

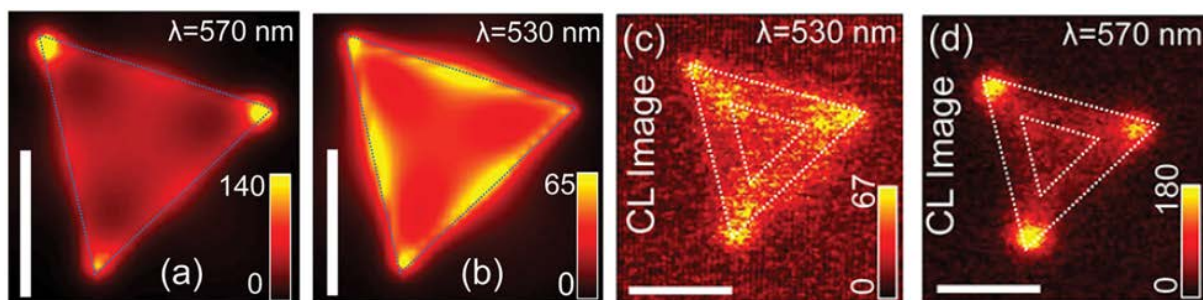
## Sujet 1 : Imager par la cathodoluminescence : une méthode numérique innovante

La cathodoluminescence est un phénomène électromagnétique au cours duquel un échantillon émet de la lumière lorsqu'un faisceau d'électrons le traverse. L'application la plus répandue est celle des tubes cathodiques qui constituent les anciens téléviseurs, où les électrons bombardaient du phosphore présent à l'arrière de l'écran.

En physique des matériaux, les électrons sont bien utiles pour sonder la matière : c'est le principe utilisé par le microscope électronique en transmission. Un faisceau focalisé d'électrons est envoyé sur l'échantillon et produit de la lumière qui est collectée par un système optique. En déplaçant le faisceau d'électrons à différents endroits de l'échantillon, et en mesurant le signal optique induit, on peut ainsi, pour chaque fréquence émise, créer une image de l'activité optique de cet échantillon (Figure 1). L'avantage de cette technique est sa résolution spatiale, qui inférieure au nanomètre !

L'interprétation et l'explication de ces images de cathodoluminescence peut se faire au moyen de la nanophotonique. Lorsqu'un faisceau d'électrons rapides passe à côté d'une particule métallique (une sphère, un triangle ou autre), il entre en résonance avec les électrons de conduction, ou autrement dit, il excite les modes de résonance plasmoniques de la particule. Une fois excités, ils réémettent de la lumière qui est ensuite captée par le système optique du microscope.

Les simulations numériques de ce phénomène sont assez fastidieuses et peuvent être améliorées grâce à une nouvelle méthode numérique, basée sur ces modes plasmoniques. Nous adapterons cette méthode pour ainsi calculer la réponse optique d'une particule métallique bombardée par un faisceau d'électrons et nous reproduirons les images en Figure 1. Développer cet outil est nécessaire pour l'interprétation des mesures, mais pourrait également être utilisée par le CERN pour optimiser leur détecteur Tcherenkov dans le futur.



**Figure 1** Image de cathodoluminescence d'un triangle d'or de 400 nm de côté [1]. (a-b) Simulation obtenue par différences finies dans le domaine temporel (FDTD). (c-d) Mesures effectuées avec un microscope électronique en transmission.

[1] "Probing Higher Order Surface Plasmon Modes on Individual Truncated Tetrahedral Gold Nanoparticle Using Cathodoluminescence Imaging and Spectroscopy Combined with FDTD Simulations", P. Das et al., Journal of Physical Chemistry C 116, 15610-15619, 2012.

**Sujet 2 : Transitions photoniques d'ordre supérieur dans des nanostructures plasmoniques**

L'interaction entre la lumière et la matière est un sujet d'actualité en photonique. En effet, de nombreuses recherches s'intéressent au contrôle et à la compréhension du comportement d'un émetteur quantique (un atome, une molécule, ...) proche de nanostructures. Ces recherches ont pour application, par exemple, d'améliorer l'imagerie à l'échelle nanométrique ou encore de concevoir des sources efficaces de photons intriqués pour les ordinateurs quantiques.

La présence de nanostructures, dont la taille est de l'ordre d'une dizaine ou d'une centaine de nanomètres, dans l'environnement photonique autour d'un émetteur a pour effet de modifier son comportement. En outre, les nanostructures qui supportent des plasmons sont des dispositifs capables de confiner la lumière à une échelle inférieure à celle de la longueur d'onde. Il en résulte que les champs électromagnétiques plasmoniques intenses, ainsi que le confinement des champs, ont pour effet d'augmenter le taux d'émission spontanée de la lumière émise par l'émetteur via l'effet Purcell de plusieurs ordres de grandeur.

Durant ce travail, nous allons nous intéresser aux transitions photoniques d'ordre supérieur, c'est-à-dire lorsque l'émetteur émet plusieurs photons lors de sa désexcitation, pour des émetteurs quantiques proches de nanostructures. En particulier des nanodisques couplés seront étudiés. Pour ce faire, le logiciel de simulations COMSOL sera utilisé.

