

Bourse de thèse (2022-2025)

Unités Arithmétiques et Logiques modales plasmoniques.

Début de thèse: Septembre 2022

Durée: 3 ans

Contact : Erik DUJARDIN et Alexandre BOUHELIER

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), UBFC CNRS UMR 6303
Département Photonique - Equipe PRISM
9 avenue Alain Savary - BP 47870 - 21078 Dijon Cedex - France
Email: erik.dujardin@cnrs.fr – Phone: +33 (0)3 80 39 59 62.

Sujet expérimental multi-disciplinaire (optique, nanofabrication et simulations numériques) propose de concevoir et réaliser des composants logiques plasmoniques et d'en étudier les propriétés optiques. La thèse comportera trois parties: (i) la nanofabrication par lithographie électronique et gravure par faisceau d'ions focalisés (FIB) de nanostructures plasmoniques à partir de mésocristaux 2D d'or; (ii) la caractérisation optoélectronique du comportement plasmonique non-linéaire et du fonctionnement booléen des portes logiques reconfigurables à complexité croissante; (iii) la simulation des phénomènes observés par la méthode des fonctions de Green en utilisant des codes existants.

Une nouvelle classe de composants fonctionnels, intégrés et ultracompacts exploitent les propriétés opto-électroniques des métaux nobles comme l'or ou l'argent. Le confinement et le guidage de la lumière à des dimensions nanométriques inférieures à la longueur d'onde grâce aux plasmons offrent un moyen de développer de nouvelles approches du transfert et du traitement de l'information par voie "tout optique". Notre équipe a démontré la faisabilité des premiers calculateurs appelés unités arithmétiques et logiques (ALU, Fig. 1) dont nous souhaitons désormais augmenter les performances vers de véritables processeurs.¹⁻³

Ce projet de thèse s'inscrit dans le cadre du **projet ANR DALHAI** en collaboration avec CIAD Dijon, expert en intelligence artificielle, avec lequel nous concevrons les ALU qui seront réalisées et étudiées expérimentalement et numériquement à l'ICB. Un atout majeur des composants plasmoniques est la possibilité de moduler électriquement leur réponse optique locale ce qui permettra d'explorer une étape supplémentaire d'intégration et de reconfigurabilité à haute fréquence.⁴ L'objectif principal de cette thèse est de démontrer, opérer et décrire numériquement l'équivalent d'un additionneur complet 2x2 bits puis de concevoir des processeurs de complexité supérieure. Un second objectif est la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans la modulation électro-optique de la réponse des ALU.^{4,5}

Le/la candidat/e **préparera les échantillons d'or cristallins** à partir de suspensions colloïdales puis **réalisera les étapes de lithographie/gravure** par deux voies complémentaires mises en place dans les plateformes ARGEN (ICB, Dijon) et MIMENTO (Femto-ST, Besançon). La réponse optique des composants sera caractérisée sur un **banc d'optique non-linéaire** dédié permettant une **excitation multi-faisceaux** des ALU ainsi que leur **adressage électrique** en vue de **reconfigurer et moduler** ($f \sim 1-100$ kHz) la réponse booléenne des portes logiques et calculateurs plasmoniques modaux.

Un formalisme de Green existant sera utilisé pour **simuler et interpréter les images optiques** expérimentales.

Enfin, tout au long de la thèse, le/la candidate **participera à la conception assistée par intelligence artificielle hybride** des ALU à fonction booléenne complexe.

Pré-requis: Une maîtrise théorique en nano/optique et une excellente maîtrise expérimentale du développement et de l'interfaçage (LabView) de bancs optiques expérimentaux et microscopie sont exigées. Des connaissances des méthodes de nanofabrication et un niveau d'anglais écrit/parlé C1 sont souhaités. Une maîtrise du langage Python sera appréciée.

