

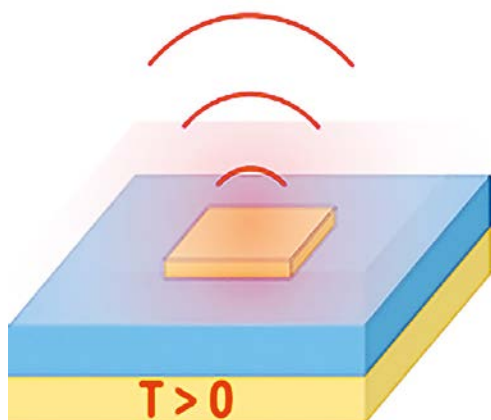
RAYONNEMENT THERMIQUE INFRAROUGE DE NANO-ANTENNES PLASMONIQUES INDIVIDUELLES

Patrick BOUCHON¹ et Yannick DE WILDE²

¹ DOTA, ONERA, Université Paris-Saclay, 91123 Palaiseau, France

² Institut LANGEVIN, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris, France

* Patrick.Bouchon@onera.fr ; Yannick.Dewilde@espci.fr



Nous exploitons les fluctuations thermiques pour étudier les résonances de nano-antennes plasmoniques métal-isolant-métal (MIM) individuelles dont les modes électromagnétiques sont excités en chauffant les nanostructures. La spectroscopie infrarouge par modulation spatiale permet de mesurer le spectre du rayonnement thermique de champ lointain d'une antenne unique en s'affranchissant de la contribution dominante du fond environnant. Des mesures de microscopie à effet tunnel à rayonnement thermique fournissent quant à elles une image super-résolue de la structure spatiale du rayonnement thermique de champ proche.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010532>

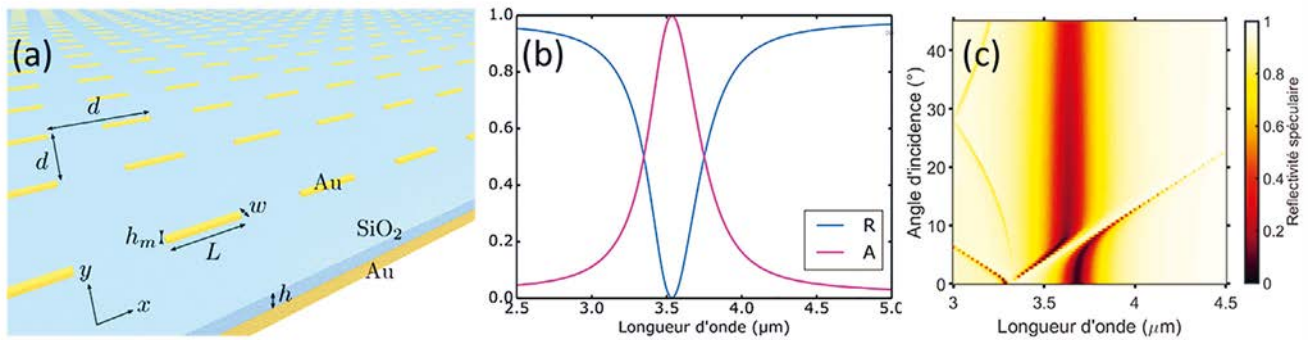
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

CONTRÔLER LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Contrôler le rayonnement thermique de surfaces étendues ou d'objets de taille inférieure à la longueur d'onde caractéristique de ce rayonnement est un enjeu important pour de nombreuses applications telles que l'optimisation des transferts de chaleurs

par rayonnement, le refroidissement radiatif, le thermophotovoltaïque. Ce rayonnement thermique est contrôlé d'une part par la température qui va définir la courbe du corps noir de Planck, et par l'émissivité de la surface. Les progrès accomplis en nanophotonique offrent de multiples possibilités d'ingénierie permettant

de contrôler l'émissivité et d'atteindre des propriétés qui s'écartent de celles de sources conventionnelles. Dès 2002, il a été montré que la cohérence spatiale d'ondes de surface excitées par un réseau pouvait être exploitée pour créer de nouvelles sources thermiques directionnelles [1]. Les métasurfaces formées de l'agencement périodique



d'objets résonants sub-longueur d'onde offrent un autre moyen intéressant de contrôler l'émission thermique. La figure 1 montre qu'à l'aide d'antennes plasmoniques formées d'un réseau de nanostructures métalliques comme de simples bâtonnets d'or, il est par exemple possible de produire une émission thermique d'émissivité quasi-unitaire dans le moyen infrarouge à une longueur d'onde proportionnelle à la taille des bâtonnets, alors qu'une couche d'or continue et sans relief présente au contraire une très faible émissivité dans l'infrarouge. Compte tenu de leur faible encombrement, des antennes bâtonnets de tailles différentes peuvent aussi être juxtaposées dans la cellule-unité d'un réseau, ce qui permet d'atteindre une émission thermique élevée dans une bande spectrale choisie [2].

