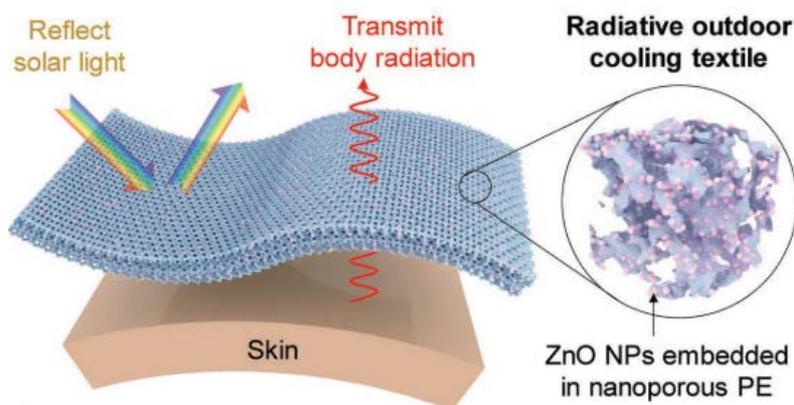


## Sujet 1 : Thermal micro/nanophotonics for personal temperature regulation

Thermal radiation transfer has been a subject of fundamental importance due to its broad applications such as thermal-photovoltaics, energy-efficient buildings, radiative cooling, personal thermal management, smart textiles and so on. From these various applications, smart textiles stimulated a particular interest due to their ability to regulate the temperature of an individual rather than of a large space. This results in a potential reduction of energy consumption and a cost-effective way of climate control in today's commercial and residential buildings. Recent developments show that utilizing (nano)photonics is an efficient way to manipulate radiation transfer for the use of smart textiles [1]. Therefore, significant efforts have been dedicated to designing photonic structures that control the heat loss from the human skin to the environment. As a result, new photonic smart fabrics that achieve personal passive temperature control are emerging.

These designs exploit various methods to achieve the desired functionalities, such as: (1) Frequency-selective filtering of infrared radiation enabled by scattering on micro- to nanoscale obstacles. (2) Using a carefully engineered strong infrared emitter layer with strong emission in the atmospheric window, while reflecting in the visible range. (3) Utilizing phase change materials such as vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ) [2], which shows promising results for passive radiative cooling purposes. (4) Using different fiber shapes and geometric arrangements, combined with composite fibers. For example, if the textile is for cooling purposes, one of the above methods can be implemented to minimize reflection and maximize emission/absorption, while remaining reflective in the ultra-violet and visible range [3]. These fabrics provide an entirely passive means of cooling or warming, regardless of the person's level of physical activity.



In this thesis, the student will work on nano/micro structures for thermal management using novel designs. In principle, the work incorporates the following three steps: 1. Electromagnetic modeling: Studying infrared properties of a specific photonic design using electromagnetic simulations. 2. Thermal

modeling: Studying 1D radiative heat transfer coupled with conduction using analytical methods, and thermal simulations. 3. Optimizing optical and thermal parameters (emission, reflection, transmission, and temperature) based on the results from electromagnetic and thermal models, in order to design a maximally effective novel textile fabric.

[1] Tong, J. K. et al. Infrared-transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management. *ACS Photonics* 2, 769 (2015).

[2] M. Ono M. et al. Self-adaptive radiative cooling based on phase change materials, *Opt. Express* 26, A777 (2018).

[3] Cai, L. et al. Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling, *Advanced Materials*, 30, 1802152 (2018).

## Sujet 2 : Approche analytique et numérique des cavités photoniques couplées : Application aux systèmes bistables thermiques

Un système présente une bistabilité lorsque celui-ci peut rejoindre deux états d'équilibre stables distincts à partir d'un état de départ instable. Dans ce projet, on étudiera le cas d'une bistabilité thermique. Pour un tel système, une petite fluctuation autour d'une température donnée peut le conduire à rejoindre deux états différents. Les applications de ce phénomène sont nombreuses et l'intérêt grandissant. En effet, de multiples systèmes électroniques dissipent beaucoup d'énergie et il serait donc intéressant d'utiliser la chaleur excédentaire déjà présente dans ces dispositifs. Parmi ces applications, on peut citer [1], la mémoire thermique, les redresseurs thermiques, les transistors thermiques, les portes logiques phononiques,...

