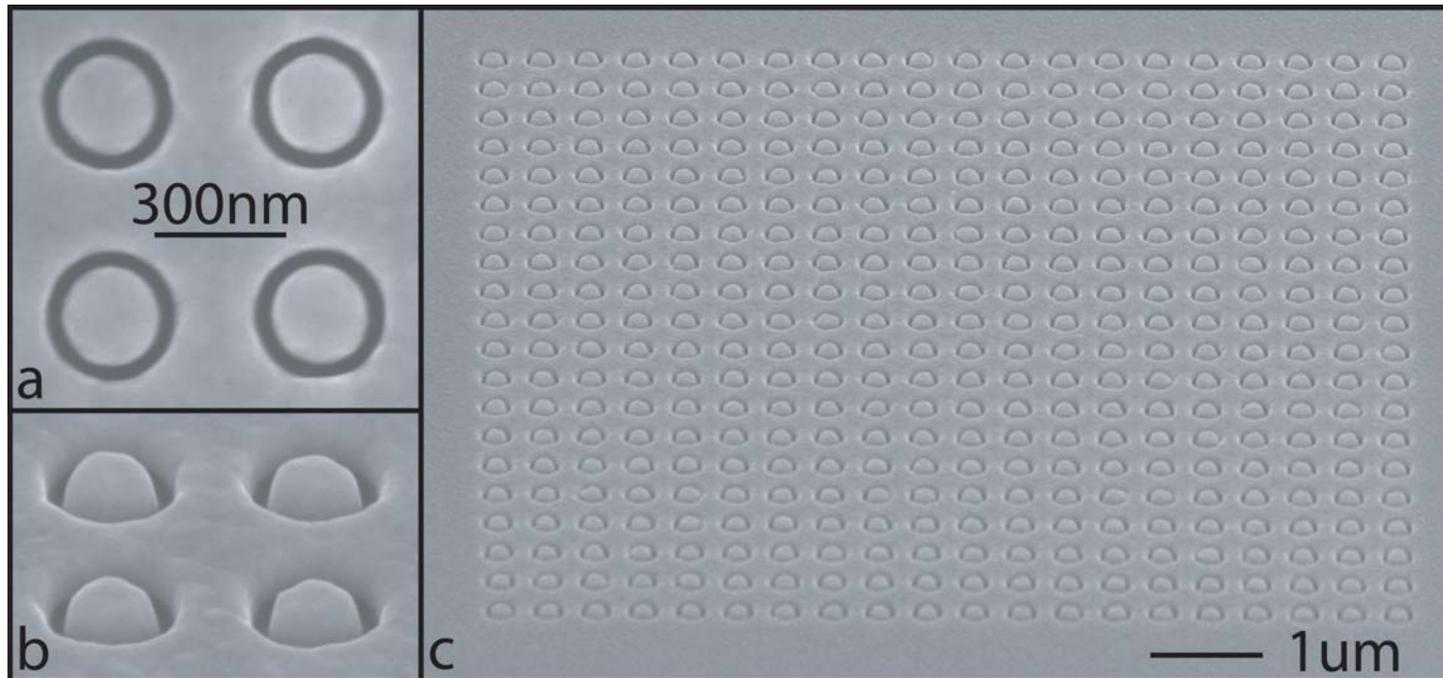
AAA :  $d_o = 200 \text{ nm}$ ,  $d_i = 100 \text{ nm}$ ,  $p = 350 \text{ nm}$ ,  $h = 100 \text{ nm}$ , argent.  
Réalisée à l'EPFL



Images MEB (a): vue de 4 coaxes, (b): vue avec un tilt de  $52^\circ$ , (c): vue de la matrice

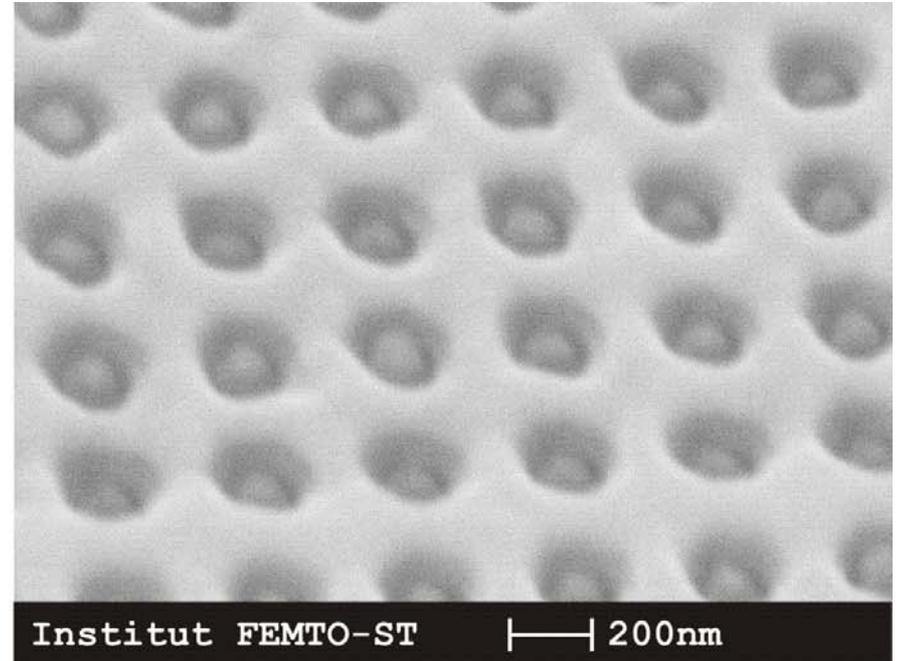
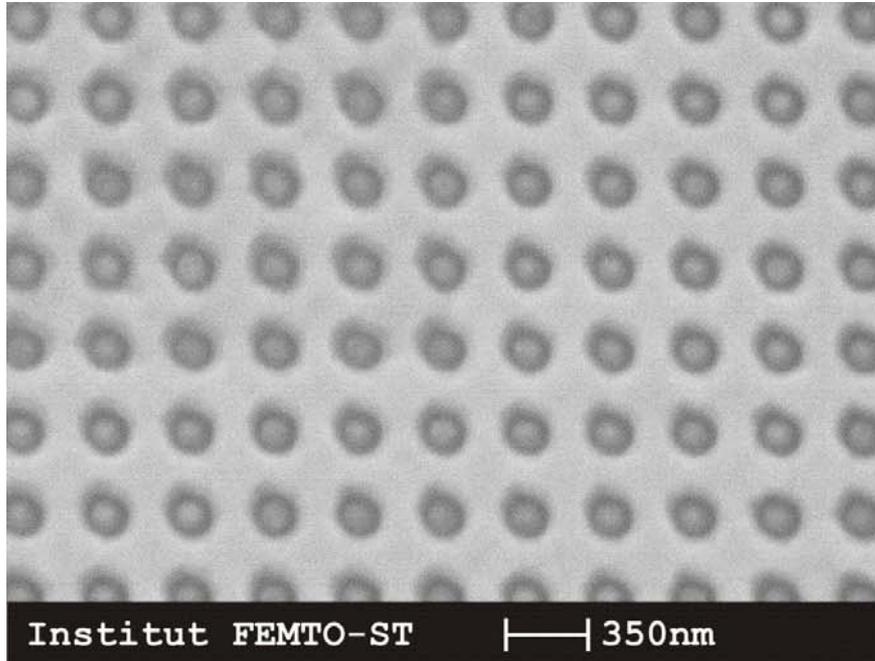
# Gravure ionique

AAA :  $d_o = 330 \text{ nm}$ ,  $d_i = 230 \text{ nm}$ ,  $p = 500 \text{ nm}$ ,  $h = 100 \text{ nm}$ , argent.  
Réalisée à l'EPFL



Images MEB (a): vue de 4 coaxes, (b): vue avec un tilt de 52°, (c): vue de la matrice

# Gravure ionique



Images MEB

AAA :  $d_o = 200 \text{ nm}$ ,  $d_i = 100 \text{ nm}$ ,  $p = 350 \text{ nm}$ ,  $h = 100 \text{ nm}$ , argent.

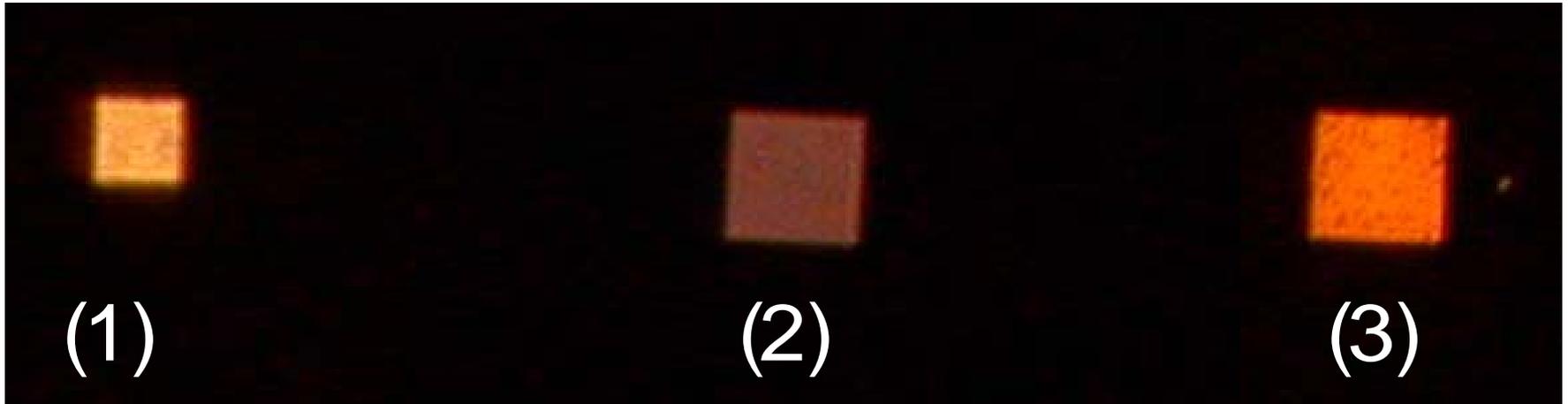
Réalisée à la centrale technologique MIMENTO

# Plan

- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

## Approche qualitative

Images enregistrées à travers un microscope optique classique opérant en transmission (grossissement : x 50)



(1)

**Jaune**

$d_o = 200 \text{ nm},$   
 $d_i = 100 \text{ nm},$   
 $p = 350 \text{ nm}.$

(2)

**Violet**

$d_o = 330 \text{ nm},$   
 $d_i = 230 \text{ nm},$   
 $p = 500 \text{ nm}.$

(3)