Figure 1.

(a) Réseau d'antennes plasmoniques métal-isolant-métal (MIM) formé de bâtonnets d'or ($w = 0,1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $h = 220 \text{ nm}$, $h_m = 50 \text{ nm}$). (b) Spectres théoriques d'absorption et de réflexion d'une antenne MIM présentant une résonance associée à la longueur des bâtonnets. (c) La présence d'ordres diffractés par le réseau de $3,2 \mu\text{m}$ de période produit une réponse angulaire modifiée par rapport à celle d'une antenne isolée.

DE LA MÉTASURFACE À L'OBJET UNIQUE

S'il est possible de produire une source thermique dont le spectre est plus étroit que la courbe de Planck, l'intensité du rayonnement qui se propage à grande distance d'une telle source est fortement limitée car l'émissivité ne peut dépasser 1. Compte tenu de cette limitation qui distingue les sources

thermiques des dispositifs actifs tels les diodes et les lasers, elles utilisent des surfaces étendues formées d'un grand nombre d'antennes identiques. L'intensité des sources ainsi produites est alors suffisante pour que leur spectre d'émission puisse être facilement mesuré avec un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Par exemple, une source d'une surface de 1 cm^2 et d'émissivité quasi unitaire dans une bande spectrale de $1 \mu\text{m}$ centrée autour de $10 \mu\text{m}$ produit un rayonnement de $2,6 \text{ mW}$ par stéradian lorsqu'elle est chauffée à $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour réaliser une telle source, il est nécessaire de fabriquer une métasurface contenant plus d'un million de nano-antennes plasmoniques identiques. L'étude d'un réseau d'antennes n'est cependant pas exempte de difficultés lorsqu'il s'agit d'appréhender les ●●●

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

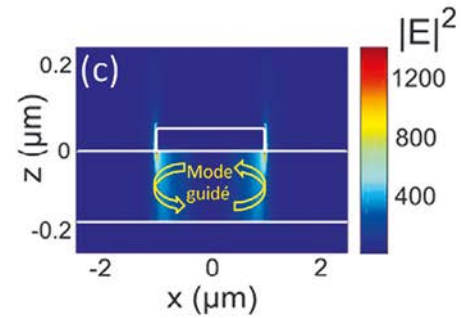
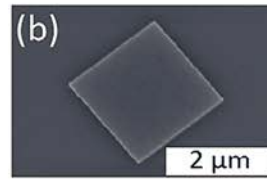
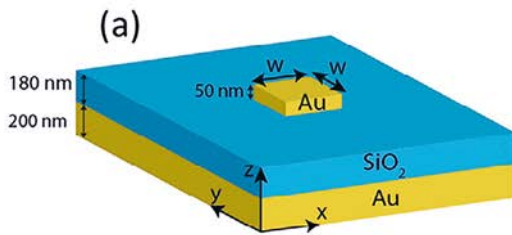


Figure 2.

(a) Schéma d'une nano-antenne plasmonique métal-isolant-métal (MIM). (b) Image par microscopie électronique à balayage. (c) Profil d'intensité du champ sous une antenne MIM.

propriétés intrinsèques de la brique de base qui le constitue. Si le pas du réseau est trop élevé, des ordres diffractés se manifestent et modifient le diagramme d'émission des objets individuels, s'il est trop faible, des effets de couplage de champ proche apparaissent, ce qui perturbe également le comportement individuel des antennes.