Le point de départ du mémoire sera l'étude, à l'aide de simulations numériques, d'une bistabilité thermique [1]. L'idée de base est de considérer trois corps à des températures différentes (voir figure 1). Deux d'entre eux (aux extrémités) voient leur température constante. Le troisième (central) n'échange de l'énergie qu'avec les deux autres, sa température évolue donc via ces échanges thermiques. Chacun des corps est également caractérisé par une fréquence de résonance dans le domaine infrarouge. Lorsque, pour le corps central, cette fréquence dépend de la température (on parle d'effets thermo-optiques), une telle bistabilité peut se présenter.

Le but est donc d'étudier ce système à trois corps et d'analyser de nouvelles configurations. Durant le mémoire, l'étudiant combinera à la fois une approche analytique et une approche numérique. Il sera amené à utiliser des outils tels que la théorie des modes couplés [2] et les processus stochastiques [3].

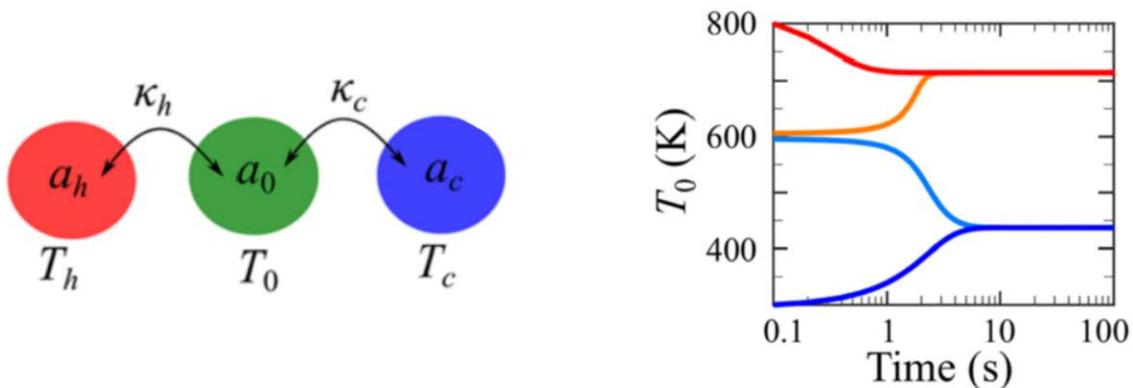


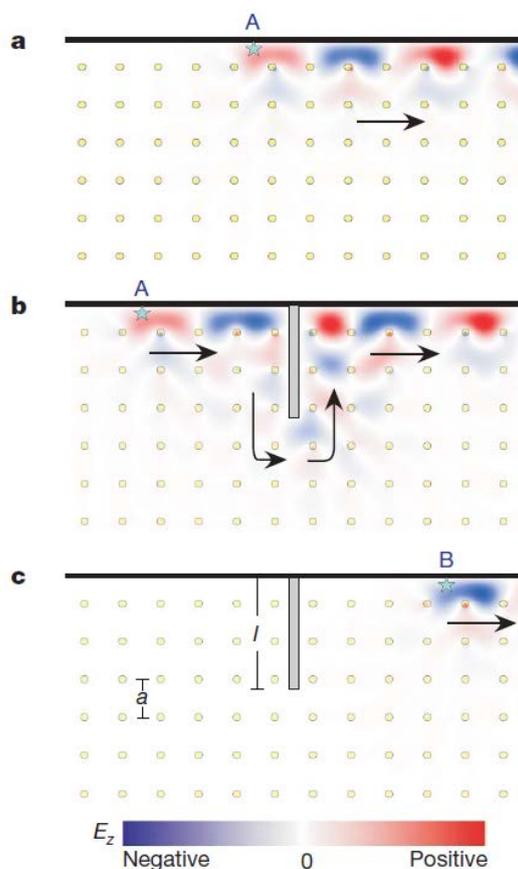
Figure 1 : (gauche) Vue schématique des trois corps à des températures différentes. (droite) Bistabilité thermique du corps central.