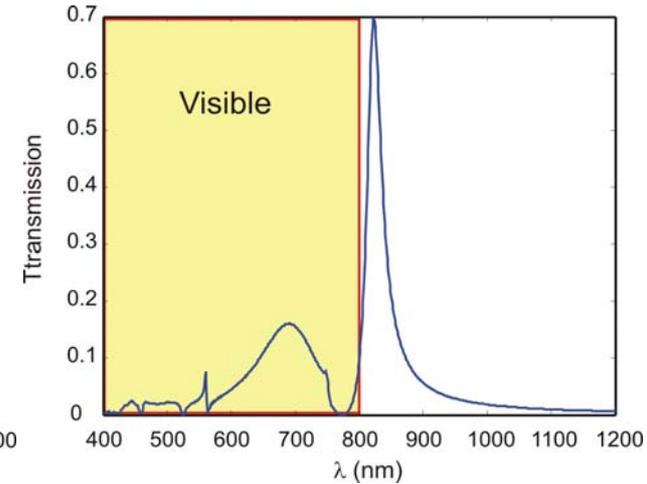
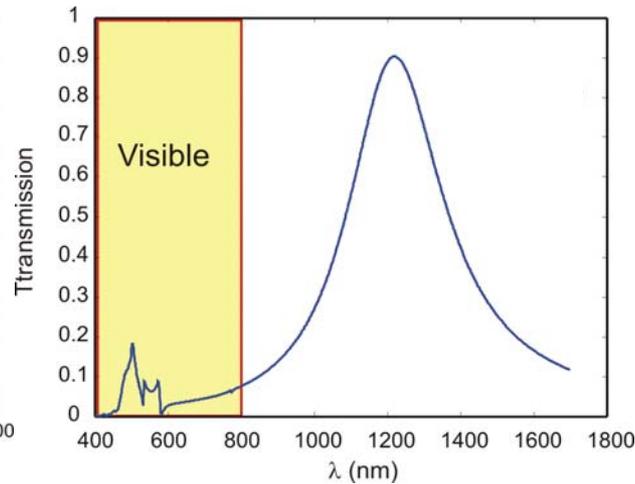
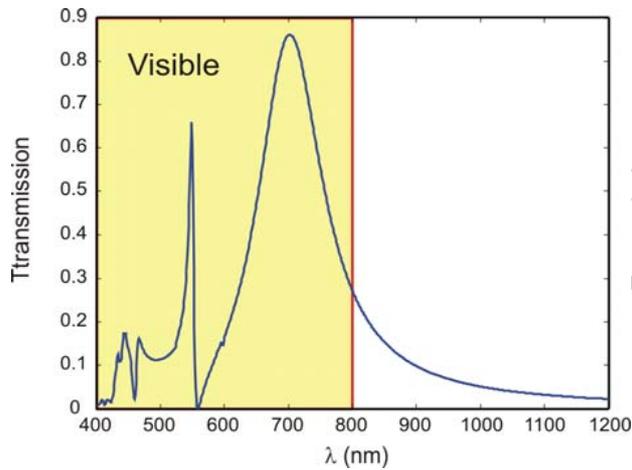
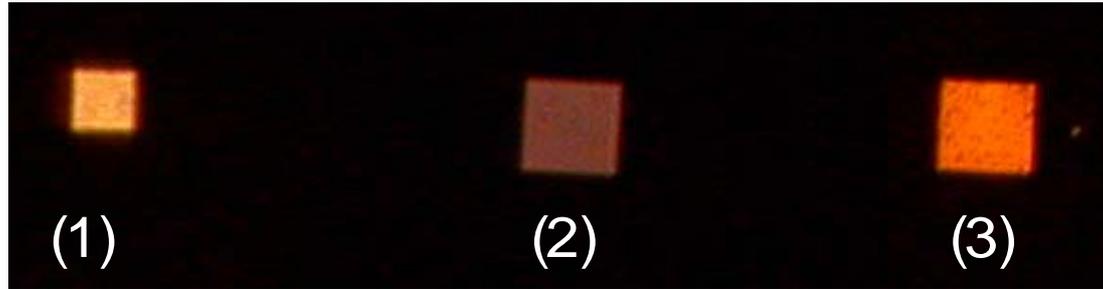
**Orange**

$d_o = 200 \text{ nm},$   
 $d_i = 100 \text{ nm},$   
 $p = 500 \text{ nm}.$

Épaisseur d'argent :  $h = 100 \text{ nm}$

**Les images sont en couleurs réelles**

# Approche qualitative



# Plan

- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- **Résultats expérimentaux**
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - **Résultats en microscopie optique en champ proche**
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Champ proche optique : mode réflexion

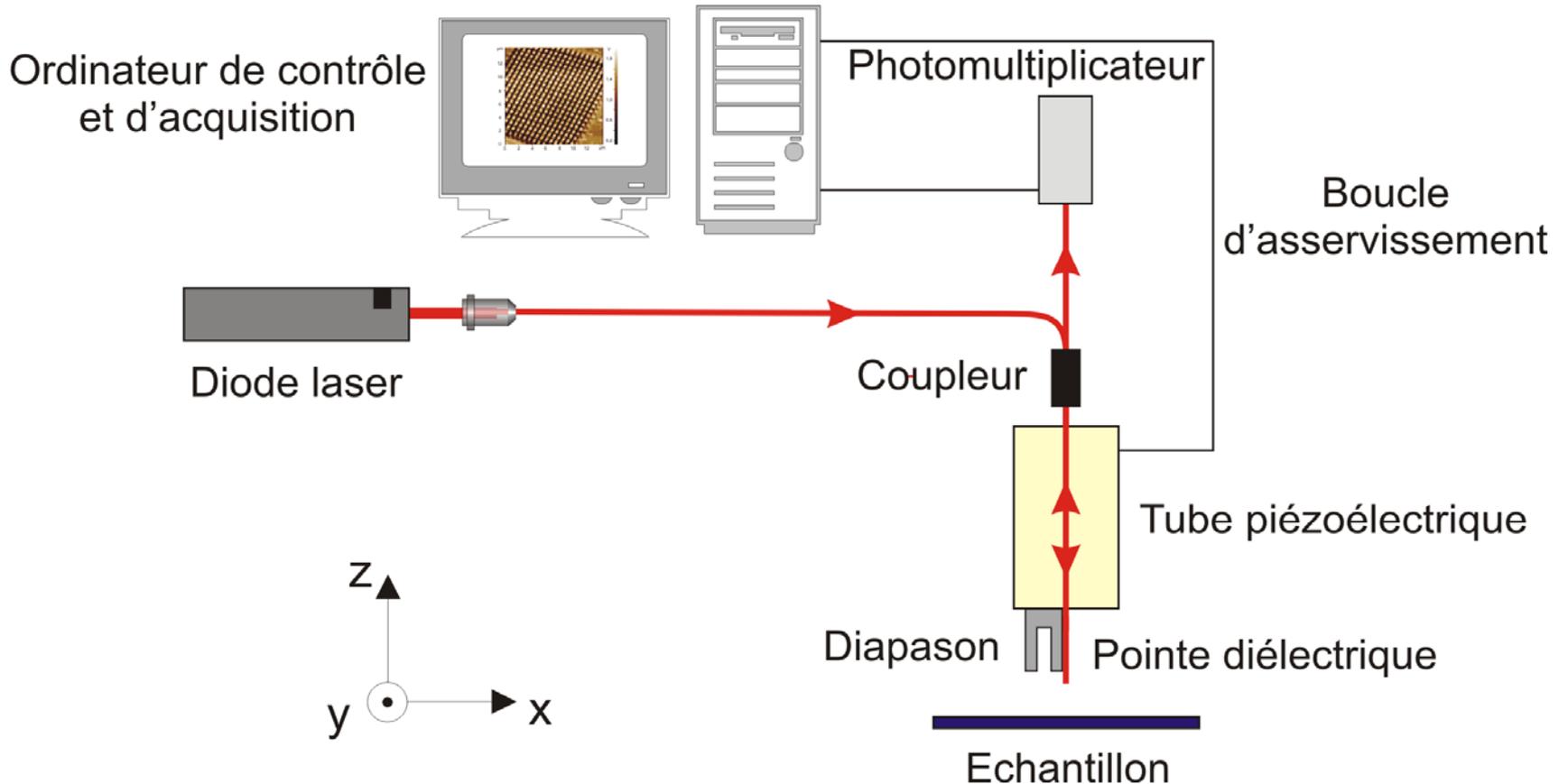
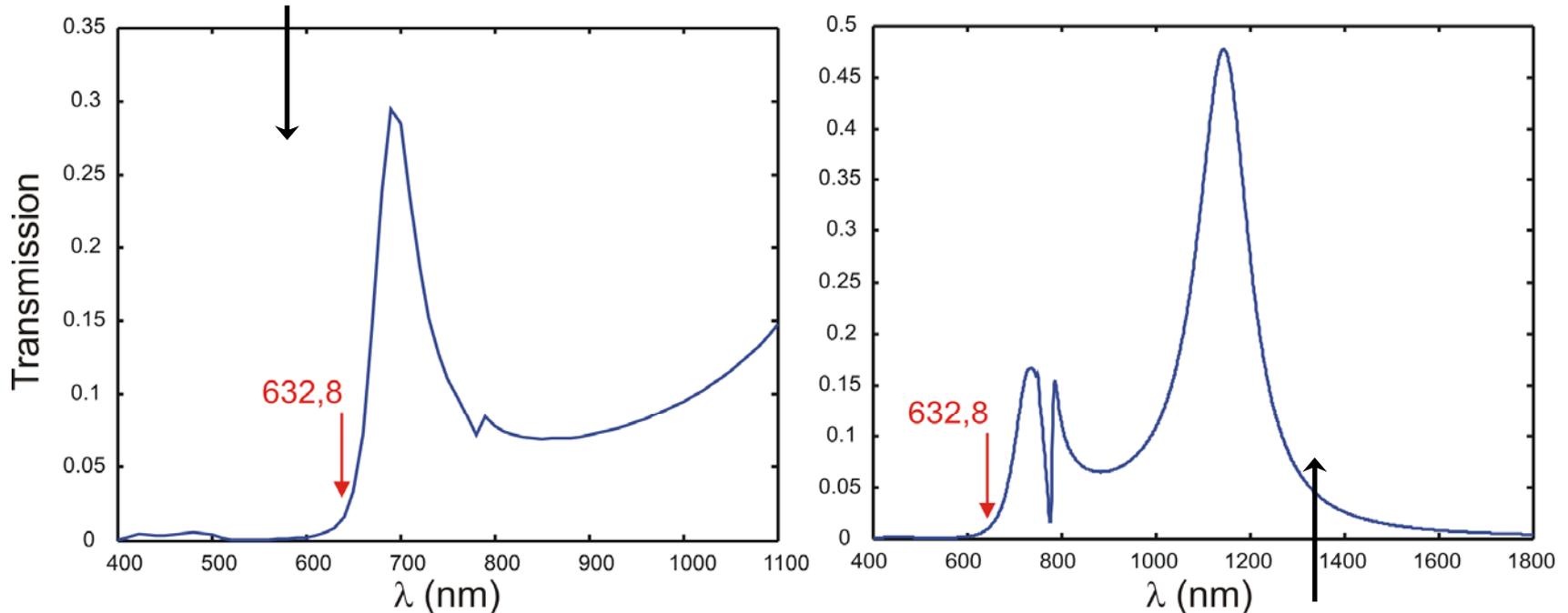


Schéma expérimental : *Reflection Scanning Near-field Optical Microscope*

# Champ proche optique : mode réflexion

AAA en or :  $d_o = 330$  nm,  $d_i = 250$  nm,  $p = 500$  nm,  $h = 150$  nm.



