

## PROPOSITION DE STAGE EN COURS D'ETUDES

Référence : **DOTA-2025-44** Lieu : Palaiseau  
 (à rappeler dans toute correspondance)  
 Département/Dir./Serv. : DOTA/CIO Tél. : 01 80 38 63 67  
 Responsable(s) du stage : Patrick Bouchon / Email : [Patrick.bouchon@onera.fr](mailto:Patrick.bouchon@onera.fr)  
 Yannick de Wilde [yannick.dewilde@espci.fr](mailto:yannick.dewilde@espci.fr)

### DESCRIPTION DU STAGE

Thématique(s) : Optoélectronique, nanophotonique et physique de la détection

Type de stage :  Fin d'études bac+5  Master 2  Bac+2 à bac+4  Autres

### Intitulé : Antennes plasmoniques matricielles reconfigurables pour le contrôle de l'émission thermique

Sujet : L'objectif de ce projet est de réaliser des antennes plasmoniques infrarouges nanostructurées formées de la répétition d'un même motif métallique de taille sub-longueur d'onde (sub- $\lambda$ ) formant la brique de base d'une structure matricielle NxN. Nous concevrons des sources infrarouges reconfigurables en adressant un sous ensemble des motifs sub- $\lambda$  constitutifs de l'antenne matricielle à l'aide d'un chauffage laser visible formant des patterns spécifiques, notamment pour contrôler la polarisation et la position spectrale des résonances en vue de créer des surfaces intelligentes reconfigurables pour l'infrarouge. Nous décrirons le couplage entre les motifs sub- $\lambda$  à l'aide de simulations basées sur la méthode des modes quasi-normaux.

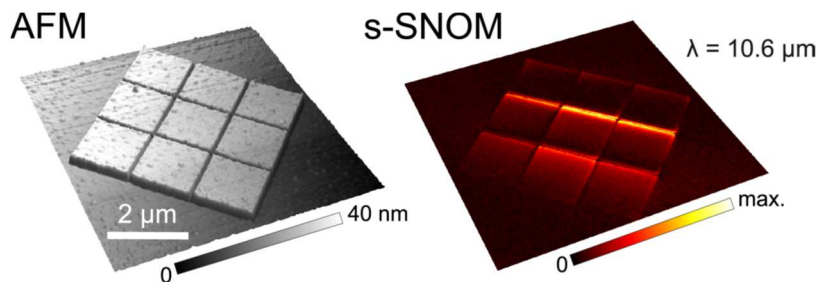


Figure 1 : Images AFM et SNOM d'une antenne matricielle 3x3.

L'équipe de l'Institut Langevin et l'équipe de l'ONERA qui proposent ce projet collaborent depuis plusieurs années sur le thème des antennes plasmoniques. Les motifs de bases de ces antennes sont des nanostructures métalliques de taille sub- $\lambda$  qui possèdent une résonance dans l'infrarouge moyen, à une longueur d'onde dépendant à la fois de la taille de l'antenne et des matériaux qui la constituent. L'observation du spectre d'antennes plasmoniques individuelles est un tour de force expérimental tant les signaux à détecter sont faibles en raison de la taille très réduite des antennes. Dans les travaux précédents, nous avons été capables de mesurer la résonance spectrale dans le spectre du rayonnement thermique d'antennes métal-isolant-métal (MIM) individuelles consistant en un patch métallique carré placé sur une couche mince diélectrique au-dessus d'un film métallique continu [Li2018]. Puis nous avons combiné ce type d'antennes pour former des dimères de MIM, et mis en évidence par mesures spectroscopique l'hybridation de certains modes due au couplage de champ proche entre les MIMs [Abou\_Hamdan2021]. Enfin, nous avons entamé l'étude de systèmes plus complexes formés d'une matrice de 3x3 antennes [Abou\_Hamdan\_these]. Jusqu'à présent, l'approche utilisée pour modéliser le comportement électromagnétique des antennes plasmoniques multi-éléments reposait uniquement sur l'emploi de logiciels commerciaux (COMSOL, LUMERICAL).

Au cours de ce stage et de la thèse qui suivra, nous étudierons des antennes plasmoniques matricielles présentant des résonances dans l'infrarouge moyen, dont nous contrôlerons les propriétés radiatives à l'aide d'un chauffage laser visible reconfigurable. Les antennes consisteront en des nanostructures en or (Au) structurées en une matrice NxN sur substrat diélectrique que nous chaufferons par absorption d'un faisceau laser visible afin de stimuler leur émission thermique dans l'infrarouge ou de modifier le milieu diélectrique pour déplacer les fréquences de résonance. L'emploi d'un modulateur spatial de lumière permettra de modifier la configuration spatiale de ce chauffage par laser sur la matrice d'antennes. Nous disposerons ainsi d'un convertisseur de lumière reconfigurable du visible vers l'infrarouge.

