

Sujet 1 : 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 mémoire, 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.

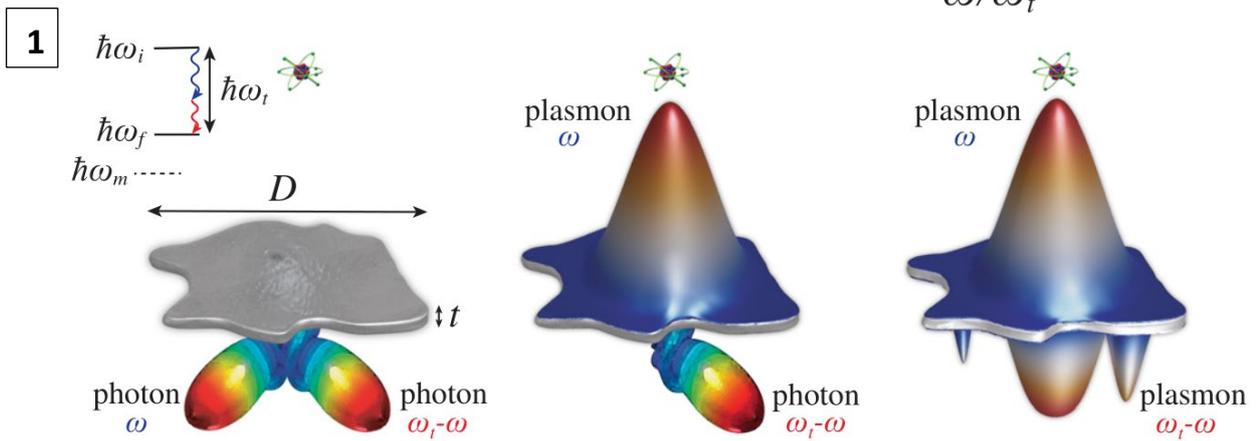
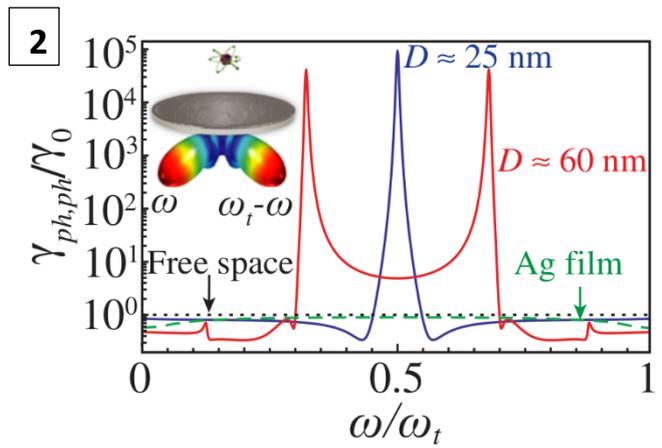


Figure 1 – Représentation schématique d'un système composé d'un émetteur placé à proximité d'un nanodisque supportant des modes plasmoniques. Trois voies de désexcitations sont possibles : une paire de photons, une paire hybride plasmon-photon ou une paire de plasmons [2]. Figure 2 – Spectre du taux 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., Kamner, I., Zhen, B., Joannopoulos, J. D., Soljačić, M. (2016). Shrinking light to allow forbidden transitions on the atomic scale. Science, 353, 263-269.

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

Sujet 2 : Bound state In the Continuum (BIC) : modes confinés aux propriétés étranges.

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 (pour 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 ». 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 particulier permet d'avoir des modes confinés *dans* le cône de lumière : les BIC's (Fig. 1).

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-BIC' ou 'quasi-BIC').

Le but du mémoire sera d'utiliser un logiciel électrodynamique afin de réaliser des simulations numériques permettant d'identifier des BIC's dans différentes structures. Vous apprendrez à identifier des BIC's dans des contextes photoniques variés, et à calculer leur facteur de qualité ('Q-factor'), signe de bon confinement ou non du mode dans le matériau, ainsi que d'autres propriétés de ces modes particuliers.

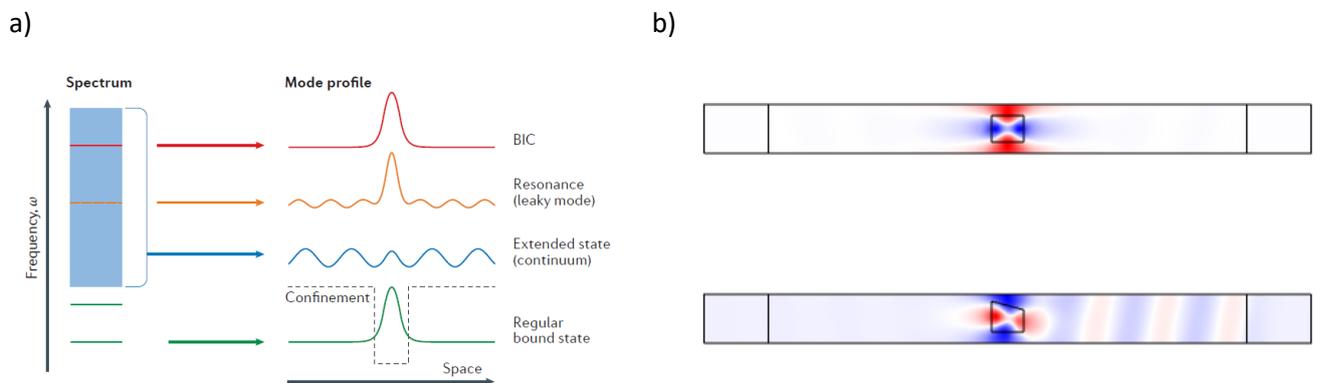


Figure 1a) : Différents types de modes possibles dans un métamatériau. 1b) Haut : Profil du champ électrique d'un BIC. Bas : Profil du champ électrique d'un UGR (Unidirectional Guided Resonance), un type particulier de BIC qui sera possiblement abordé durant le mémoire.