AAA en or :  $d_o = 280$  nm,  $d_i = 200$  nm,  $p = 500$  nm,  $h = 100$  nm.

Spectres de transmission des structures étudiées

# Champ proche optique : mode réflexion

AAA en or :  $d_o = 280$  nm,  $d_i = 200$  nm,  $p = 500$  nm,  $h = 100$  nm.

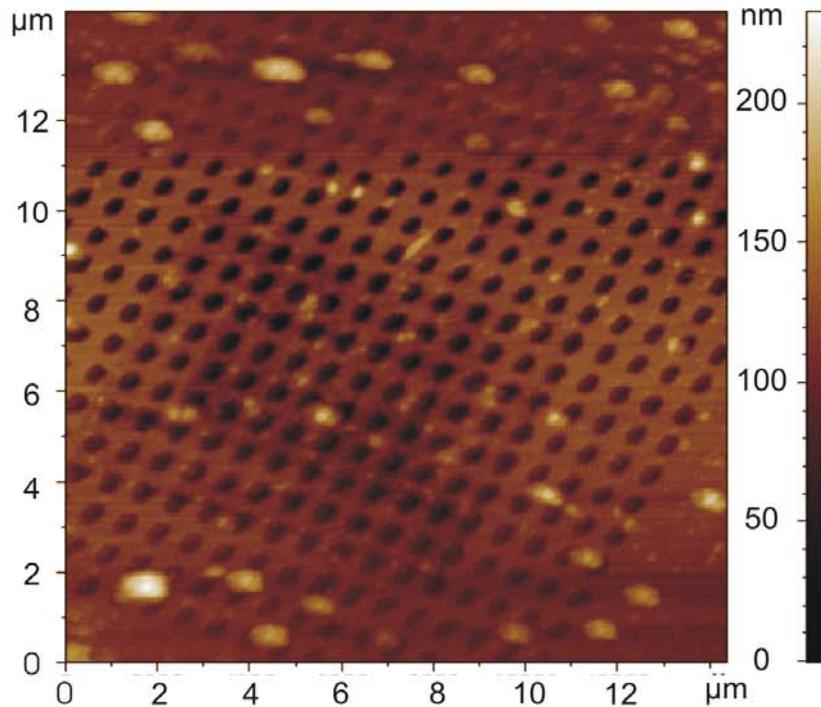


Image topographique ( $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ )

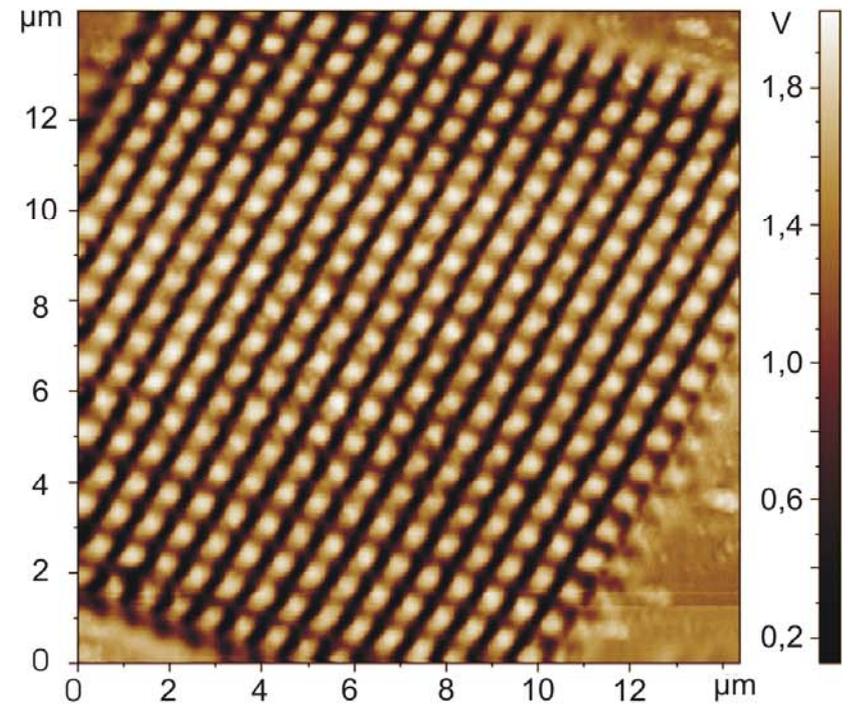


Image optique ( $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ )

# Champ proche optique : mode réflexion

AAA en or :  $d_o = 330$  nm,  $d_i = 250$  nm,  $p = 500$  nm,  $h = 150$  nm.

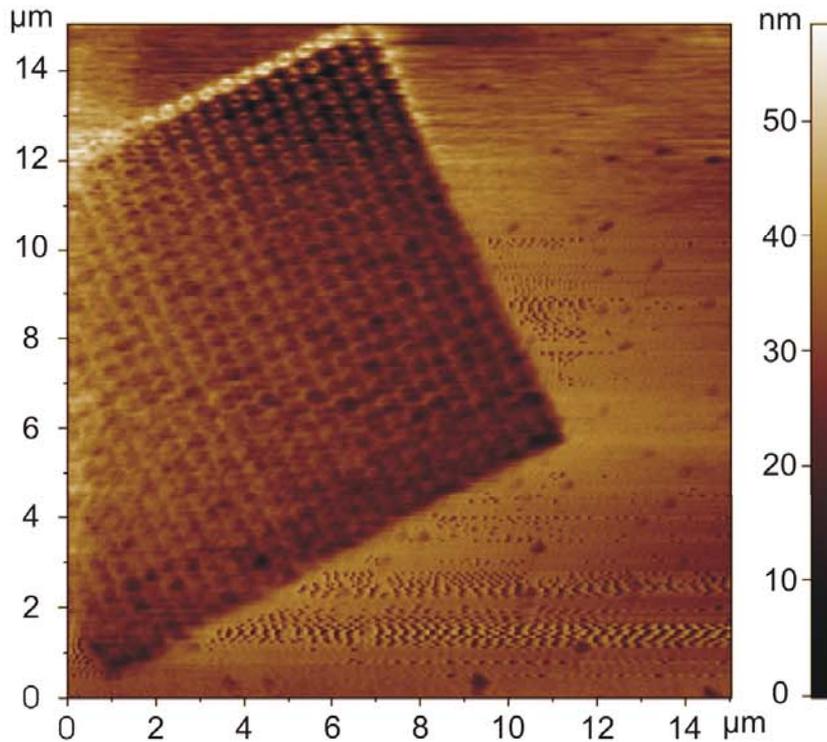


Image topographique ( $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ )

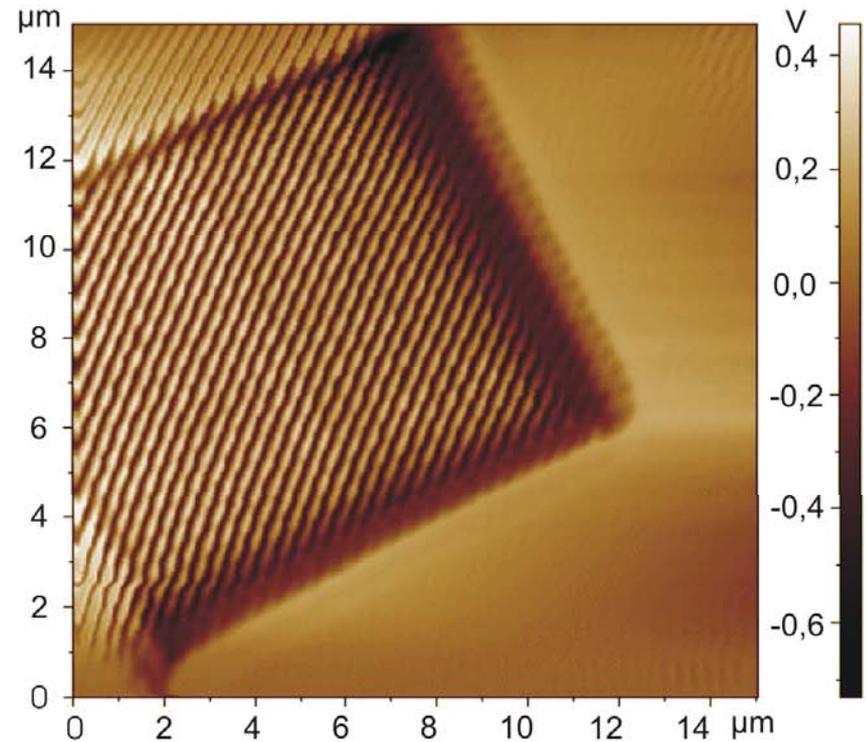
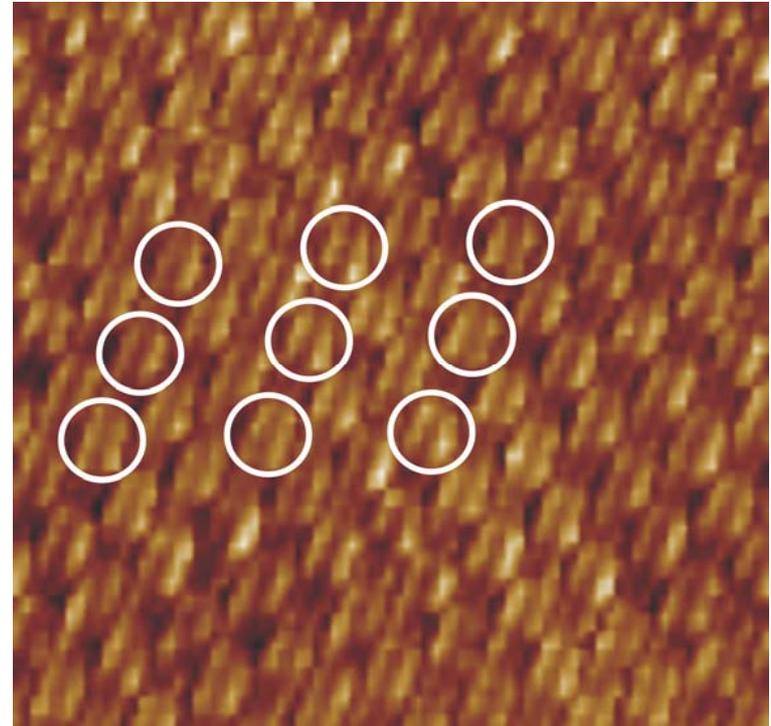
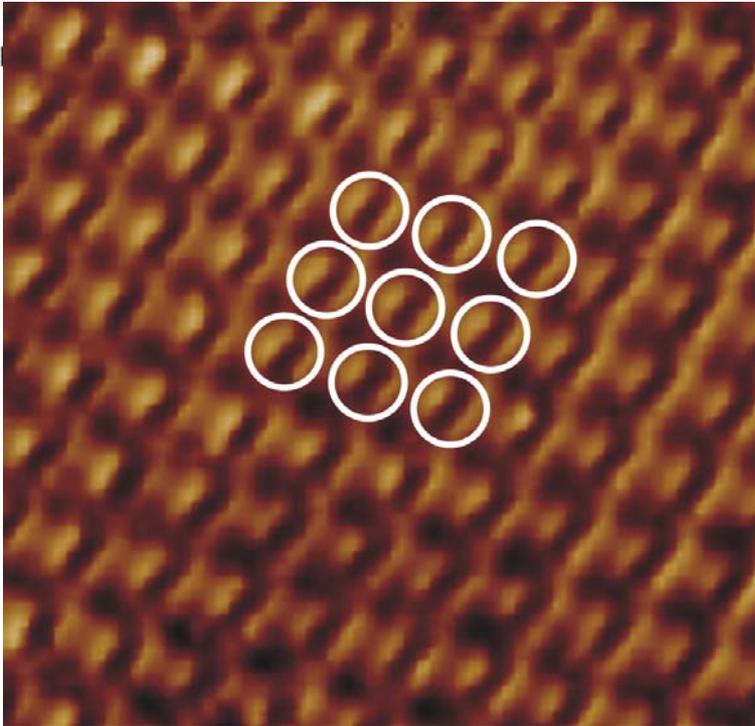