Caractériser l'émission thermique d'une nano-antenne plasmonique individuelle est un enjeu majeur pour la compréhension fine du comportement électromagnétique de ce type de dispositifs. Deux verrous importants se sont longtemps opposés à sa mise en œuvre. D'une part, le rayonnement thermique infrarouge émis par une antenne plasmonique est à peine de l'ordre de quelques nW par stéradian à 100 °C. Mesurer son spectre avec un spectromètre FTIR nécessite de s'affranchir de la contribution du signal infrarouge de fond dominant qui est également d'origine thermique. D'autre part, les antennes plasmoniques infrarouges sont des objets de taille sub-lambda, de sorte qu'un simple microscope infrarouge ne suffit pas pour imager la répartition spatiale du rayonnement thermique produit à leur surface en raison de la limite de diffraction.

Nous avons réalisé l'étude de nano-antennes plasmoniques individuelles qui démontrent la levée de ces verrous [3]. Les antennes étudiées sont des nano-antennes de type métal-isolant-métal (MIM). Leur structure consiste en un carré en or épais de 50 nm et d'une largeur w voisine de 2 µm, déposé sur une couche diélectrique de silice (SiO₂) de 180 nm d'épaisseur, qui recouvre elle-même

un film continu en or épais de 200 nm sur substrat de silicium. Comme l'illustre la figure 2, ces antennes se comportent comme des cavités Fabry-Perot pour les plasmons de gap qui restent confinés sous le carré métallique. La longueur d'onde de résonance fondamentale λ_{res} dépend de la géométrie et des matériaux, permettant d'élaborer des absorbeurs ou des émetteurs thermiques quasi-parfaits sélectifs spectralement dans l'infrarouge. Utilisées dans un détecteur infrarouge, les antennes MIM concentrent le champ incident dans un volume très inférieur à $(\lambda_{res})^3$ permettant de réduire le volume de semiconducteur et d'obtenir ainsi un détecteur très sensible [4].

REPOUSSER LES LIMITES DE LA SPECTROSCOPIE INFRAROUGE...

Les expériences menées visent à produire une excitation thermique des modes résonants de nano-antennes MIM individuelles en plaçant l'échantillon sur lequel elles reposent sur un support chauffant permettant d'élever leur température à environ 160 °C. Le rayonnement émis correspond alors à la section efficace d'émission de l'antenne, équivalente à la section efficace d'absorption, multipliée par le spectre de Planck. Le montage utilisé pour mesurer le spectre de nano-antennes MIM individuelles est schématisé dans la

figure 3. Un microscope infrarouge collecte le rayonnement émis par l'échantillon chauffé pour l'envoyer ensuite dans un spectromètre FTIR. Le détecteur utilisé est optiquement conjugué avec l'échantillon et capture le rayonnement en provenance d'une zone dont la taille minimale est d'environ 1000 µm². La section géométrique de l'antenne MIM est environ 1000 fois plus faible, et le signal associé à son rayonnement thermique est noyé dans un signal de fond beaucoup plus intense dû au rayonnement thermique de régions voisines du substrat.

Nous avons développé une méthode de spectroscopie infrarouge par modulation spatiale (IR-SMS) qui permet d'éliminer complètement la contribution du fond thermique parasite dans les mesures de spectroscopie FTIR, de manière à pouvoir extraire le spectre d'une seule nano-antenne MIM en dépit de ses dimensions réduites. Notre approche s'inspire de travaux menés pour mesurer l'extinction produite par des nanoparticules métalliques [5]. La méthode IR-SMS exploite l'effet de vignettage qui se produit au niveau du détecteur infrarouge lorsqu'une source quasi-ponctuelle est translatée latéralement dans le plan objet. L'échantillon est déplacé spatialement sur une dizaine de microns par un piézoélectrique suivant un signal sinusoïdal. Cette modulation spatiale de l'ordre d'une dizaine de microns induit une faible modulation de l'intensité perçue par le détecteur, qui se superpose au fond. En démodulant le signal détecté à la fréquence d'oscillation spatiale, il devient alors possible d'extraire le rayonnement

thermique propre à la nano-antenne MIM et de supprimer la contribution dominante du rayonnement thermique de son environnement.