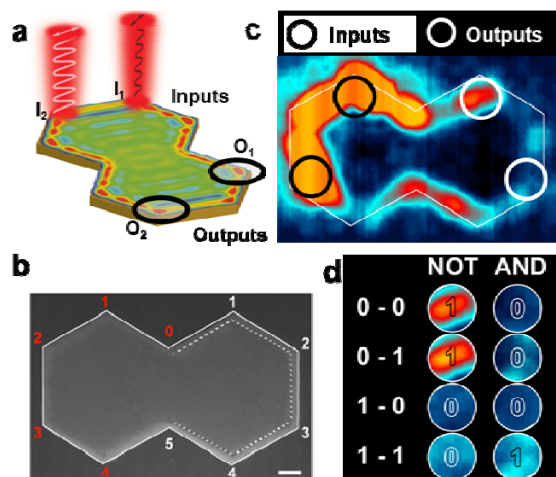


Figure 1: (a) Principe de fonctionnement d'une porte en Double Hexagone (DH) avec 2 entrées et deux sorties. (b) Image MEB d'un composant DH usiné par FIB dans une microplaquette ultrafine cristalline d'or. Echelle 500 nm (c) Réponse expérimentale de la porte DH en excitation '0' - '1'. (d) Réponses expérimentales de la porte DH en (b, c) pour les quatre configurations de polarisation des entrées. Elle réalise simultanément les portes NOT(I_1) et AND.³

1 - S. Viarbitskaya, A. Teulle, R. Marty, J. Sharma, C. Girard, A. Arbouet, E. Dujardin, *Nature Materials*, 12, 426 (2013). ([Link](#))

2 - U. Kumar, G. Colas des Francs, A. Bouhelier, E. Dujardin, et al. *ACS Photonics*, 5, 2328-2335 (2018). ([Link](#))

3 - U. Kumar, A. Cuhe, C. Girard, S. Viarbitskaya, F. Dell'Ova, R. Al Rafrain, G. Colas des Francs, S. Bolisetty, R. Mezzenga, A. Bouhelier, E. Dujardin *ACS Nano*, 15, 13351-13359 (2021). ([Link](#))

4 - A. V. Uskov, J. B. Khurgin, M. Buret, A. Bouhelier, I. V. Smetanin, and I. E. Protsenko, *ACS Photonics*, 4, 1501-1505 (2017). ([Link](#))

5 - K. Malchow and A. Bouhelier, *J. Opt. Soc. Am. B*, 38, 576 (2021). ([Link](#))

PhD fellowship (2022-2025)

Modal plasmonic Arithmetic and Logic Units.

Starting date: Septembre 2022 **Duration:** 3 ans
Contact : Erik DUJARDIN et Alexandre BOUHELIER
 Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), UBFC CNRS UMR 6303
 Département Photonique - Equipe PRISM
 9 avenue Alain Savary - BP 47870 - 21078 Dijon Cedex - France
 Email: erik.dujardin@cnrs.fr – Phone: +33 (0)3 80 39 59 62.

This multi-disciplinary experimental (optics, nanofabrication and numerical simulations) PhD fellowship aims at designing and realizing plasmonic logic gate devices and at studying their optical properties. The research work will comprise three parts: (i) nanofabrication of 2D plasmonic devices by e-beam lithography and focused ion beam (FIB) milling from mesoscopic ultrathin gold crystals; (ii) optoelectronic characterization of the non-linear response and Boolean operation of the reconfigurable logic gates with increasing complexity; (iii) simulations of the observed phenomena using existing codes based on the Green Dyadic method.