1. Khandekar, C., Rodriguez, A. W. Thermal bistability through coupled photonic resonances. *Appl. Phys. Lett.* 111, 083104 (2017).
2. Khandekar, C., Lin, Z. Rodriguez, A. W. Thermal radiation from optically driven Kerr ( $\chi(3)$ ) photonic cavities. *Appl. Phys. Lett.* 106, 151109 (2015).
3. Jacobs, K. Stochastic Processes for Physicists: Understanding Noisy Systems. (Cambridge University Press, 2010).

### Sujet 3 : Photonique topologique : étude de « edge states » dans une structure à une dimension

Depuis quelques années, la photonique topologique est un domaine de recherche qui évolue et grossit rapidement. L'objectif de ce domaine de recherche est d'étudier la physique des états topologiques de matière dans un contexte optique. Dans cette discipline, les propriétés géométriques et topologiques des matériaux sont utilisées pour contrôler le comportement de la lumière. Cette évolution moderne en photonique étend les résultats topologiques, qui sont prédits dans la physique de la matière condensée, et qui sont récemment couronnés avec le prix Nobel de physique en 2016 pour Thouless, Haldane et Kosterlitz.

Ce domaine de la photonique permet d'accéder à de nouveaux effets n'apparaissant pas dans des dispositifs de photonique traditionnels. Par exemple, l'usage de certains cristaux photoniques permet



**Figure 1 : Malgré la présence d'un obstacle (b et c), le edge state (a) continue sa propagation vers la droite sans qu'une partie du mode ne soit réfléchi vers la gauche. [3]**

l'apparition de modes confinés sur le bord du matériau. Ces « edge states » ont été proposés pour la première fois par Haldane et Raghu en 2008 [1]. Ceux-ci peuvent avoir des propriétés intéressantes comme la possibilité d'avoir 100% de transmission au travers d'une perturbation (voir figure) [2] ou de se propager dans une seule direction sur le bord du dispositif [3]. De tels modes peuvent se montrer très intéressants pour la production de nouveaux dispositifs photoniques.

L'objectif de ce mémoire sera de reproduire de tels modes dans une structure à une dimension et d'étudier leurs propriétés. Ensuite on ajoute des effets avancés comme la modulation dynamique ou les effets non-linéaires pour créer des modes novateurs. Pour cela, vous devrez utiliser des logiciels de simulations (COMSOL, MATLAB, Python) ou des méthodes analytiques afin de produire des structures en 1D et d'étudier les caractéristiques des modes qui s'y propagent.

[1] Haldane, F. D. M., and S. Raghu, 2008, "Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry," *Phys. Rev. Lett.* 100, 013904.

[2] Wang, Z., Y. D. Chong, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić, 2008, "Reflection-free one-way edge modes in a gyromagnetic photonic crystal," *Phys. Rev. Lett.* 100, 013905.

[3] Wang, Z., Y. Chong, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić, 2009, "Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states," *Nature* 461, 772.

### Sujet 4 : Propulsion laser d'une voile solaire : auto-stabilisation

A mesure que l'on apprend à maîtriser la lumière, sa capacité à exercer une force et un moment de force permet de développer des outils puissants de manipulation de la matière. On peut par exemple citer la mise au point des « optical tweezer » (ou pinces optiques), qui a été récompensée par un prix Nobel l'année passée (Figure 1a). Le faisceau laser est façonné et focalisé de manière à piéger une particule que l'on peut ainsi déplacer précisément, menant à des applications en médecine, en biologie et en micro-fluidique. Plus récemment, l'intérêt s'est plutôt porté sur la dynamique de lévitation.