Des spectres de section efficace d'émission ont été obtenus pour différentes tailles de nano-antennes MIM. Un exemple de spectre produit par une antenne de 2 μm est représenté dans la figure 3. Les spectres mesurés présentent une très bonne adéquation avec les spectres calculés numériquement. Les deux résonances observées, l'une vers 7 μm et l'autre 11 μm , se décalent vers le rouge pour des tailles croissantes de nano-antennes. De façon intéressante, la dispersion de la silice présente une résonance dans l'infrarouge moyen, de sorte que la condition de résonance du mode fondamental peut-être satisfaite

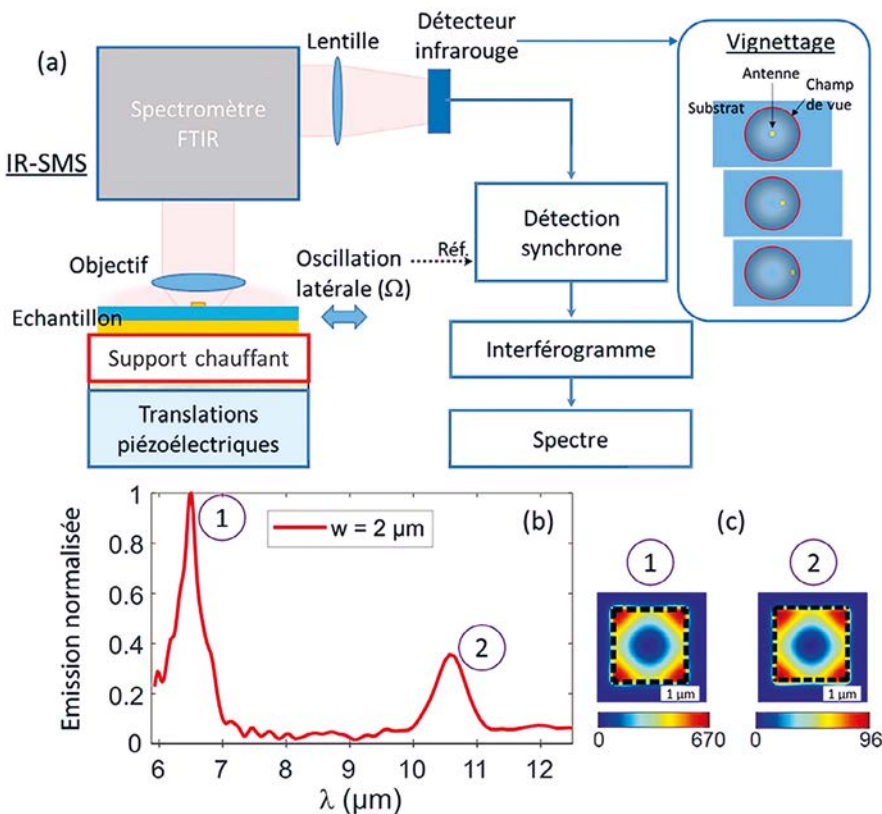
à différentes longueurs d'onde, ce qui explique la présence de deux pics dans les spectres d'émission thermique. Les cartes de champ calculées sous le carré métallique aux deux résonances confirment que la distribution spatiale des deux modes est bien la même.

ET DE LA RÉOLUTION EN IMAGERIE

Un microscope à effet tunnel à rayonnement thermique (TRSTM) permet de cartographier le rayonnement thermique de champ proche de ces antennes MIM. Cet instrument, initialement développé pour étudier la cohérence spatiale et temporelle du rayonnement thermique de champ proche associée aux polaritons de surface [6], est schématisé dans la figure 4. Ici, la pointe métallique d'une sonde locale à balayage analogue ●●●

Figure 3.

(a) Montage de spectroscopie infrarouge par modulation spatiale (IR-SMS) basé sur l'effet de vignettage qui se produit dans le champ de vue du détecteur infrarouge quand l'image de l'antenne s'écarte du centre de celui-ci. (b) Spectre d'émission thermique d'une antenne MIM de taille sub-longueur d'onde ($w=2\mu\text{m}$) obtenu en supprimant le fond thermique dominant par IR-SMS. (c) Cartes d'intensité du champ calculées sous le carré d'or d'une antenne MIM aux longueurs d'onde de résonance.