[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>

Sujet 3 : Surfaces exceptionnelles : un senseur photonique non-Hermitien

Le contrôle des interactions lumière-matière reste au centre de nombreux projets de recherche à l'heure actuelle. La photonique offre une plateforme idéale pour l'étude de ces interactions et une grande variété de systèmes photoniques ont été étudiés dans ce but.

Depuis quelques années, les systèmes photoniques non-Hermitiens ont attiré l'attention des chercheurs, notamment à cause des propriétés uniques de leurs Points Exceptionnels (PE). Ces points sont des dégénérescences des systèmes non-Hermitiens, qui apparaissent lorsque les paramètres du système (géométrie, matériaux...) sont réglés de manière spécifique. Les modes du système photonique ont alors des valeurs propres égales mais aussi des vecteurs propres équivalents, contrairement aux systèmes Hermitiens où les vecteurs propres restent orthogonaux malgré la dégénérescence.

Les caractéristiques des PE permettent d'obtenir différents comportements photoniques spéciaux, comme un champ électromagnétique chiral (Fig. 1) et une sensibilité accrue du système aux petites perturbations. Un désavantage de ces points est qu'ils ne sont pas facilement atteints ; la stabilisation du système à un PE est compliquée par leur grande sensibilité aux erreurs de fabrication et aux fluctuations de l'environnement. Pour éviter ces complications, des chercheurs ont récemment développé un système photonique non-Hermitien présentant une Surface Exceptionnelle, c-à-d un ensemble de PE atteints pour toute une gamme de paramètres [1]. Le système peut ainsi rester dans cet état dégénéré malgré des fluctuations des paramètres concernés, ce qui permet d'exploiter plus aisément les propriétés des PE. Ce type de structure photonique pourrait par exemple être utilisé en combinaison avec des émetteurs quantiques pour créer des sources de photons uniques facilement intégrables et possédant une meilleure efficacité que des systèmes Hermitiens [2].

Durant ce mémoire, vous étudierez un système non-hermitien présentant une surface exceptionnelle, analytiquement d'une part et via des outils de simulation électromagnétique d'autre part. Le but sera de mettre en évidence la sensibilité accrue du système aux fluctuations autour des PE, et les comportements spéciaux rendus possibles par la dégénérescence particulière de ces points.

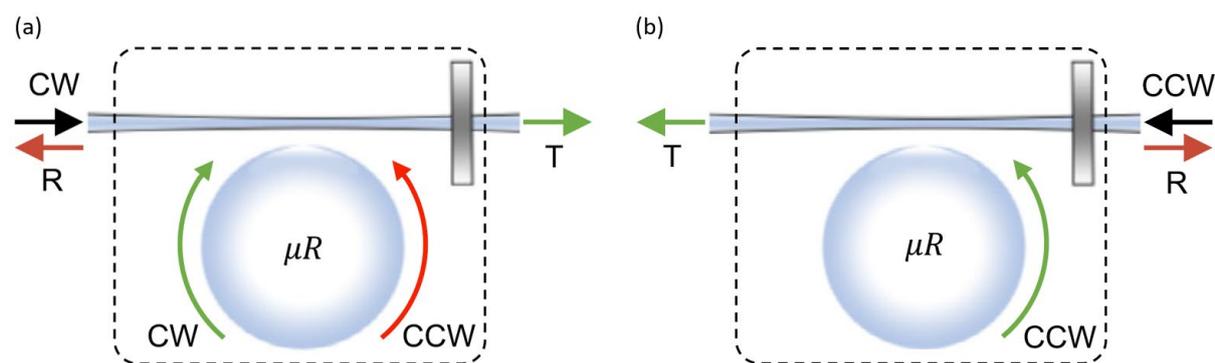


Figure 1 - Schéma du système photonique non-Hermitien étudié, pour une excitation avec le mode (a) clockwise (CW) c-à-d en sens horaire et (b) counterclockwise (CCW) c-à-d en sens anti-horaire. On remarque qu'à cause de la position asymétrique du miroir, le mode CW peut générer un mode CCW mais pas l'inverse rendant ainsi le système chiral.

[1] Soleymani, S., Zhong, Q., Mokim, M. *et al.* Chiral and degenerate perfect absorption on exceptional surfaces. *Nat. Commun.* **13**, 599 (2022).

[2] Q. Zhong, A. Hashemi, Ş. K. Özdemir, and El-Ganainy, R. Control of spontaneous emission dynamics in microcavities with chiral exceptional surfaces. *Phys. Rev. Research* **3**, 013220 (2021).