

Sujet 1 : Le comportement d'une source lumineuse à proximité d'une nanostructure

Dans un atome, lorsqu'un électron passe d'un état excité à un état de plus basse énergie en émettant un photon, on parle d'émission spontanée. Cette source de photon est (généralement) simplifiée en électromagnétisme par une source ponctuelle dipolaire, que l'on appelle dipôle. L'intensité de cette source dépend fortement de son environnement : dans un cas idéal (sans perte), on pourrait concevoir une nanostructure qui empêcherait totalement son émission ! De plus, si un autre atome similaire est proche de la source, il peut y avoir un transfert d'énergie entre les deux atomes.

Contrôler le taux d'émission d'un émetteur par son environnement est très intéressant pour de nombreuses applications. Par exemple, dans le domaine des senseurs et des imageurs, on peut détecter la présence d'une molécule en mesurant le changement d'émission du dipôle. Plus impressionnant encore, un contrôle avancé de l'environnement pourrait permettre l'avènement de sources deux-photons intriqués efficaces, nécessaires pour le développement d'ordinateurs quantique ! D'autres applications sont aussi possibles comme le contrôle de réactions chimiques, l'amélioration des cellules solaires, le développement de vitres intelligentes, etc.

Le but du stage sera donc de calculer les taux d'émission de dipôles proches de différentes structures nanophotoniques [1], ainsi que le transfert d'énergie entre deux atomes en présence de structures nanophotoniques. Pour cela, vous utiliserez une technique récemment mise au point [2], qui calcule l'environnement de l'atome (c'est-à-dire la fonction de Green) à partir de modes de la structure calculés numériquement par un programme de simulation par éléments finis (Comsol).

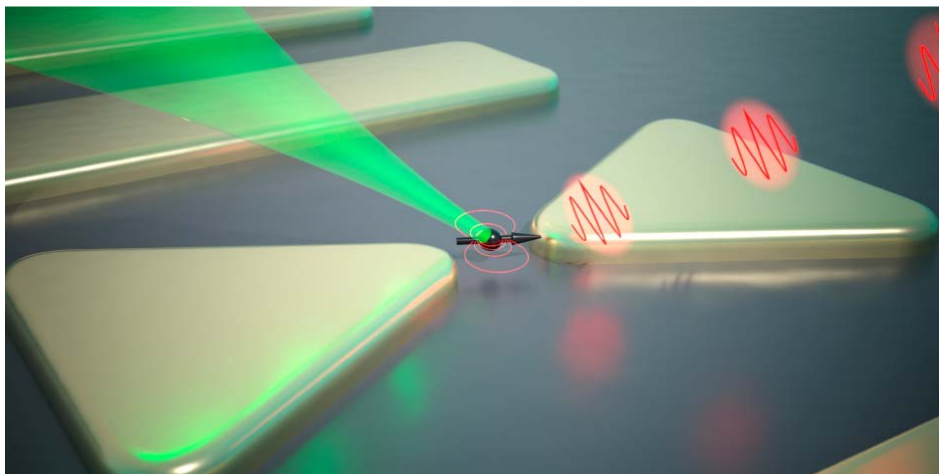


Figure 1 Dipôle proche d'une structure nanophotonique, composée ici d'un dimer de triangle d'or [3].

[1] Light emission in nanogaps: overcoming quenching, Jianji Yang, Rémi Faggiani and Philippe Lalanne, *Nanoscale Horiz.*, 1, 11, 2016.

[2] Generalizing normal mode expansion of electromagnetic Green's tensor to open systems, Parry Y. Chen, David J. Bergman, and Yonatan Sivan, *Phys. Rev. Applied*, accepted, 2018.

[3] Single-Photon Nanoantennas, A. Femius Koenderink, *ACS Photonics* 4, 710, 2017.