Interféromètre GEMINI

- Résolution Spectrale Variable**
Résolution spectrale inférieure à 1 nm
- Ultra Sensible**
pas de fente d'entrée
grande ouverture utile (diamètre 10mm)
- Plage Spectrale étendue**
250 – 3500 nm
Plage spectrale de fonctionnement

**Standards
PRODUITS
Customs**

Enceinte



Cabine de Protection Laser



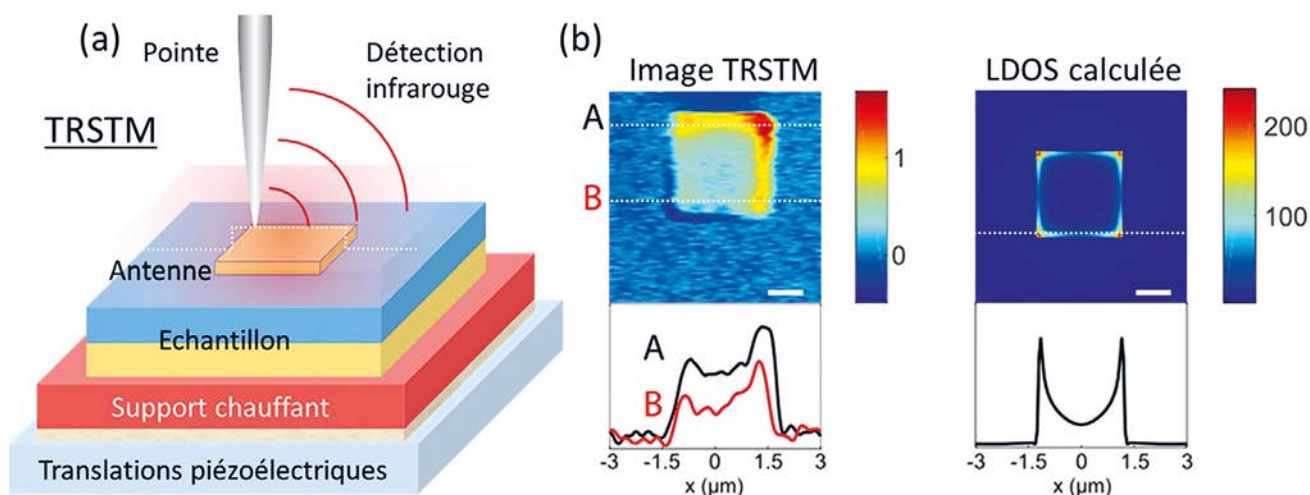


Figure 4.

(a) Schéma de principe du microscope à effet tunnel à rayonnement thermique (TRSTM). (b) Image TRSTM obtenues sur une antenne MIM ($w=2,4 \mu\text{m}$) et profils mesurés sur les bords de la structure. (c) Calcul de la densité locale d'états électromagnétique sur une antenne MIM de taille identique.

CONCLUSION

Les antennes plasmoniques offrent de multiples possibilités pour manipuler l'émission ou l'absorption de lumière dans l'infrarouge. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier permet de caractériser l'émission thermique de métasurfaces comportant un nombre important d'antennes, mais se heurte à la présence d'un signal de fond parasite dominant lorsqu'il s'agit de caractériser le rayonnement thermique

d'une seule antenne. La spectroscopie infrarouge par modulation spatiale (IR-SMS) a permis de lever ce verrou pour mesurer le rayonnement thermique de nano-antennes MIM individuelles. La méthode est très générale et potentiellement applicable pour caractériser tout objet dont la taille n'excède pas quelques micromètres avec un spectromètre FTIR. La méthode IR-SMS est une méthode de champ lointain basée sur la détection de champs propagatifs. Le microscope à effet tunnel à rayonnement thermique (TRSTM) donne quant à lui accès aux propriétés du rayonnement thermique de champ proche grâce à l'emploi d'une pointe diffusante qui relaye l'information du champ présent à la surface de l'échantillon vers un système de détection infrarouge situé en champ lointain. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J.-J. Greffet, R. Carminati, K. Joulain *et al.*, Y. Chen, *Nature* **416**, 61 (2002)
- [2] M. Makhsiyani, P. Bouchon, J. Jaeck *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 251103 (2015)
- [3] C. Li, V. Krachmalnicoff, P. Bouchon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 243901 (2018)
- [4] D. Palaferri, Y. Todorov, A. Biglioli *et al.*, *Nature* **556**, 85 - 88 (2018)
- [5] A. Arbouet, D. Christofilos, N. Del Fatti *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 127401 (2004)
- [6] Y. De Wilde, F. Formanek, R. Carminati *et al.*, *Nature* **444**, 740 (2006)
- [7] R. Carminati, A. Cazé, D. Cao, F. Peragut, V. Krachmalnicoff, R. Pierrat, Y. De Wilde, *Surf. Sci. Rep.* **70**, 1 (2015)