Image optique ( $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ )

# Champ proche optique : mode réflexion



Filtrage par Transformée de Fourier

Y. Poujet *et al.*, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*. **4**, 47-53 (2006)

Y. Poujet *et al.*, à paraître dans *Journal of Microscopy* (2007)

# Champ proche optique : mode réflexion

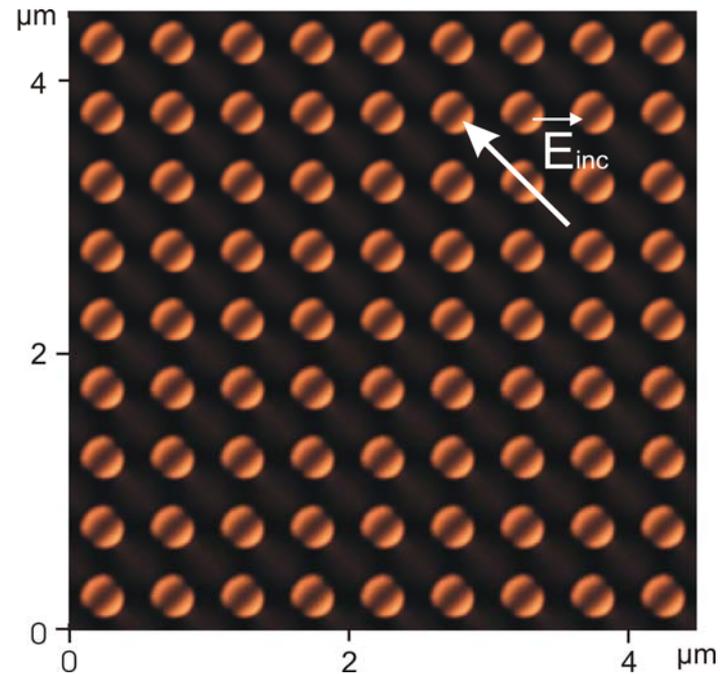
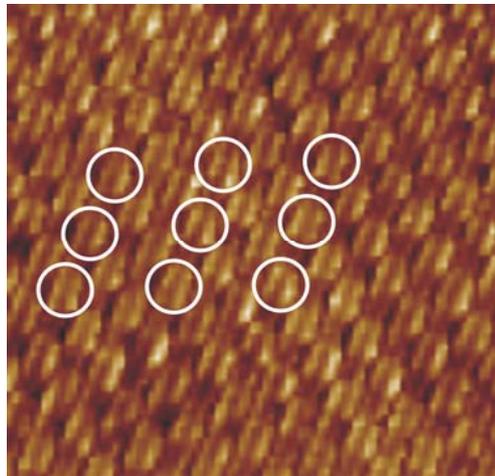
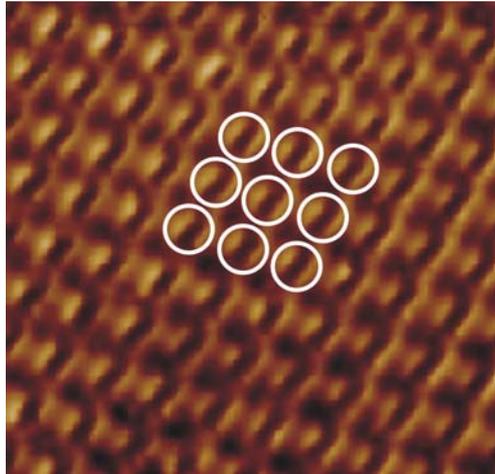


Image théorique de l'intensité  $I$  du champ électrique au dessus de l'échantillon (30 nm)

= +

# Champ proche optique : mode transmission

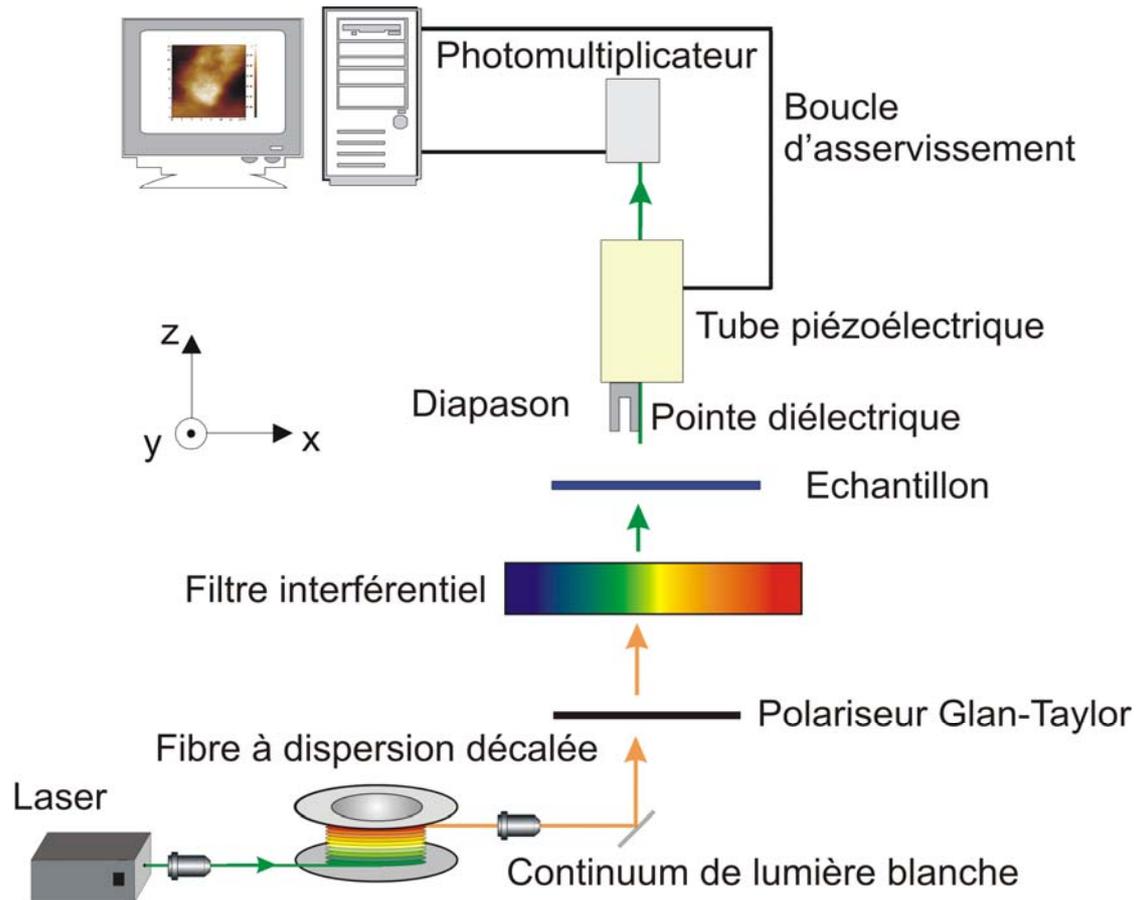
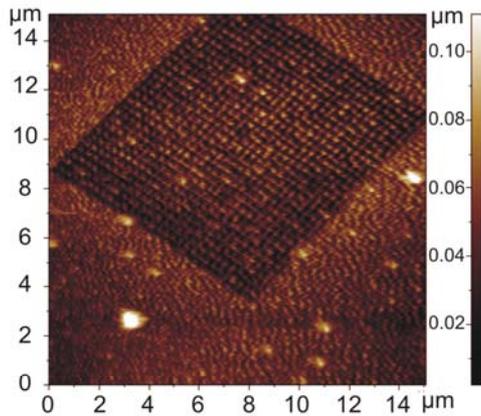
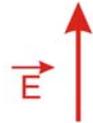


Schéma expérimental

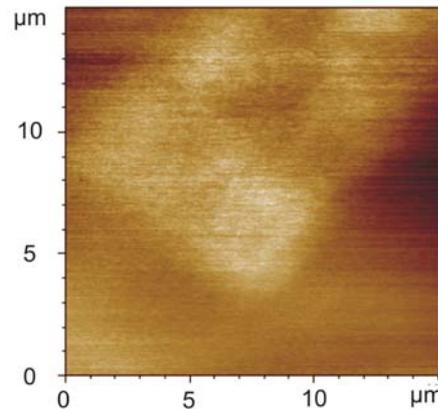
# Champ proche optique : mode transmission



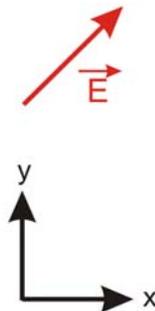
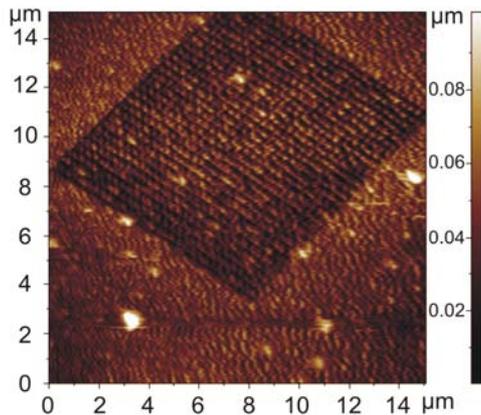
Images shear-force