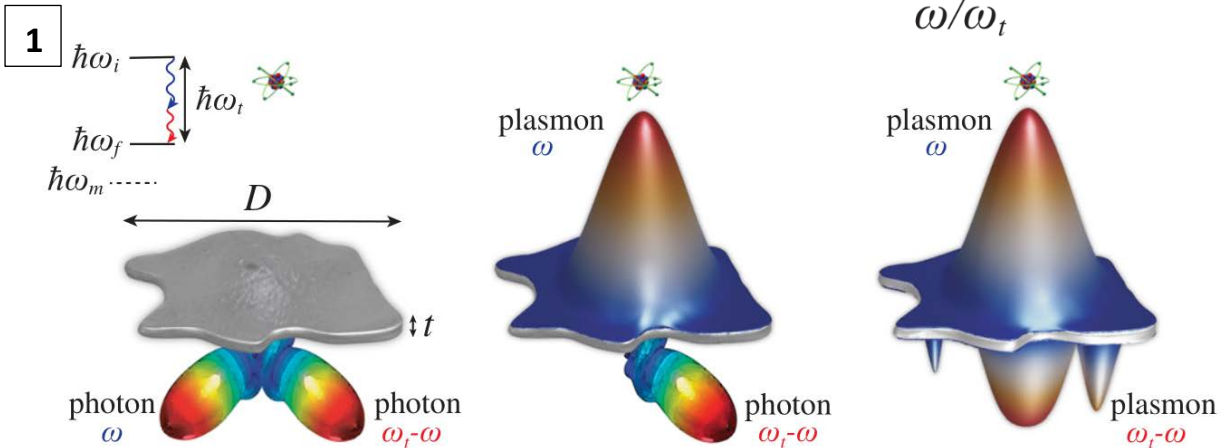
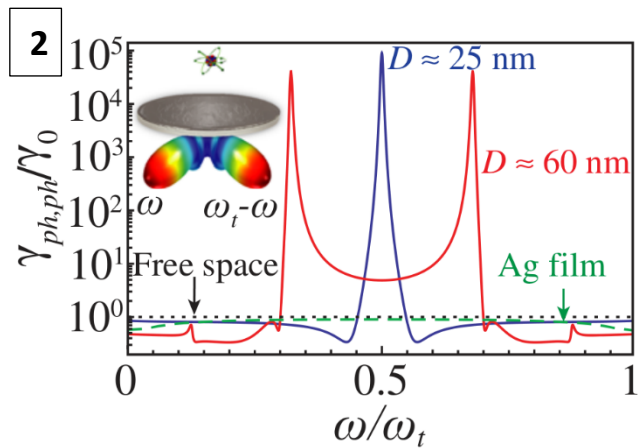


Figure 1 – Représentation schématique d'un système composé d'un émetteur placé à proximité d'un nanodisque supportant des modes plasmoniques. Trois voies de désexcitation sont possibles : une paire de photons, une paire hybride plasmon-photon ou une paire de plasmons [2]. Figure 2 – Spectre du taux d'émission spontanée de deux photons de l'émetteur proche d'un nanodisque d'argent normalisé par le taux d'émission dans le vide. Une augmentation de 5 ordres de grandeur est observée pour un disque de 25 nm de diamètre [2].

[1] Rivera, N., Kaminer, I., Zhen, B., Joannopoulos, J. D., Soljačić, M. Shrinking light to allow forbidden transitions on the atomic scale. Science, 353, 263 (2016).

[2] Y. Muniz, A. Manjavacas, C. Farina, D. A. R. Dalvit, and W. J. M. Kort-Kamp, Phys. Rev. Lett. 125, 033601 (2020).

### Sujet 3 : Étude de résonances dans des cristaux photoniques.

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, des 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 patron. 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.

Lors de ce travail, vous apprendrez à retrouver des BIC's et UGR's dans des structures déjà connues pour vous familiariser avec le logiciel de simulation COMSOL. Ensuite, l'étude sera étendue à d'autres structures plus exotiques permettant possiblement de mettre en évidence d'autres effets (p .ex. slot waveguide) combinés à un BIC ou un UGR.

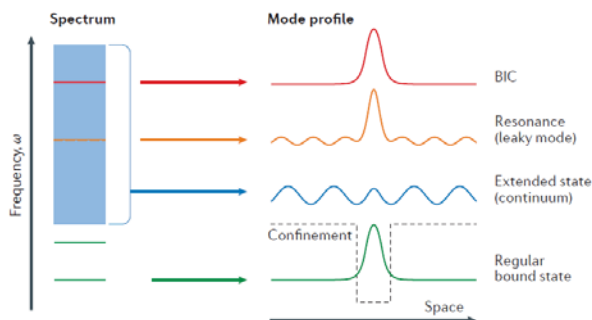
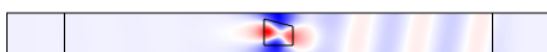


Figure : (Haut) Différents types de modes possibles dans un métamatériau, (Bas) Profil du champ électrique d'un BIC (confinement parfait) et d'un UGR, avec lumière qui échappe vers la droite.



[1] Hsu, C., Zhen, B., Stone, A. *et al.* Bound states in the continuum. *Nat. Rev. Mater.* **1**, 16048 (2016).



[2] Yin, X., Jin, J., Soljačić, M. *et al.* Observation of topologically enabled unidirectional guided resonances. *Nature* **580**, 467–471 (2020).