Sujet 2 : Influence des modes de surfaces sur le rayonnement thermique en champ proche

Il est bien connu que lorsqu'on souhaite étudier le spectre d'émission d'un corps, la loi de Planck est une excellente forme analytique du spectre réel. Cependant cette loi suppose que la distance à laquelle on se place de l'objet est grande devant la longueur d'onde dominante (champ lointain) donnée par la loi de Wien. Lorsque l'on considère des distances inférieures, les modes de surfaces du matériau commencent à avoir une influence (champ proche). En effet, ces modes étant évanescents, ils ne contribuent pas pour de grandes distances mais ne peuvent être négligés dans le cas contraire. Dans ce projet, nous proposons d'étudier l'influence de ces modes de surfaces dans le cas de carbure de silicium (SiC). À l'interface de ce matériau polaritonique, un phonon optique peut coupler avec un champ électromagnétique pour former un phonon-polariton de surface. Ces modes peuvent être excités dans le domaine thermique (infra-rouge) et présentent donc un grand intérêt dans l'étude du transfert de chaleur en champ proche.

Le projet consiste en l'étude numérique de l'influence de la distance à la surface sur la densité d'énergie radiée. Pour ce faire on considérera une interface plane séparant le carbure de silicium du vide. Le but est de montrer que cette densité d'énergie peut être bien supérieure (plusieurs ordres de grandeur !) en champ proche qu'en champ lointain et pourrait donc drastiquement augmenter le transfert de chaleur. On montrera également que le spectre d'énergie peut devenir quasiment monochromatique lorsqu'on est proche de l'interface grâce à l'excitation des modes de surfaces, un effet qui est maintenant activement recherché pour les applications thermiques nanométriques.

Plus d'informations dans [*Surface Science Reports*, 57, pp. 59-112 \(2005\)](#)

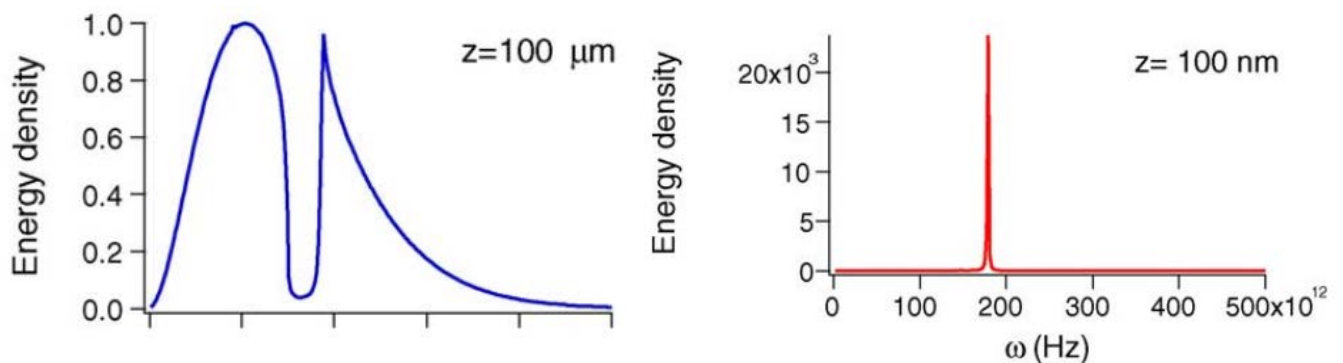


Figure 1 Densité d'énergie électromagnétique totale au-dessus d'une interface séparant du SiC à 300K et le vide à 0K : champ lointain à gauche, champ proche à droite.

Subject 3: Daytime radiative cooling using nanophotonic designs: cooling into space

Thermal radiation transfer (TRT) has been a subject of fundamental importance due to its broad application in many engineering areas, such as solar thermophotovoltaics, passive daytime radiative cooling, smart textiles, and so on. From these applications, passive daytime radiative cooling stimulated a particular research interest in the past few years, due to its significant contribution to energy-saving applications.