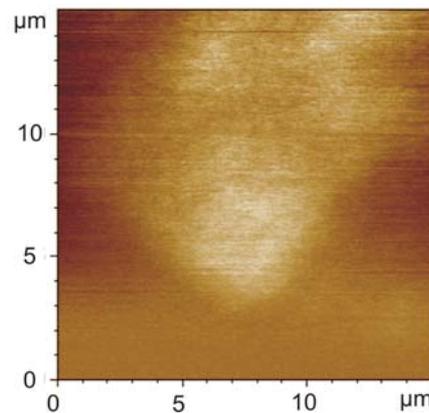
Polarisation de l'onde incidente



Images optiques



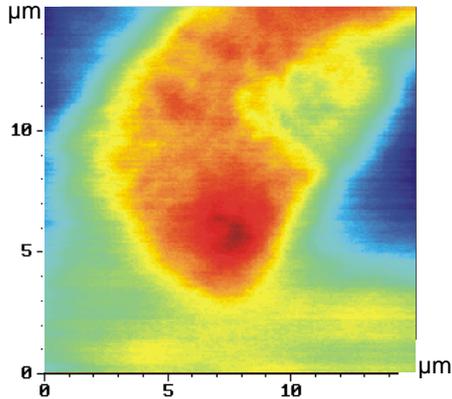
Influence de la polarisation



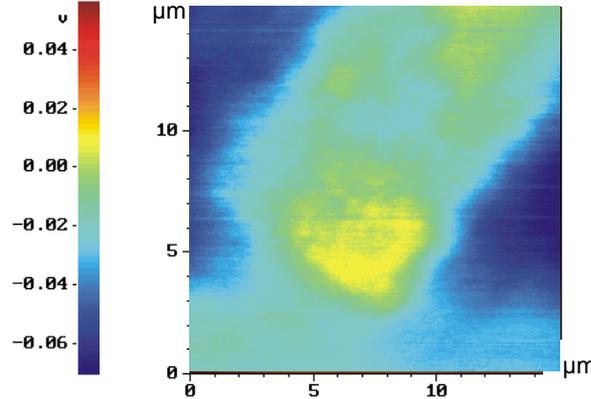
AAA  
 $d_o = 200 \text{ nm}$ ,  
 $d_i = 100 \text{ nm}$ ,  
 $h = 125 \text{ nm}$ ,  
 $p = 500 \text{ nm}$ ,  
 couche d'argent.

$\lambda \sim 622 \text{ nm}$

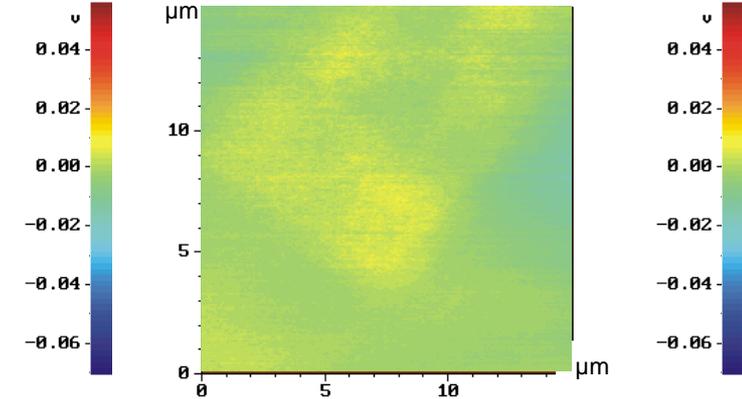
# Champ proche optique : mode transmission



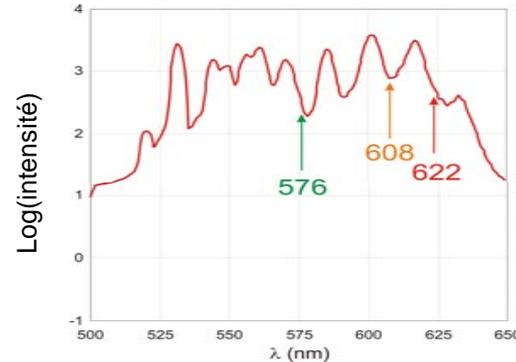
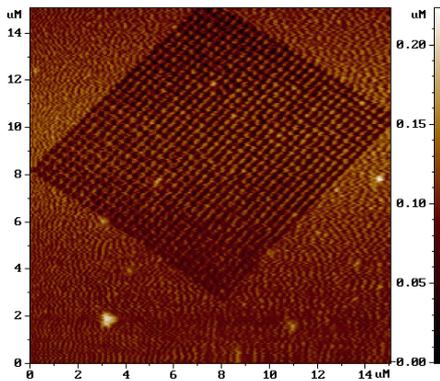
$\lambda \sim 576 \text{ nm}$



