

Sujet 1 : Etude d'une nanoparticule d'or sous illumination laser pour la thérapie thermique (Encadrant : Cédric Rousseau)

Dans le domaine de l'oncologie, la recherche de nouvelles stratégies de traitement est un sujet en constante effervescence. Aujourd'hui, bien qu'étant toujours au stade de la recherche académique, la thérapie thermique se veut une alternative sérieuse aux méthodes de traitement traditionnelles. Cette thérapie innovante repose sur les propriétés thermiques qu'exhibent les nanoparticules de métaux nobles lorsqu'elles sont soumises à une illumination laser.

En effet, la lumière, considérée ici sous le prisme de la théorie ondulatoire, peut causer l'excitation collective des électrons libres des nanoparticules métalliques. L'oscillation collective des électrons libres au sein de la nanoparticule va, par effet Joule, convertir l'énergie lumineuse incidente en énergie thermique. Cette dernière sera ensuite dissipée dans le milieu environnant, sous forme de chaleur, causant ainsi une augmentation de température dans ce milieu. Cette augmentation de température est dommageable pour les cellules cancéreuses constituant la tumeur.

Pour réussir à générer cette excitation collective, la fréquence de la lumière incidente doit coïncider avec la fréquence de résonance plasmonique de la nanoparticule. Cette fréquence de résonance peut dépendre de nombreux paramètres : la composition de la nanoparticule, sa géométrie, le milieu environnant...

Durant ce stage, l'étudiant s'intéressera à l'augmentation de température aux alentours d'une nanoparticule d'or sphérique soumise à une illumination laser. L'effet de deux paramètres importants, sur l'augmentation de température, sera investigué : la taille de la nanoparticule et la puissance du laser. L'étudiant sera, dans un premier temps, amené à mobiliser les compétences acquises lors de ses premières années d'études pour réaliser l'étude analytique du système physique de la nanoparticule soumise à une illumination laser et pourra, dans un second temps, réaliser la modélisation numérique de ce système. Pour ce faire, il lui sera demandé d'appréhender un nouvel outil de simulations numériques largement usité dans le monde de la recherche : le logiciel COMSOL.

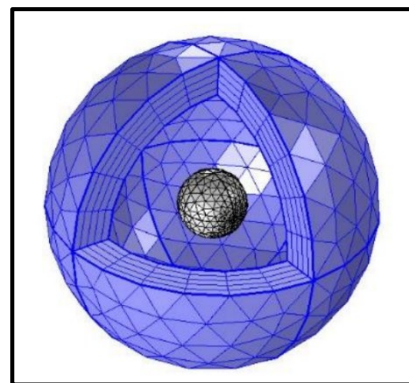
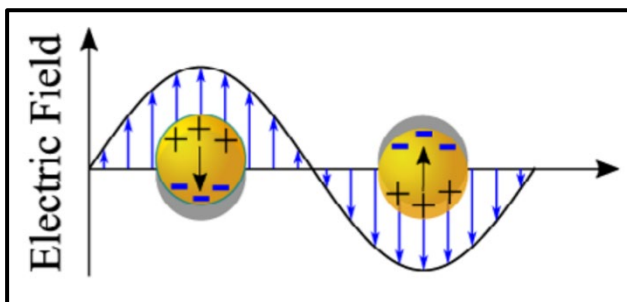


Figure 1 – Excitation collective des électrons libres d'une nanoparticule d'or soumise à une illumination laser [1].

Figure 2 – Modélisation d'une nanoparticule d'or via le logiciel Comsol [2].

[1] Asadi et al., « Laser-induced Optothermal Response of Gold Nanoparticles », Journal of Biophotonics, 2020.

[2] Manrique-Bedoya et al., « Computational Modeling of Nanoparticle Heating for Treatment Planning of Plasmonic Photothermal Therapy in Pancreatic Cancer », COMSOL conference, 2019.