Les antennes plasmoniques matricielles infrarouges formées de N x N éléments de taille sub- $\lambda$  espacés d'une distance de 100-500 nm constitueront donc l'objet de nos études qui se déclineront en trois principaux axes :

- 1) Modélisation et conception des antennes matricielles à l'aide des modes quasi-normaux.
- 2) Sélection de modes résonants (spectralement, en polarisation) et contrôle de l'émission par chauffage laser visible et un SLM.

3) Contrôle actif de la position spectrale d'une résonance d'antenne plasmonique par l'utilisation des couplages champs proches et une illumination texturée ou par l'utilisation d'un matériau actif.

**Les méthodes expérimentales qui seront exploitées durant la thèse sont des méthodes d'imagerie et de spectroscopie infrarouges ultrasensibles et/ou super-résolues dont nous sommes spécialistes, et qu'il faudra adapter et développer en fonction des besoins du projet :** la spectroscopie infrarouge par modulation spatiale [Li2018, Abou\_Hamdan2021] qu'il faudra adapter pour implémenter une illumination laser de chauffage, le microscope de champ proche à rayonnement thermique TRSTM [DeWilde2006, Babuty2013], et un microscope optique de champ proche à pointe diffusante (s-SNOM) infrarouge fonctionnant à l'ambient à l'aide de sources lasers accordables donnant accès à un spectre très étendu. Aux expériences s'ajouteront des simulations numériques électromagnétiques. Elles seront réalisées à l'aide de logiciels commerciaux (COMSOL, LUMERICAL) ou développés à l'aide du logiciel open source MAN (Modal Analysis of Nanoresonators) développé par Philippe Lalanne et ses collaborateurs.

**Le stage, et la thèse qui suivra, s'effectueront en collaboration entre l'Institut Langevin et l'ONERA et se feront également en partenariat avec le C2N.**

D'autres collaborations peuvent d'ores et déjà être envisagée, notamment avec le Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure (Emmanuel Baudin), le Laboratoire Charles Fabry – IOGS (Jean-Jacques Greffet), et le Laboratoire Photonique, Numérique et Nanosciences (LP2N), IOGS (Philippe Lalanne). Elle sera dirigée par Yannick De Wilde (Institut Langevin) et Patrick Bouchon (ONERA).

#### **REFERENCES :**

- [Li2018] C. Li et al, Phys. Rev. Lett. **121**, 24, 243901 (2018).  
[Abou\_Hamdan2021] L. Abou-Hamdan *et al.*, Opt. Lett. 46, 981 (2021).  
[Abou\_Hamdan\_these] L. Abou-Hamdan, thèse de doctorat (2023).  
[Makhsiyani2015] M. Makhsiyani, P. Bouchon, J. Jaeck, J.L. Pelouard, R. Haïdar, Appl. Phys. Lett. 107, 251103 (2015)  
[Kaina2014] N. Kaina, M. Dupré, G. Lerosey, M. Fink, Sci Rep **4**, 6693 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep06693>  
[Basar2019] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. -S. Alouini and R. Zhang, IEEE Access, **7**, 116753-116773, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192  
[Wu2023] T. Wu, D. Arrivault, W. Yan, P. Lalanne, Computer Phys. Comm., 284, 108627 (2023).  
[Abou-Hamdan2023] L. Abou-Hamdan *et al.*, arXiv preprint arXiv:2310.08351 (2023).  
[DeWilde2006] Y. De Wilde et al, Nature **444**, 740 (2006).  
[Babuty2013] A. Babuty et al, Phys. Rev. Lett. 110, 146103 (2013).

Est-il possible d'envisager un travail en binôme ? Non

#### **Méthodes à mettre en oeuvre :**

- |   |   |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Recherche théorique     | <input type="checkbox"/> Travail de synthèse                        |
| <input checked="" type="checkbox"/> Recherche appliquée     | <input type="checkbox"/> Travail de documentation                   |
| <input checked="" type="checkbox"/> Recherche expérimentale | <input checked="" type="checkbox"/> Participation à une réalisation |

Possibilité de prolongation en thèse : Oui

**Durée du stage :** Minimum : 3 mois Maximum : 5 mois (6 mois sur dérogation uniquement)

Période souhaitée : à partir de février 2025

### **PROFIL DU STAGIAIRE**

Connaissances et niveau requis :  
Optique, Nanosciences

Ecoles ou établissements souhaités :  
Master 2 Recherche ou Ingénieur grandes écoles