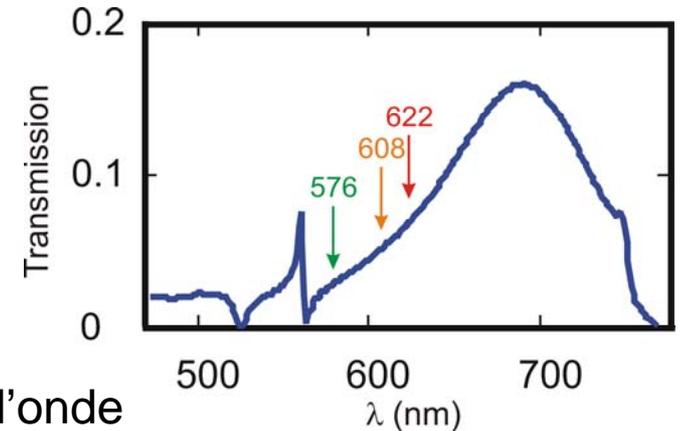
$\lambda \sim 608 \text{ nm}$



$\lambda \sim 622 \text{ nm}$



Influence de la longueur d'onde

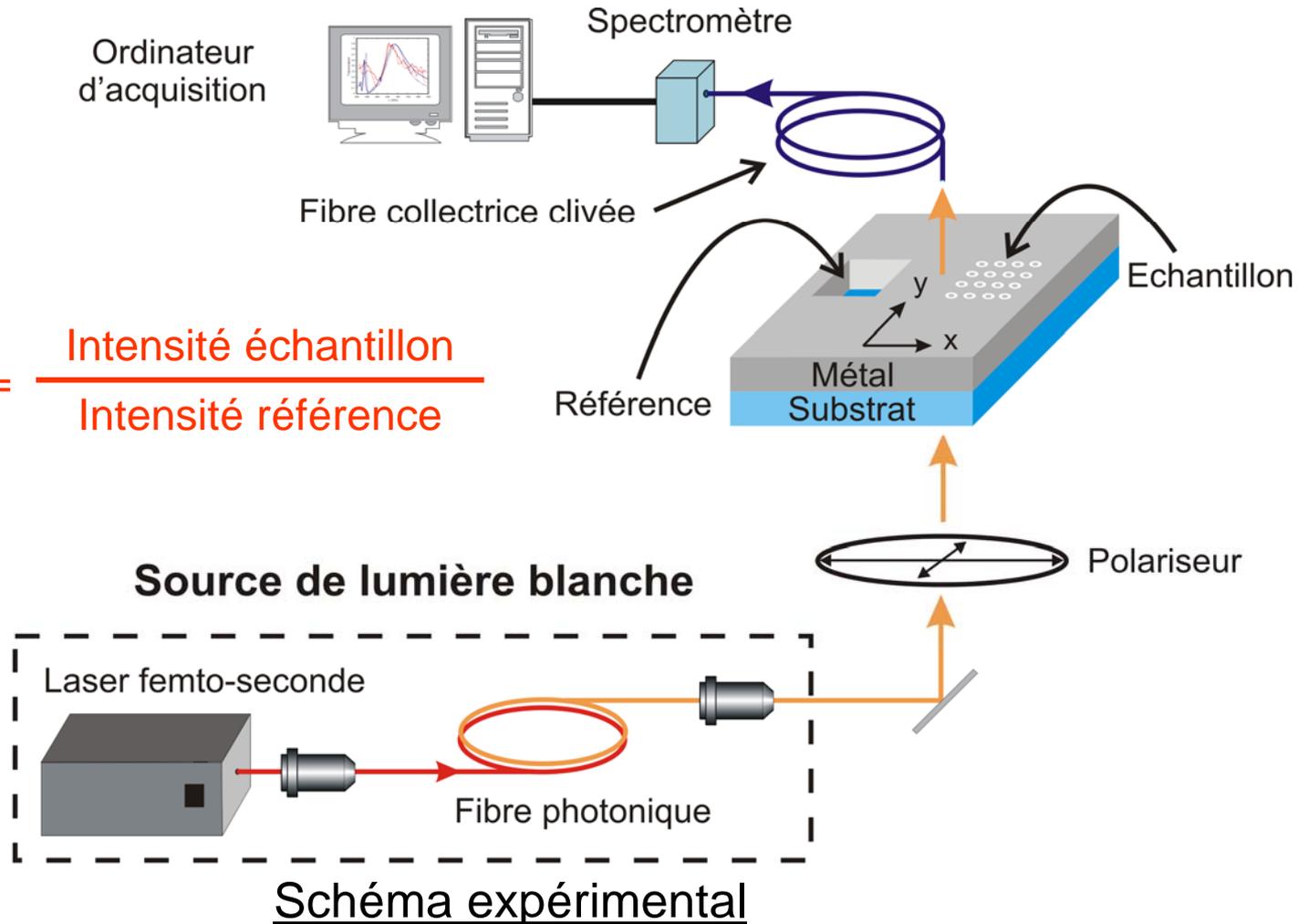


# Plan

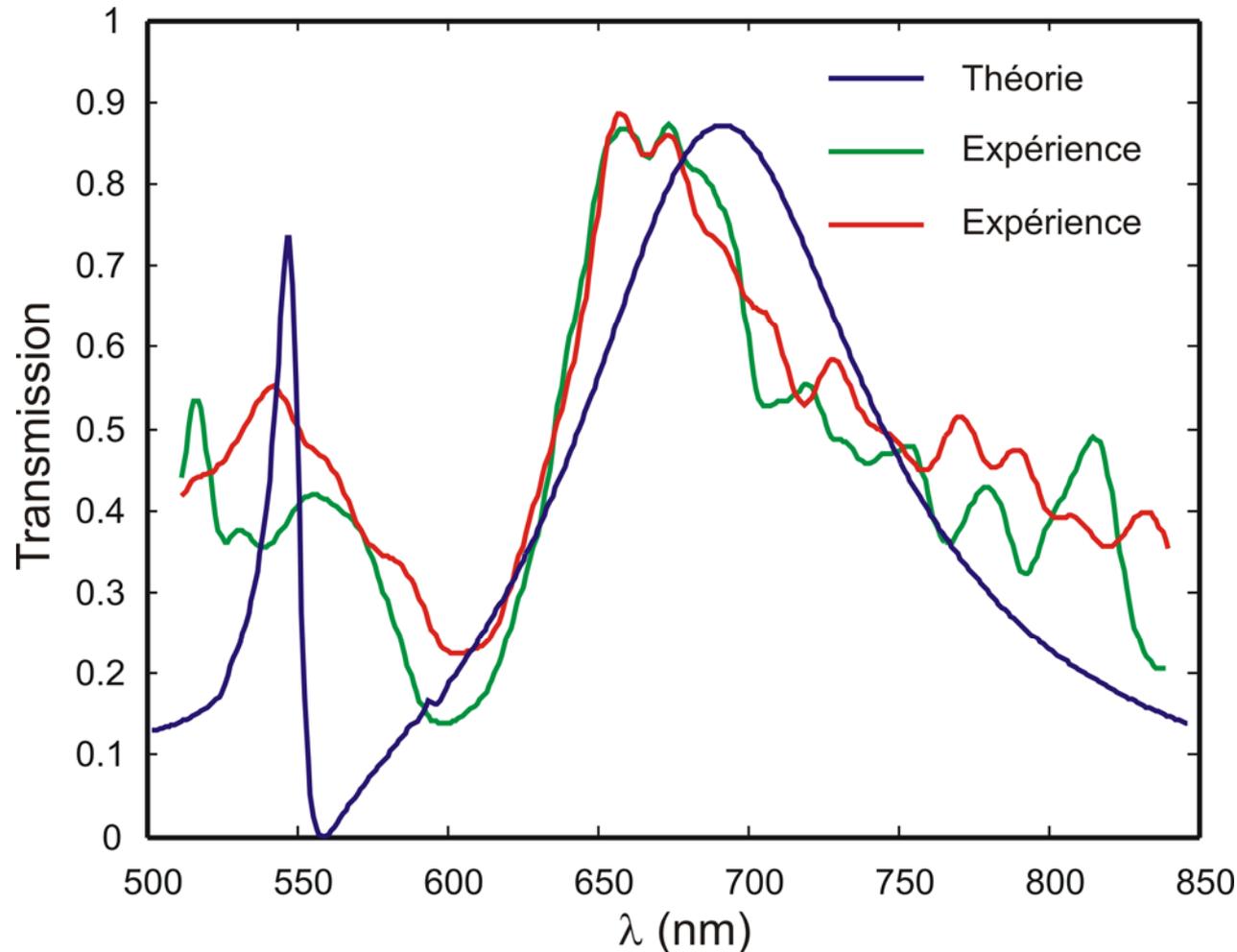
- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

# Etude spectrale

$$\text{Transmission} = \frac{\text{Intensité échantillon}}{\text{Intensité référence}}$$



# Etude spectrale



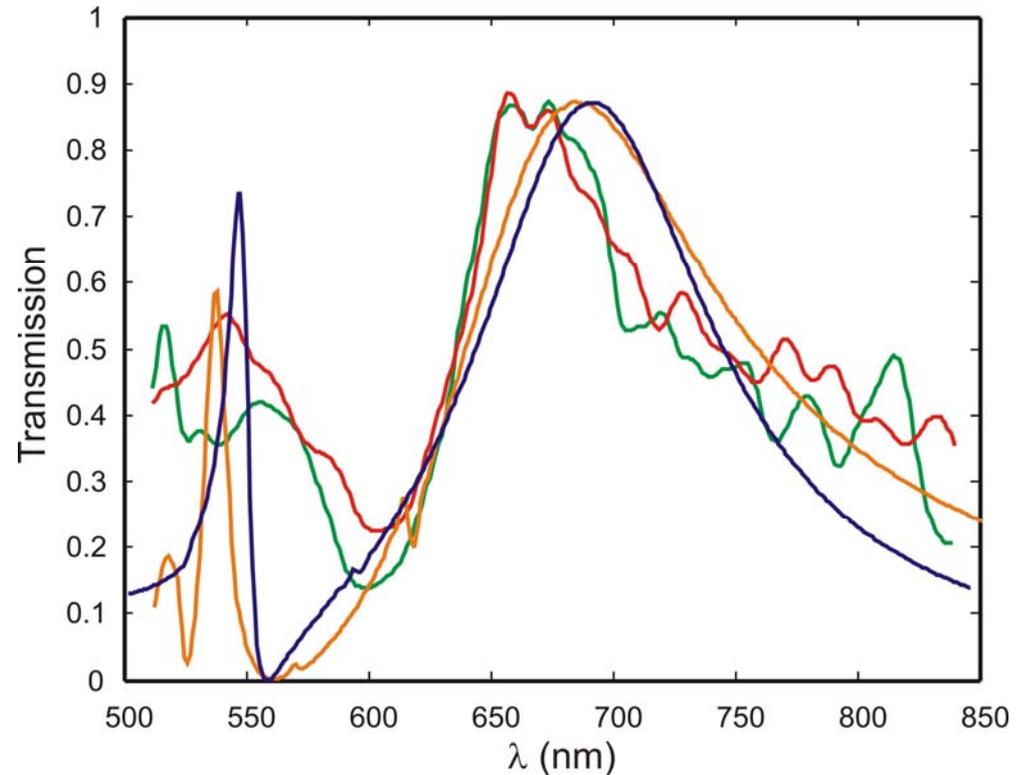
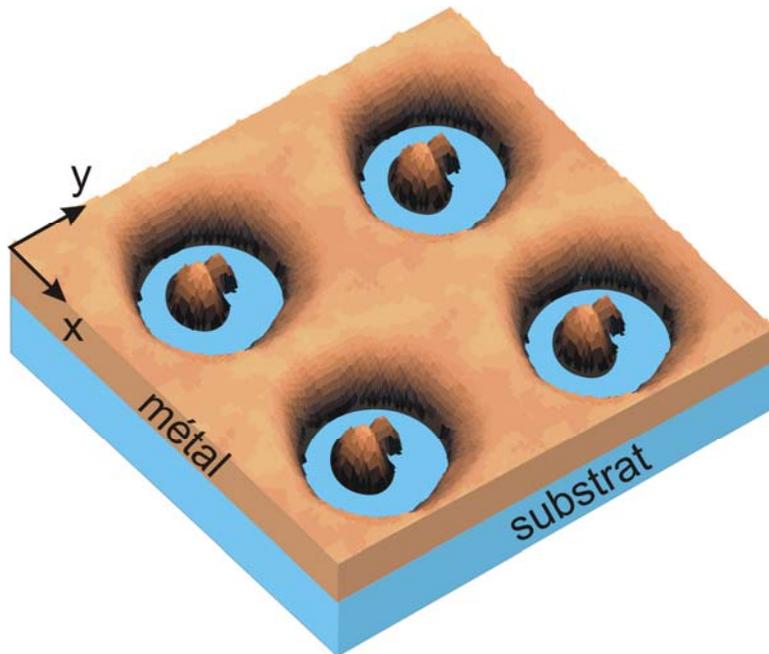
AAA

$d_o = 200$  nm,  
 $d_i = 100$  nm,  
 $h = 100$  nm,  
 $p = 350$  nm,  
couche d'argent.

30x30 périodes

40x40 périodes

# Etude spectrale



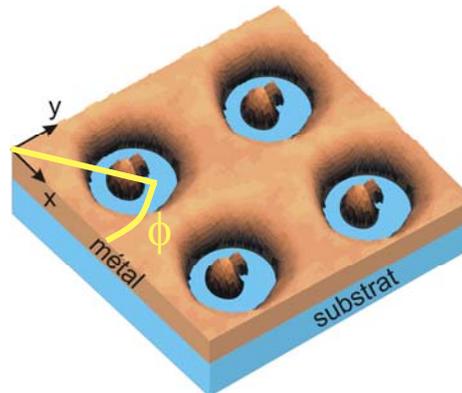
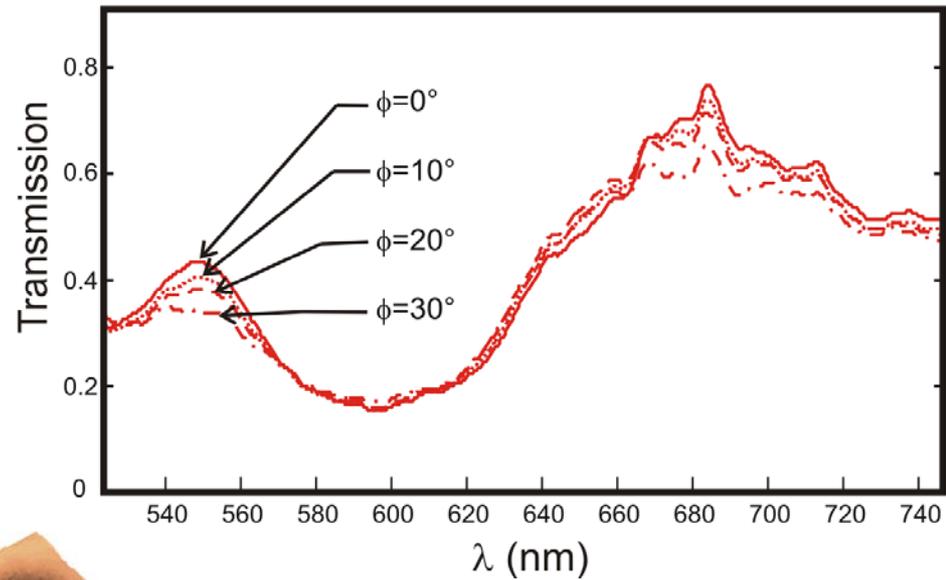
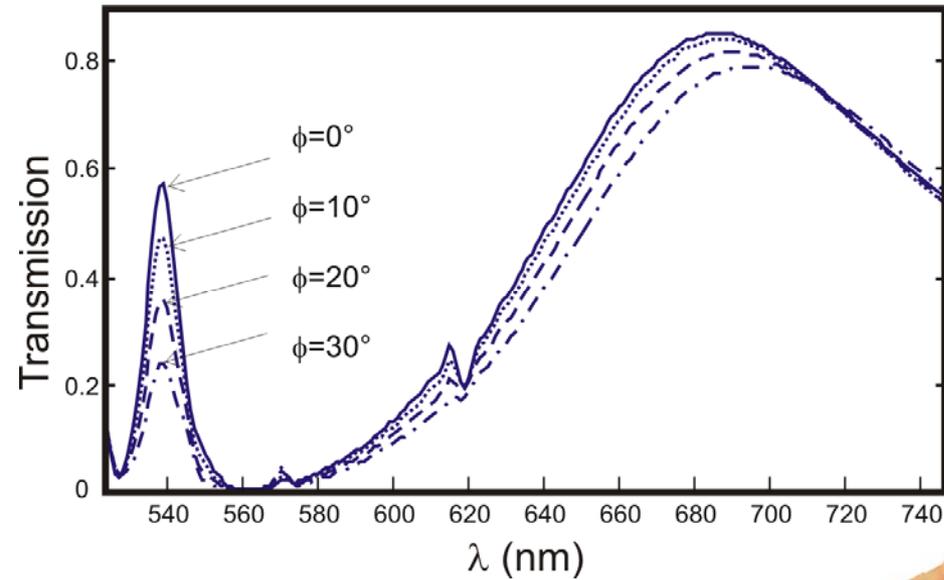
Influence de la dimension finie de la matrice