Using nanophotonic structures is found to be an efficient way to manipulating passive radiative cooling [1,2]. The nanophotonic design exploits the wavelength selective filtering of electromagnetic waves enabled by scattering on micro- to nanoscale obstacles. Compared with a traditional cooling system, which requires energy input, these thermally engineered radiative cooling systems operate without any electrical input. To do so, they capitalize on a strong infrared emitter layer, which allows strong IR emission in the atmospheric window (3-5 μm and 8-13 μm , for cooling into space), while reflecting the incoming solar spectrum (0.3-2.5 μm , to avoid heating). Using nanophotonics to design an IR emitter layer without compromising high solar reflectivity is a very efficient and novel approach. By optimizing various structural parameters such as thickness, number of layers, and material combinations, one can control the cooling system's emissivity /absorptivity as desired.

In this project, we look into both photonic simulations and thermal modeling in detail, following three steps: First, by employing solutions of Maxwell's equations for a specific geometry, using a commercial solver (COMSOL). Second, by modeling the thermal transfer using well-developed analytical methods to calculate the cooling power. Finally, by optimizing optical and thermal parameters (emission, absorption, reflection, and transmission) based on the two models.

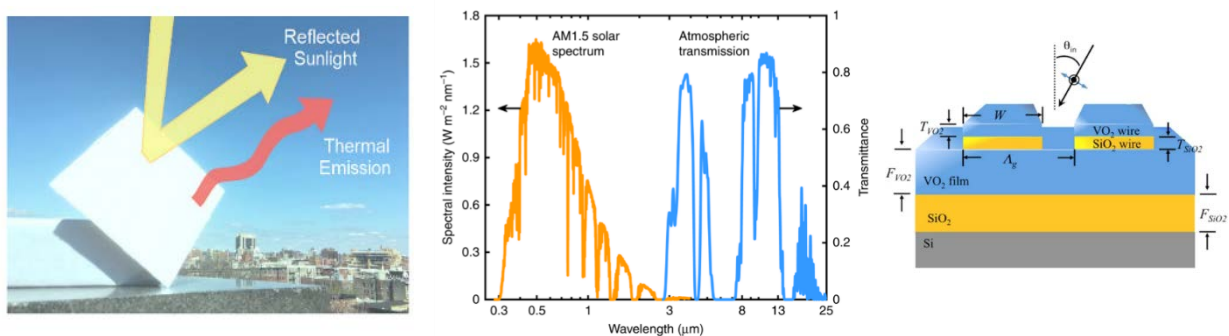


Figure 1. (a) Photograph of a radiative cooler: high solar reflection and thermal emission. (b) Spectral distribution of solar irradiation (to be reflected) and atmospheric transmittance (to be emitted). (c) Schematic geometry of an example radiative cooling structure.

[1] Jun-long K. et al., Daytime Radiative Cooling Using Near-Black Infrared Emitters. ACS Photonics 4 (3), 626-630 (2017).

[2] Bikram B. et al., Passive directional sub-ambient daytime radiative cooling, Nature Communications 9, 5001 (2018).

Sujet 4 : Bloquer et contrôler la propagation de la lumière

Depuis plusieurs années, les chercheurs s'appliquent à développer de nouvelles structures permettant de contrôler au mieux le comportement de la lumière. De la production de photons uniques à des cavités résonantes, de multitudes de dispositifs ont été créés. Différents phénomènes sont exploités afin de contrôler le comportement de la lumière mais depuis quelques années un phénomène potentiellement très utile a été mis en évidence : les BIC's (« Bound state In the Continuum »).

Un métamatériau est un matériau composite constitué de sous-structures géométriques se répétant généralement selon un certain paterne. Ces matériaux peuvent accepter différents modes pour la lumière : des modes « confinés » et des modes « radiatifs » (Fig.1a). Les modes confinés, comme leur nom l'indique, sont coincés dans le matériau et s'y propagent sans fuite vers l'extérieur. Ces modes se trouvent en dehors du cône de lumière (le cône de lumière renfermant tous les modes pouvant s'échapper à l'infini). Les modes radiatifs se trouvent dans le cône de lumière et permettent à la lumière de petit à petit s'échapper du matériau. Cependant, un type de résonance bien particulière permet d'avoir **des modes confinés dans le cône de lumière** : les BIC's.