Sujet 2 : Guides d'onde PT-symétriques à forme chirale (Encadrant : Alice De Corte)

Contrôler la propagation de la lumière à la nano-échelle demande l'utilisation de structures spécifiques, loin des miroirs et lentilles optiques : c'est le domaine de la nanophotonique. Des structures de l'ordre de la longueur d'onde et d'indices de réfractions adéquats, appelés **guides d'onde**, peuvent guider la lumière et la confiner dans une portion de l'espace en utilisant une combinaison. Les ondes électromagnétiques se propageant dans ces guides ont un profil spécifique à la géométrie du guide ; ce sont ses modes. Lorsque deux guides d'onde sont placés côte à côte, un mode peut être défini sur les deux guides à la fois. On dit alors que les guides sont couplés.

Si ses matériaux sont bien choisis, une structure de ce type peut respecter la **symétrie parité-temps** (PT). Il s'agit d'une symétrie qui renverse une dimension spatiale ainsi que l'axe du temps. Pour la respecter, les guides doivent être formés de manière équilibrée de matériau amplificateur de champ et de matériau de perte. Ces guides PT-symétriques suscitent un intérêt particulier car, en-dessous d'une certaine valeur de gain et de perte, des modes peuvent s'y propager sans effet d'amplification ou de diminution de champ, malgré la nature des matériaux (Fig. 1(a)). Au-dessus de cette valeur, le champ des modes croît ou décroît durant la propagation (Fig 1(b)).

Les structures photoniques possédant une géométrie chirale ont des propriétés électromagnétiques spéciales. Un objet **chiral** est un objet ne pouvant pas être superposés à son image dans un miroir. L'exemple le plus courant de structure photonique chirale est celui de la spirale (Fig. 1(c)) – mais beaucoup d'autres géométries simples possèdent cette qualité. Leur intérêt réside dans leur réponse différente à la lumière de polarisation circulaire gauche (LCP) ou droite (RCP). La polarisation droite sera par exemple plus absorbée ou réfléchiée, tandis que la gauche sera mieux transmise à travers la structure. Donner une forme chirale à un guide d'onde pourrait ainsi influencer sur la propagation et les caractéristiques de ses modes.

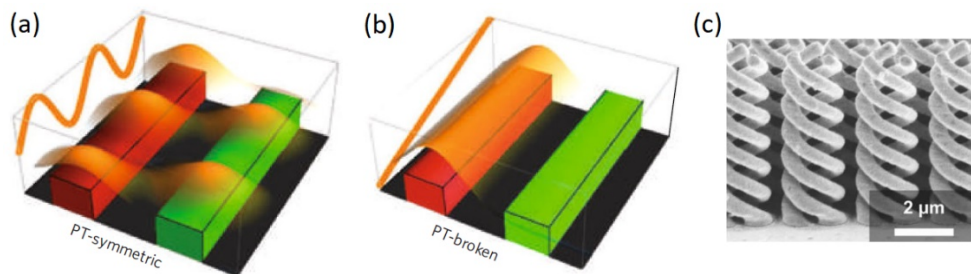


Figure 1 - (a,b) Exemple de guides d'onde respectant la symétrie PT, l'un formé d'un matériau de gain (orange) et l'autre d'un matériau de perte (vert). (a) Modes se propageant sans amplification ni perte de champ. (b) Mode amplifié. [1] (c) Exemple de structure chirale en spirale.[2]

La structure étudiée sera composée de deux guides couplés, l'un formé d'un matériau de gain et l'autre d'un matériau avec une quantité égale de perte. Le but de ce stage sera d'étudier l'influence de la forme des guides d'onde sur les caractéristiques leurs modes. Vous utiliserez pour cela un logiciel de simulation numérique basé sur les équations de Maxwell, permettant de construire la structure et d'étudier les modes s'y propageant.

[1] Feng, L., R. El-Ganainy and L. Ge, "Non-Hermitian photonics based on parity-time symmetry," Nat. Photonics, 11, 752-762 (2017).

[2] Hentschel M., M. Schäferling, X. Duan, H. Giessen, N. Liu, "Chiral plasmonics," Sci. Adv. 3, e1602735 (2017).