Plutôt que de façonner et focaliser le faisceau laser, on peut façonner la forme de la structure illuminée, ce qui a été plus récemment proposé [1-2]. Cela permet d'utiliser des faisceaux laser de plus grande intensité permettant de contrebalancer le poids de la structure illuminée, mais aussi d'éviter de placer la structure proche de la source. Ce genre de développements permettrait de faire léviter un objet à bonne distance de la source, mais aussi de développer des voiles solaires permettant un déplacement spatial à des vitesses relativistes.

Le problème actuellement est que ce genre de lévitation est instable (Figure 1b) : une légère perturbation ou inclinaison de la structure va l'expulser hors du faisceau... Il faut donc façonner ces structures pour qu'elles restent stables, ce qui est possible en structurant leur surface de manière adéquate (Figure 1c). C'est ce que nous ferons au moyen de simulations électromagnétiques, en proposant de nouvelles géométries asymétriques diffusantes.

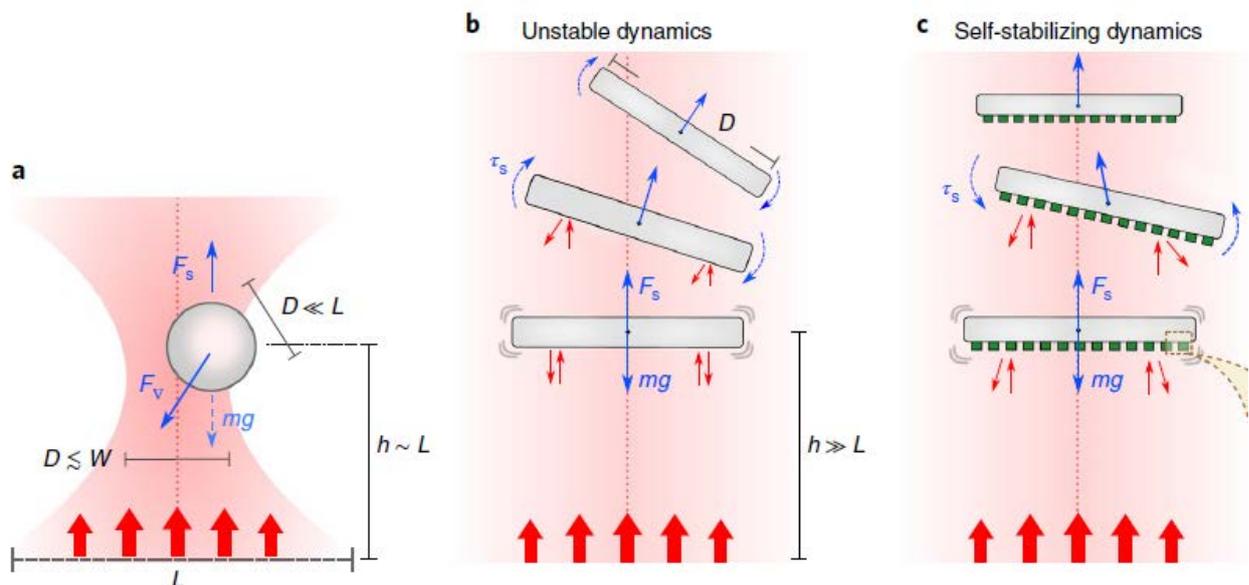


Figure 1 Méthodes pour l'auto-stabilisation de l'objet [2]. (a) Dans le cas des pinces optiques, l'objet est piégé dans le faisceau laser grâce à une focalisation du faisceau. (b) Un faisceau non-focalisé peut avoir assez d'intensité pour faire léviter un objet macroscopique, mais une légère perturbation peut expulser l'objet du faisceau. (c) En façonnant la surface, la structure peut s'auto-stabiliser et rester dans le faisceau laser.

[1] O. Ilic et al. *Exploiting Optical Asymmetry for Controlled Guiding of Particles with Light*, ACS Photonics 3 (2), 197, 2016.

[2] O. Ilic and H. A. Atwater, *Self-stabilizing photonic levitation and propulsion of nanostructured macroscopic objects*, Nature Photonics 13, 289, 2019.