Y. Poujet *et al.*, *Optics Letters* **32** (20), 2432-2434 (2006)

Bravo-Abad *et al.*, *Phys. Rev. Letters* **93**, 22741 (2004)

# Etude spectrale

Influence de la polarisation



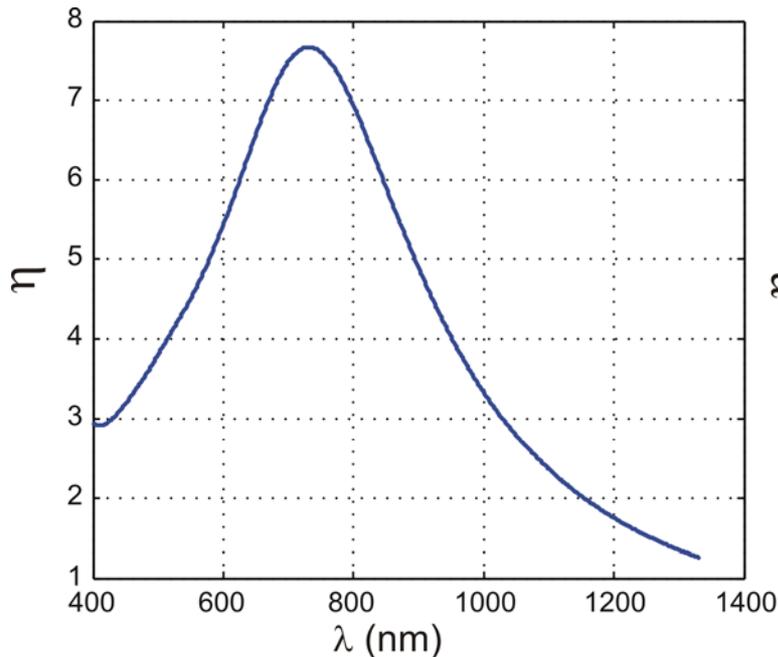
# Plan

- Introduction
- Outil numérique
  - Méthode de calcul
  - Influence des paramètres géométriques
  - Cavité Fabry-Pérot à miroirs nanostructurés
- Résultats expérimentaux
  - Fabrication des structures annulaires
  - Approche qualitative
  - Résultats en microscopie optique en champ proche
  - Etude spectrale
- Perspectives et conclusion

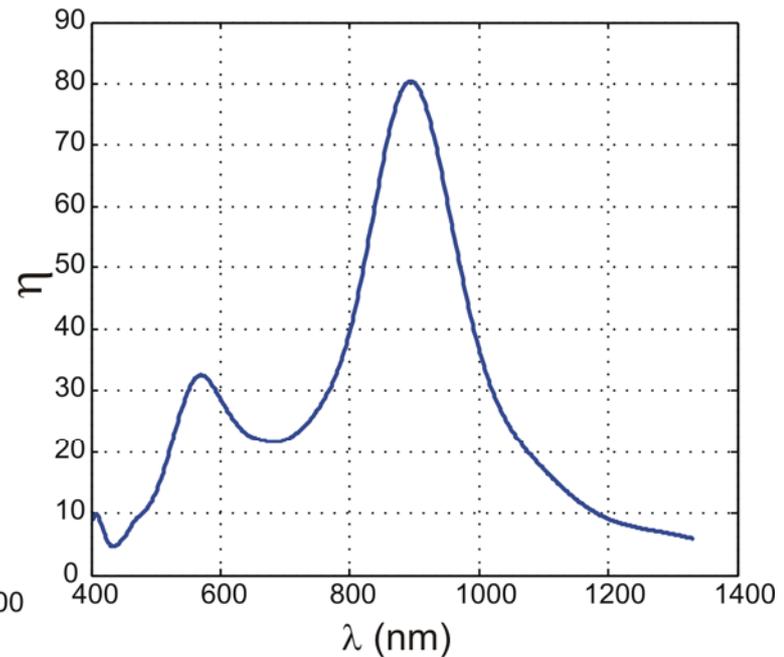
# Perspectives

Utilisation de l'**exaltation de champ** dans la cavité annulaire pour l'étude de la fluorescence de molécule

Argent  $h = 150$  nm



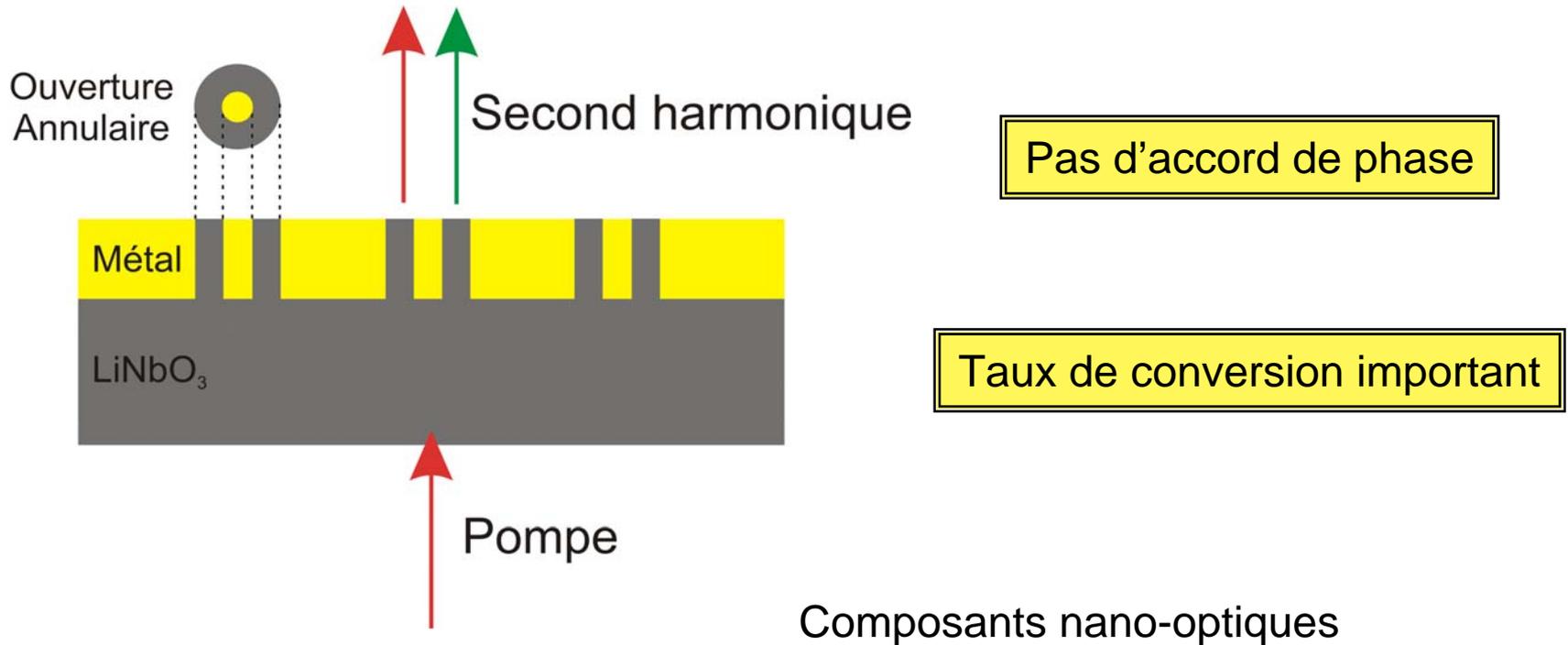
Ouverture cylindrique  
 $d = 200$  nm.



Ouverture annulaire  
 $d_o = 200$  nm,  $d_i = 100$  nm.

# Perspectives

Utilisation de l'**exaltation de champ** dans la cavité annulaire pour la génération de second harmonique