Sujet 3 : Couleurs structurales chez les poissons du récif corallien (Encadrant : Steve Smeets)

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 labre nettoyeur commun et la blennie à dents de sabre sont deux espèces de poissons vivant dans le récif corallien. La première est une espèce de poisson qui se nourrit des parasites et des peaux mortes des autres poissons, entretenant ainsi une relation mutualiste avec eux. Par contre, la seconde se nourrit des écailles des autres poissons en les attaquant. En outre, Cette espèce est capable de se faire passer aux yeux de ses proies pour le labre nettoyeur commun en changeant de couleur afin d'avoir plus de facilité à les approcher. Ainsi, il passe d'une couleur orange ou brun dotée de deux bandes bleu électrique à une couleur noire dotée d'une seule bande bleue. Les couleurs de ces deux espèces de poissons sont dues aux iridophores présents dans leurs téguments. Ces dernières sont des cellules pigmentaires qui sont un cas spécifique de **structure photonique naturelle**.

Durant ce stage, l'étudiant sera amené à étudier des modèles optiques décrivant les iridophores chez les deux espèces de poisson. Pour ce faire, des spectres seront calculés via un outil de simulation, à savoir la méthode des matrices de transfert.



Figure 1 et 2 - Forme non mimétique et mimétique de la blennie à dents de sabre. Figure 3 - Labre nettoyeur commun [1]. Figure 4 – Les iridophores sont modélisés par un cristal photonique 1D.

[1] Nathan Mortiaux. Couleurs structurales chez les poissons du récif corallien [Mémoire de master, Université de Namur, Promoteurs : Prof. O. Deparis et Dr. S. Mouchet]. 2020

Sujet 4 : Bloquer et contrôler la propagation de la lumière (Encadrant : Thomas Delplace)

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).

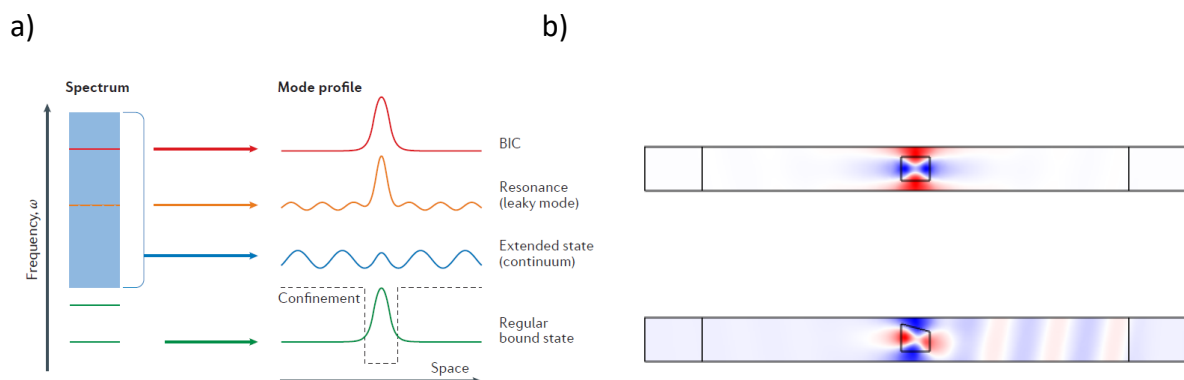


Figure 1a) : Différents types de modes possibles dans un métamatériau, 1b) Haut : Profil du champ électrique d'un BIC (confinement parfait). Bas : Profil du champ électrique d'un UGR, avec lumière qui échappe vers la droite.

[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 : Des couleurs avec des couches nanométriques (Encadrant : Gilles Rosolen)

Les « optical coatings » ou couches optiques consistent habituellement en une succession de matériaux diélectriques et/ou métalliques empilés les uns sur les autres. L'assemblage est en général dicté par l'application que l'on vise : miroir, couche antireflet, lentille, objectif photographique... Une autre application bien connue est la coloration d'objets, dont l'inspiration vient parfois de la nature (sujet 3). La plupart de ces systèmes sont basés sur des cavités Fabry-Pérot, dans lesquelles des interférences constructives ou destructives sont atteintes pour des longueurs d'ondes spécifiques. Dans ce cas, l'épaisseur des couches est habituellement de l'ordre de la longueur d'onde.