Ces états particuliers se produisent lorsque certains paramètres sont rencontrés dans le matériau. Ces modes sont très robustes aux petites variations et permettent généralement de rester dans un mode très confiné (near- ou quasi-BIC). Récemment un nouveau type particulier de BIC a été mis en évidence : les UGR's (pour Unidirectional Guided Resonances). Les UGR's sont des BIC's uniquement dans une direction privilégiée, permettant ainsi de contrôler dans quelle direction laisser la lumière s'échapper.

Le but du stage sera donc d'étudier numériquement des structures permettant l'apparition de BIC's et d'UGR's, et de comprendre l'impact des variations de paramètre sur leur formation. Pour cela vous utiliserez le logiciel Comsol permettant de construire et simuler numériquement les différents modes autorisés dans un métamatériau. Vous apprendrez à identifier les BIC's parmi la structure de bande et à calculer leur facteur de qualité (Q-factor).

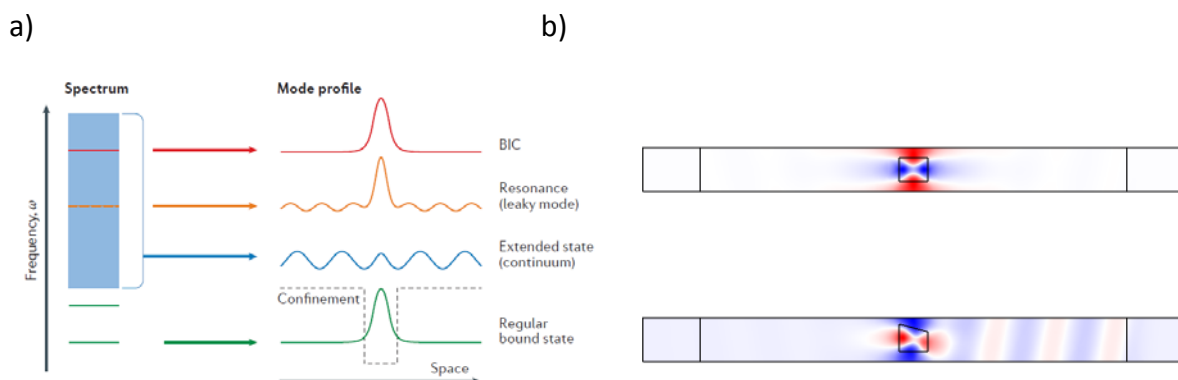


Figure 1a) : Différents types de modes possibles dans un métamatériau, 1b) Haut : Profil du champ électrique d'un BIC (confinement parfait). Bas : Profil du champ électrique d'un UGR, avec lumière qui échappe vers la droite.

[1] Hsu, C., Zhen, B., Stone, A. *et al.* Bound states in the continuum. *Nat. Rev. Mater.* **1**, 16048 (2016). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.48>

[2] Yin, X., Jin, J., Soljačić, M. *et al.* Observation of topologically enabled unidirectional guided resonances. *Nature* **580**, 467–471 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2181-4>

Sujet 5 : Étude de l'influence du milieu environnement sur la couleur de la hoptie

Dans la nature, nous pouvons distinguer trois catégories de couleurs selon leur origine. Tout d'abord, les couleurs pigmentaires sont produites par l'absorption sélective de la lumière incidente par des pigments. Ensuite, les couleurs issues de l'émission par fluorescence ou par phosphorescence sont émises par certaines molécules suite à l'absorption de rayonnements incidents plus énergétiques. Enfin, les couleurs structurales sont issues de l'interaction entre la lumière et des structures photoniques. Parmi elles, les cristaux photoniques sont des structures constituées d'une variation spatiale périodique de l'indice de réfraction. La périodicité de ceux-ci, qui est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, influence la propagation de la lumière avec l'apparition d'interférences constructives et destructives. Ainsi, sur des gammes de longueurs d'onde bien définies et nommées bandes photoniques interdites, la propagation de la lumière ne peut avoir lieu dans la structure et l'onde électromagnétique incidente est réfléchi. C'est le contraste d'indice de réfraction qui est à l'origine de l'apparition de ces bandes. Par ailleurs, la lumière réfléchi par la structure est souvent directionnelle et les couleurs obtenues très vives, au contraire de celles produites par des pigments qui diffusent la lumière dans toutes les directions de l'espace.

