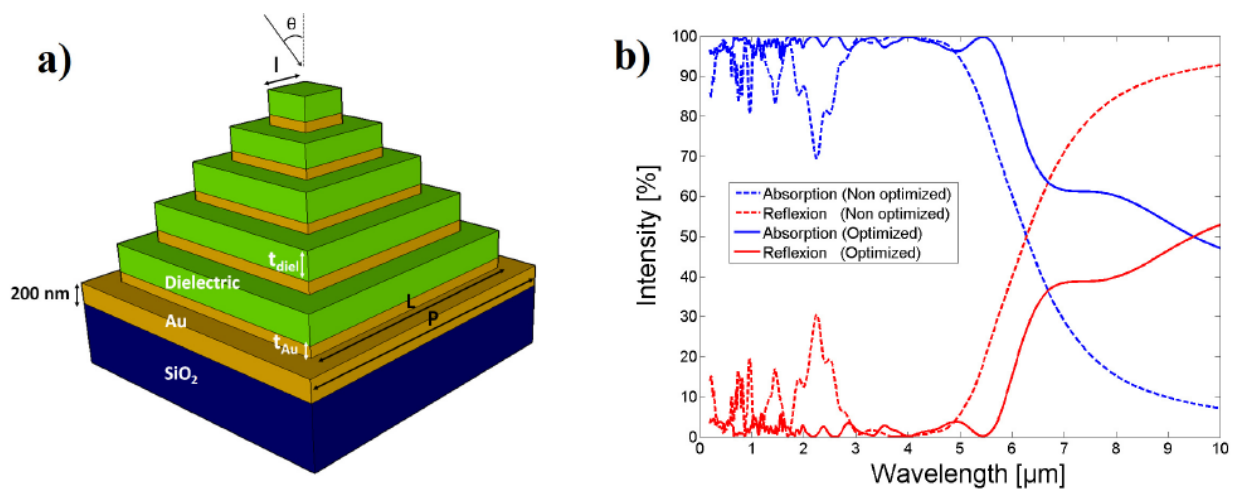


## Sujet 1 : Des pyramides pour absorber la lumière sur une large bande de fréquence

Mettre au point une technologie qui permet d'absorber complètement la lumière est utile dans de nombreux cas. Dans le cas des panneaux solaires photovoltaïques et thermiques, une forte absorption de la lumière par le silicium conduira à une meilleure efficacité. Du côté des radars ou des détecteurs infrarouge, une absorption totale est nécessaire pour dissimuler un objet. Finalement, des matériaux très absorbants pourraient servir de blindage lors de la confection de puces optoélectroniques, empêchant ainsi les différents signaux circulant sur cette puce d'interférer entre eux.

Cependant, si l'absorption totale de la lumière à une longueur d'onde spécifique est relativement facilement réalisable, c'est une autre paire de manche pour l'absorption totale sur un large spectre de longueurs d'onde. Il faut donc recourir à des matériaux structurés pour obtenir les propriétés voulues. Ces matériaux structurés à l'échelle de la longueur d'onde sont appelés métamatériaux et sont le fruit de nombreuses recherches actuellement.

Dans le cadre de ce stage, nous allons étudier un métamatériau qui est constitué d'une structure pyramidale répétée périodiquement sur un substrat (Figure 1a). Au moyen d'un logiciel de simulations numériques, nous calculerons l'absorption pour diverses configurations pyramidales (Figure 1b). En variant la structure, nous vérifierons les paramètres qui permettent d'obtenir une absorption maximale sur une large gamme de fréquence, et tenterons d'expliquer la cause de cette absorption par des modèles physiques simples.



**Figure 1** Maximisation de l'absorption d'une structure pyramidale [1] (a) Schéma de la structure considérée. (b) Spectre d'absorption pour deux structures pyramidales différentes, une optimisée et une non-optimisée.

[1] "Plasmon hybridization in pyramidal metamaterials: a route towards ultra-broadband absorption", M. Lobet et al., Optics Express 22 (10), 12678-12690, 2014.

## Sujet 2 : Création d'une source de lumière directionnelle

Contrôler la direction de propagation de la lumière à la nano-échelle demande l'utilisation de structures et de matériaux spécifiques, loin des miroirs et lentilles optiques : c'est le domaine de la nanophotonique. Lorsqu'on a accès au comportement de la lumière à des échelles de l'ordre de sa longueur d'onde, de nouvelles stratégies peuvent être utilisées afin de manipuler sa propagation, notamment le **phénomène d'interférence**. Lorsque 2 ondes de même longueur d'onde se propagent dans le même milieu, une interférence bien choisie peut permettre de renforcer ou d'annuler le champ électromagnétique dans la structure.