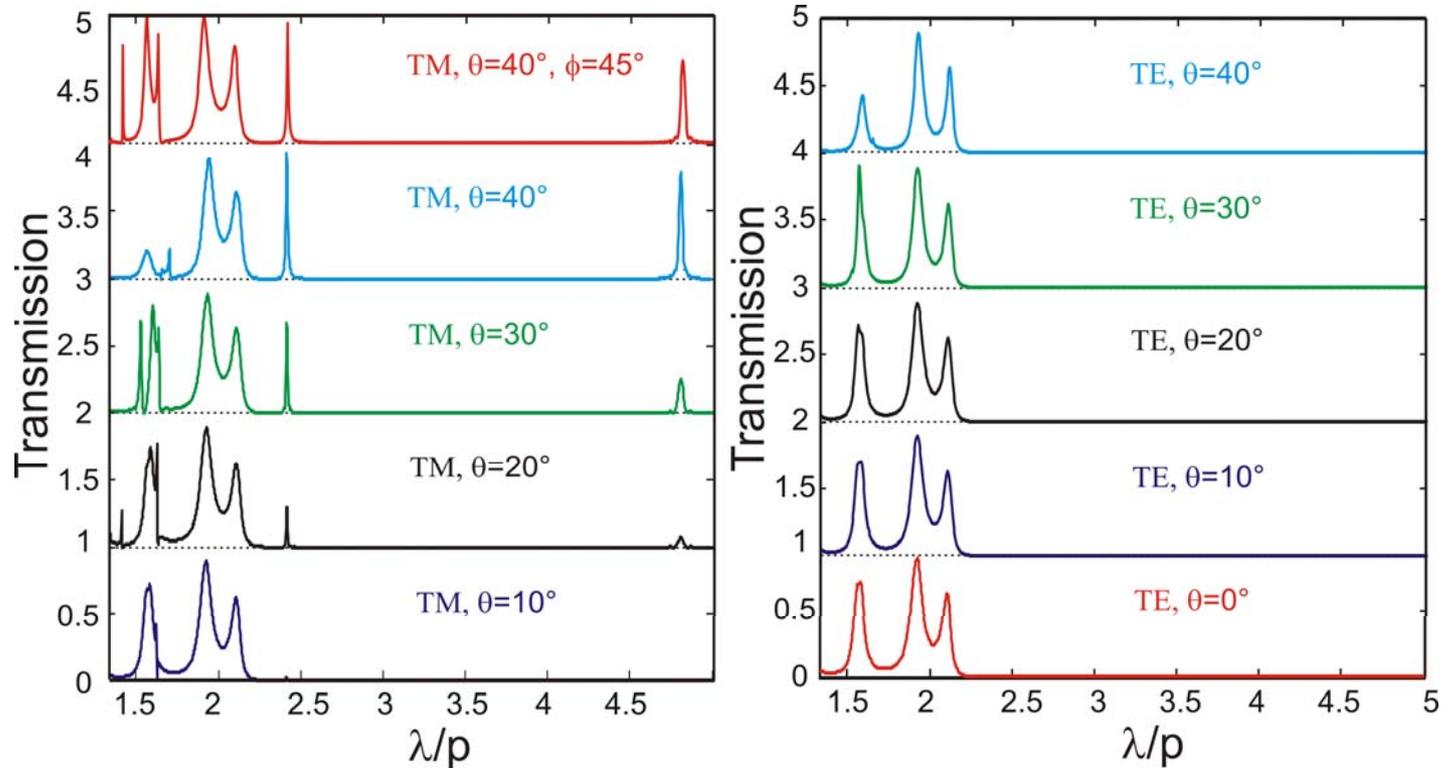


# Perspectives

## Excitation expérimentale du mode TEM

$\theta$  : angle d'incidence

$\phi$  : angle azimutal



Pas de longueur d'onde de coupure

Pic de transmission fin

F. Baida, *Applied Physics B* **89**, 145-149 (2007)

# Conclusion

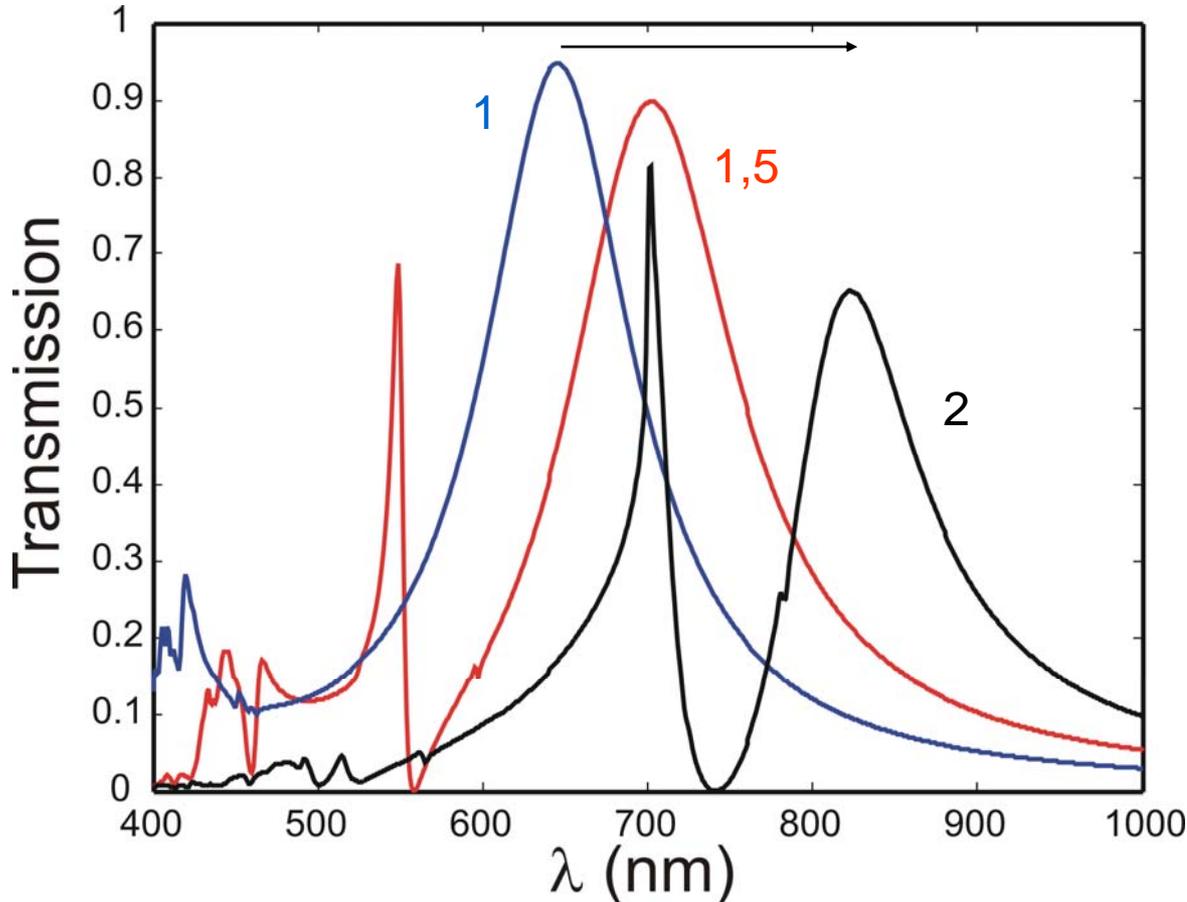
- Réalisation de nombreux objectifs : fabrication, simulation et caractérisation

Mise en évidence du mode guidé TE<sub>11</sub>

Obtention d'une transmission lumineuse de 90 % dans le visible

- Etude en fluorescence : début d'une collaboration avec l'Institut Fresnel de Marseille (équipe de Hervé Rigneault )

# Influence du substrat



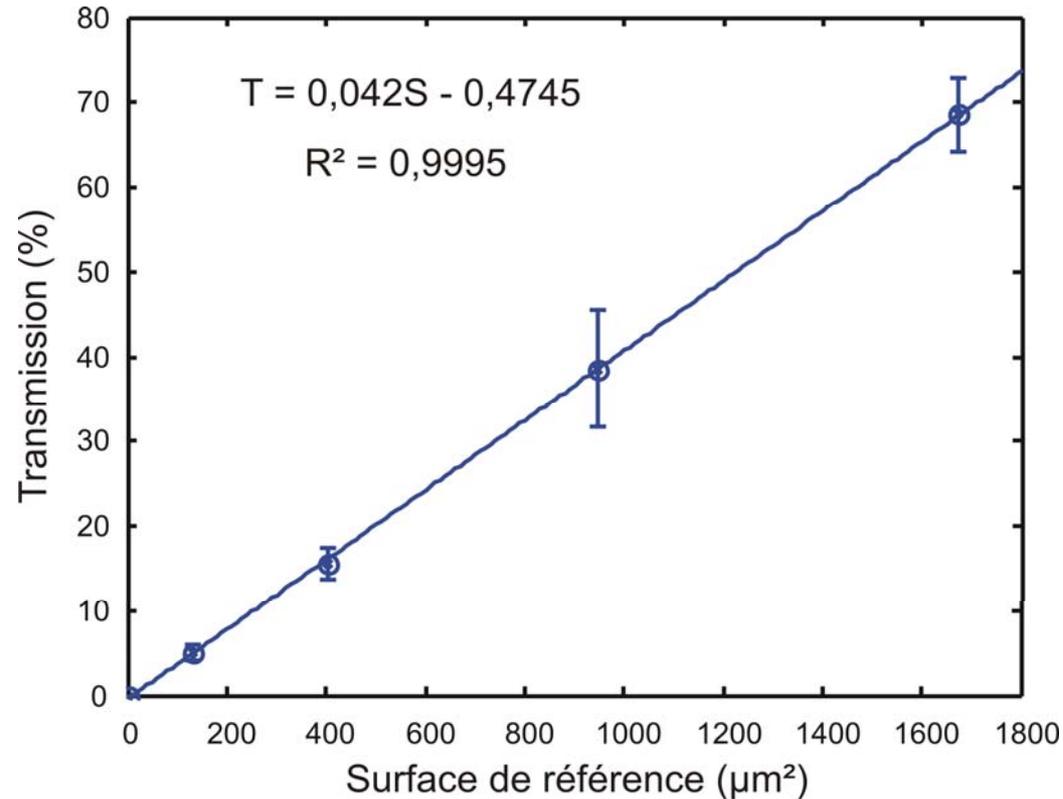
AAA  
 $d_o = 200 \text{ nm}$ ,  
 $d_i = 100 \text{ nm}$ ,  
 $h = 100 \text{ nm}$ ,  
 $p = 350 \text{ nm}$ ,  
 argent.

Substrat indice 1, 1,5 et 2

Décalage vers le rouge  
comme dans le cas de la  
période

Couplage plasmon-mode

# Etude spectrale



Linéarité de la transmittance  
avec la surface de référence



**Facteur de surface**

rapport de la surface du cœur de fibre  
par la surface de la matrice

# Champ proche

AAA en or :  $d_o = 330$  nm,  $d_i = 250$  nm,  $p = 500$  nm,  $h = 150$  nm.

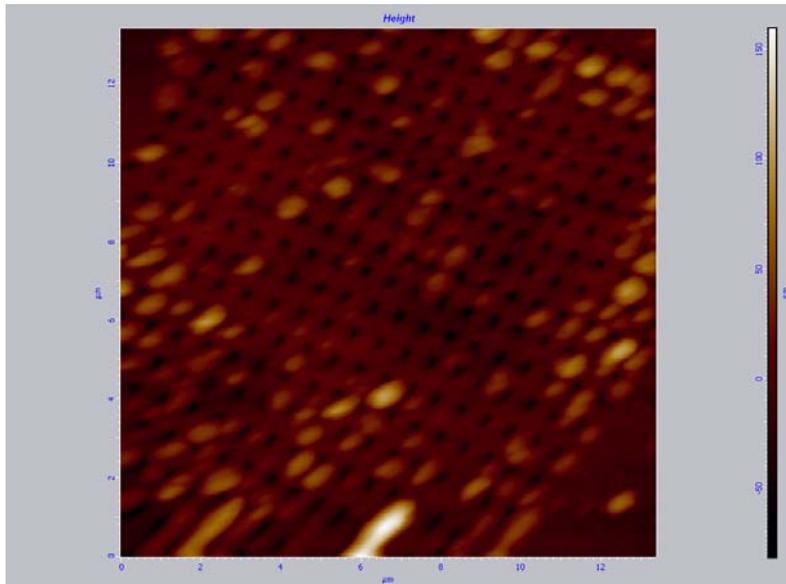


Image topographique

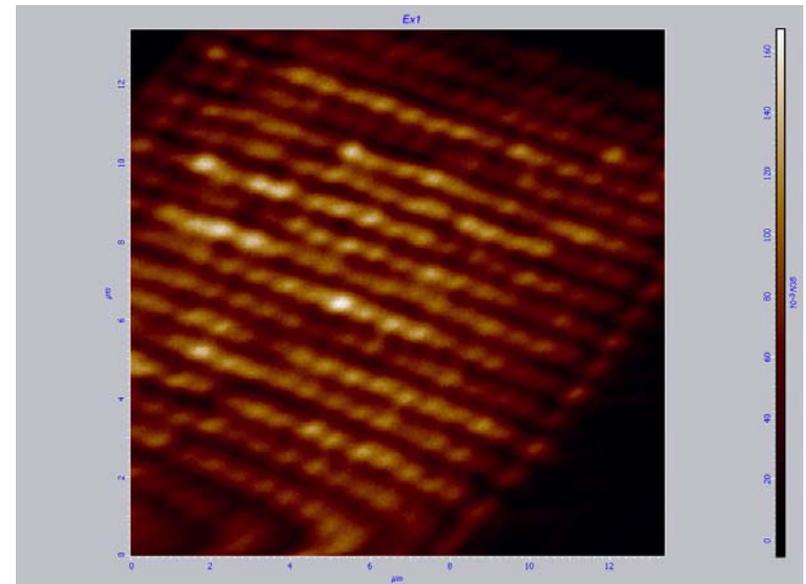


Image optique

Pointe métallisée avec une nano-antenne

# Champ proche