Le coléoptère *Hoplia coerulea*, également connu sous le nom de hoptie bleue, est une espèce d'insectes coléoptères assez commun dans le sud de la France et le nord de l'Espagne dont le mâle présente une couleur bleu métallique. Les écailles recouvrant ses élytres et son thorax sont un cas spécifique de structure photonique naturelle. Cette structure poreuse est recouverte par une enveloppe perméable aux fluides. Ainsi, lorsque ses écailles sont mouillées par de l'eau, des changements optiques sont induits et la couleur de ses écailles change du bleu au vert.

Durant ce stage, l'étudiant sera amené à étudier théoriquement la variation de la couleur des ailes de la hoptie lorsque cette dernière est trempée dans de l'eau. Pour ce faire, des spectres seront calculés via un outil de simulation, à savoir la méthode des matrices de transfert.

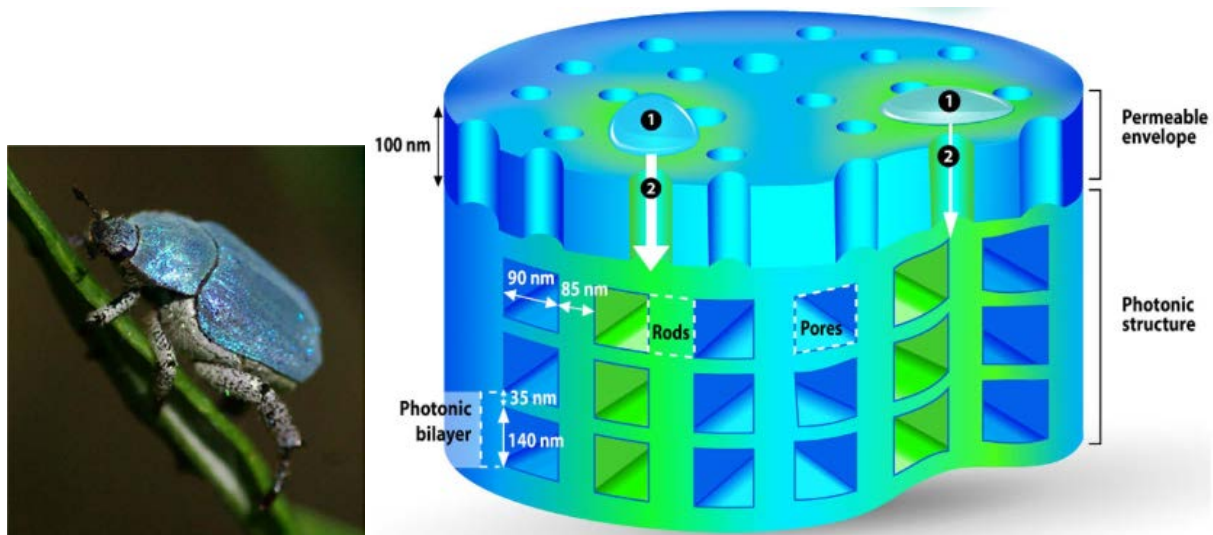


Figure 1 : hoptie bleue [1]. Figure 2 : cellule photonique de la hoptie bleue constituée d'une enveloppe perméable et d'une structure photonique. Cette structure est une multicouche poreuse donnant lieu à une couleur bleue [1].

[1] Mouchet, S., Van Hooijdonk, E., Welch, V. et al. Liquid-induced colour change in a beetle: the concept of a photonic cell. *Sci. Rep.* 6, 19322 (2016)