Cependant, il existe une autre technique qui a été démontrée il y a une dizaine d'année [1], basée sur des matériaux très absorbants. L'avantage est qu'elle permet de réduire considérablement la taille de la couche : de l'ordre de 5 à 20 nm, à comparer à une centaine de nanomètres anciennement. Ces nouveaux films absorbent de manière sélective certaines longueurs d'onde et sont très peu sensibles à l'angle d'incidence. Cette technologie a du potentiel dans multiples applications allant des photo-détecteurs ultrafins aux filtres optiques, en passant par les cellules solaires.

Lors du stage, nous montrerons le principe caché derrière le fonctionnement de ces couches ultrafines via des calculs analytiques (principalement la réflexion de Fresnel), corroborés par des simulations (COMSOL). Nous essaierons ainsi d'expliquer les couleurs obtenues sur les échantillons de la figure 1.

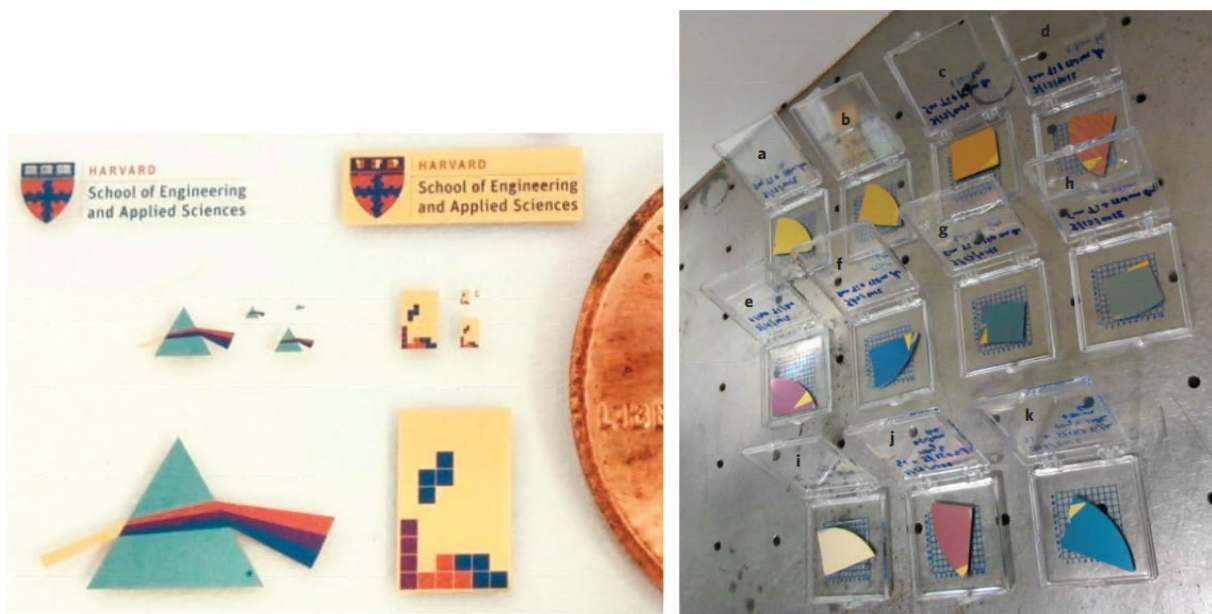


Figure 1 : Exemple de couches colorées obtenues avec une couche absorbante fine. Le germanium a été déposé sur de l'or, en une couche allant de 0 à 25 nm d'épaisseur.

[1] Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media, Mikhail A. Kats, Romain Blanchard, Patrice Genevet and Federico Capasso, Nature Materials 12, 20–24, 2013.