A new class of functional integrated and compact computing devices exploit the optoelectronic properties of noble metals such as gold and silver. The confinement and guiding of light at nanometers scales in the deep sub-wavelength regime thanks to plasmon excitations offer a unique opportunity to design new "all-optical" information transfer and processing paradigms. Our group has recently demonstrated a new concept of arithmetic and logic units (ALU, Fig. 1). We now aim at stepping up in complexity and performances to design actual processors.¹⁻³

This PhD fellowship will contribute to the **ANR DALHAI project** developed in collaboration with CIAD Dijon, a group with advanced expertise in artificial intelligence, with whom we will design the ALU to be nanofabricated and studied at ICB. One major asset of plasmonic devices is the sensitivity of their optical response to electrostatic actuation. This will allow us to explore the next level of integration and reconfiguration at high frequency.⁴ The main objective of this PhD is to demonstrate, operate and numerically model a 2x2 bits full-adder or equivalent and to design processors of higher Boolean complexity. A second objective is to improve our understanding of the physical processes involved in the optoelectronic modulation of the ALU response.^{4,5}

The candidate will prepare the crystalline Au samples from colloidal suspensions and perform all lithographic/etching/milling steps following two complementary approaches implemented in the ARGEN (ICB, Dijon) and MIMENTO (Femto-ST, Besançon) nanofabrication platforms. The optical response of the devices will be studied on a dedicated non-linear optical setup that allows the multi-foci excitation of the ALU and their electronic addressing in order to reconfigure and modulate ($f \sim 1-100$ kHz) the Boolean response of the modal plasmonic logic gates and processors. Experimental images will be compared to numerically simulated maps using an existing code based on the Green Dyadic Method.

The candidate will contribute to the design of complex Boolean ALU assisted by artificial intelligence.

Pre-requisites: A theoretical knowledge of nano/optics and demonstrated skills in experimental optical setup (including microscopy) development and interfacing (LabView) are required. A good background in nanofabrication methods and spoken/written English level C1 are expected. Some knowledge of Python programming will be appreciated.

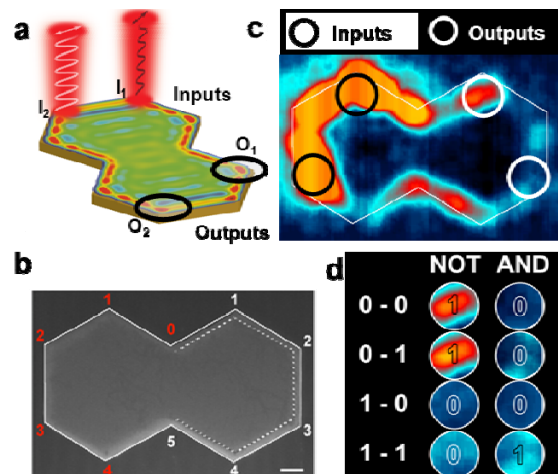


Figure 1: (a) Operation principle of a Double Hexagon (DH) logic gate with 2 inputs and 2 outputs. (b) SEM image of a DH device milled by FIB in an ultrathin and crystalline Au microplatelet. Scale 500 nm (c) Experimental map of the DH gate response in the '0' - '1' excitation configuration. (d) Experimental outputs of the DH gate shown in (b, c) for all four configurations of input polarizations on both inputs. The device simultaneously performs the NOT(I_1) and AND gates.³

- 1 - S. Viarbitskaya, A. Teulle, R. Marty, J. Sharma, C. Girard, A. Arbouet, E. Dujardin, *Nature Materials*, 12, 426 (2013). ([Link](#))
- 2 - U. Kumar, G. Colas des Francs, A. Bouhelier, E. Dujardin, et al. *ACS Photonics*, 5, 2328-2335 (2018). ([Link](#))
- 3 - U. Kumar, A. Cuhe, C. Girard, S. Viarbitskaya, F. Dell'Ova, R. Al Rafrain, G. Colas des Francs, S. Bolisetty, R. Mezzenga, A. Bouhelier, E. Dujardin *ACS Nano*, 15, 13351-13359 (2021). ([Link](#))
- 4 - A. V. Uskov, J. B. Khurgin, M. Buret, A. Bouhelier, I. V. Smetanin, and I. E. Protsenko, *ACS Photonics*, 4, 1501-1505 (2017). ([Link](#))
- 5 - K. Malchow and A. Bouhelier, *J. Opt. Soc. Am. B*, 38, 576 (2021). ([Link](#))