Depuis plusieurs années, les chercheurs en nanophotonique utilisent des **sources électromagnétiques dipolaires** afin de produire les ondes désirées. En raison de leur petite taille, ces sources sont facilement intégrables aux structures nanophotoniques, et se couplent très bien aux objets utilisés pour guider la lumière. Ces derniers, appelés **guides d'onde**, confinent la lumière dans une portion de l'espace grâce à une combinaison d'indices de réfractifs adéquats. Lorsqu'une source dipolaire est suffisamment proche d'un guide d'onde, le champ produit par le dipôle peut inciter la création d'ondes électromagnétiques dans le guide, propres à sa géométrie : ce sont ses modes.

En fonction des caractéristiques du dipôle, différents modes peuvent apparaître dans le guide. Un dipôle bien choisi peut résulter en la création de deux modes que l'on pourra faire interférer : en contrôlant les caractéristiques de la source dipolaire, on peut ainsi contrôler la propagation de la lumière. Un cas particulier démontrant une utilité dans le domaine de la nanophotonique est celui d'un dipôle circulaire (fig. 1), qui crée des modes différents dans le guide en fonction de quel côté du dipôle on se trouve : d'un côté les interférences donnent une onde se propageant dans le guide, et de l'autre côté des interférences différentes peuvent permettre d'obtenir un champ électromagnétique presque nul. On obtient ainsi une **source de lumière directionnelle**.

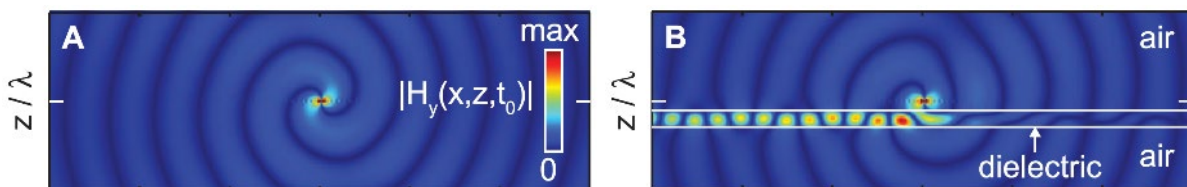


Figure 1 : Champ électromagnétique produit par un dipôle circulaire A) dans l'air B) à proximité d'un guide d'onde diélectrique. Le dipôle circulaire crée une onde se propageant seulement d'un côté du guide d'onde. [1]

Le but de ce stage sera d'étudier le système formé d'une source dipolaire et d'un guide d'onde, et de régler le dipôle de manière à obtenir la directionnalité recherchée. Vous utiliserez pour cela un logiciel de simulation numérique permettant de construire la structure et d'étudier les modes engendrés par la source dipolaire. Pour trouver les caractéristiques du dipôle donnant la meilleure directionnalité, vous vous baserez sur des équations établies par des chercheurs en nanophotonique, avant d'implémenter ces caractéristiques dans le logiciel pour constater leur effet.

[1] F. J. Rodríguez-Fortuño et al., *Near-field interference for the unidirectional excitation of electromagnetic guided modes*, Science 340, 328 (2013).

## 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).

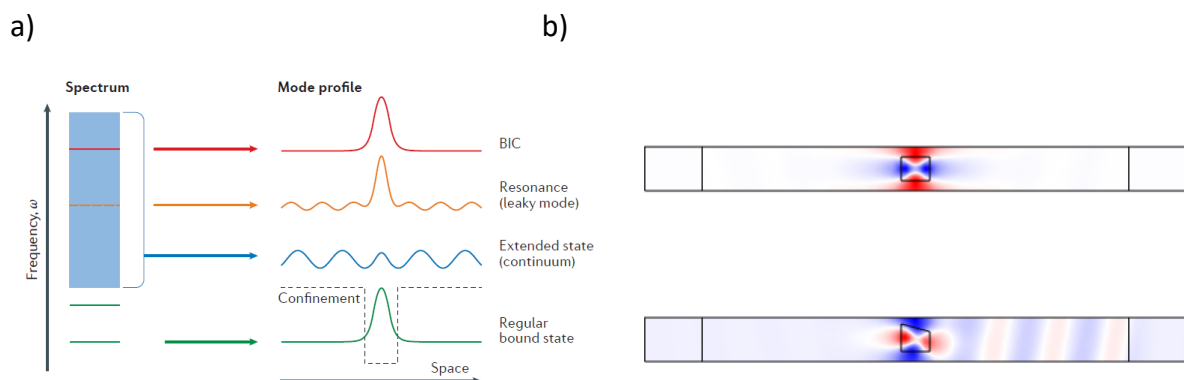


Figure 1a) : Différents types de modes possibles dans un métamatériau, 1b) Haut : Profil du champ électrique d'un BIC (confinement parfait). Bas : Profil du champ électrique d'un UGR, avec lumière qui échappe vers la droite.

[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 : Couleurs structurales chez les poissons du récif corallien

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