

## Contrat post-doctoral (2024-2025)

### Plasmonique non-linéaire dans des Unités Arithmétiques et Logiques modales.

**Début:** Dès que possible **Durée:** 13 mois (prolongation possible)  
**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.  
**Site de Candidature:** <https://emploi.cnrs.fr/>

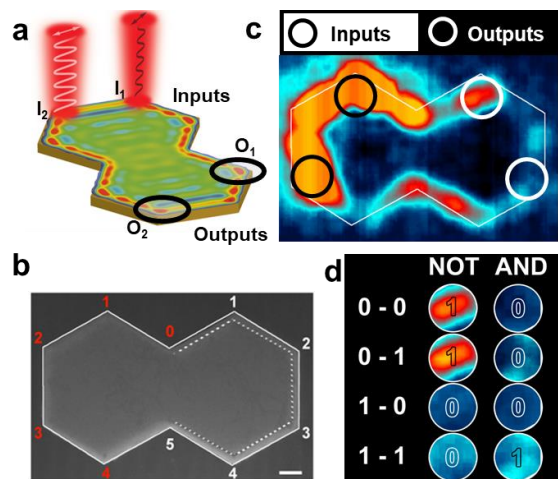
**Ce sujet expérimental (photoluminescence non linéaire, nanofabrication et analyses de données) de stage post-doctoral propose d'étudier les propriétés optiques non linéaires de composants logiques plasmoniques. Le projet consistera à caractériser le comportement plasmonique non-linéaire et le fonctionnement booléen des portes logiques reconfigurables conçues par intelligence artificielles et à analyser en détail les phénomènes, y compris 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.<sup>1-4</sup>

Ce post-doctorat 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.<sup>5</sup> L'objectif principal du programme de recherche 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.<sup>5,6</sup>

Le/la candidat/e caractérisera des ALU sur un **banc d'optique non-linéaire** dédié permettant une **excitation multi-faisceaux** ainsi que leur **adressage électrique** en vue de **reconfigurer et moduler ( $f \sim 1-100$  kHz)** la réponse booléenne des calculateurs plasmoniques modaux. Une analyse approfondie des mesures sera exigée, si besoin avec l'aide du formalisme de Green et de codes existants permettant de **simuler et interpréter les images optiques** expérimentales. Enfin, le/la candidate **participera à la conception des évolutions du banc optique capables d'accueillir 4 faisceaux d'excitation tout en contrôlant leurs polarisation et phase relative pour tester des ALU à fonction booléenne complexe.**

**Pré-requis:** Une excellente maîtrise expérimentale du développement et de l'interfaçage (C#) de bancs optiques expérimentaux et microscopie sont exigées. Des connaissances approfondies en analyse de données et un niveau d'anglais écrit/parlé C1 sont demandées. 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 excitation '0' - '1' pour les quatre configurations de polarisation des entrées. Elle réalise simultanément les portes NOT( $I_1$ ) et AND.<sup>3</sup>

- 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 - F. Dell'Ova, Y. Brulé, D. Shakirova, N. Gros, J. Bizouard, A. Leray, A. Bertaux, O. Labbani Narsis, C. Nicolle, G. Colas des Francs, A. Bouhelier, E. Dujardin. *ACS Photon.*, 2024, 11, 752-761 ([Link](#))
- 5 - A. V. Uskov, J. B. Khurgin, M. Buret, A. Bouhelier, I. V. Smetanin, and I. E. Protsenko, *ACS Photonics*, 4, 1501-1505 (2017). ([Link](#))
- 6 - K. Malchow and A. Bouhelier, *J. Opt. Soc. Am. B*, 38, 576 (2021). ([Link](#))

## Post-Doctoral fellowship (2024-2025)

### *Non-linear plasmonics in Modal Arithmetic and Logic Units.*

**Starting date:** as soon as possible      **Duration:** 13 months (with possible extension)

**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.*

**Application website:** <https://emploi.cnrs.fr/>

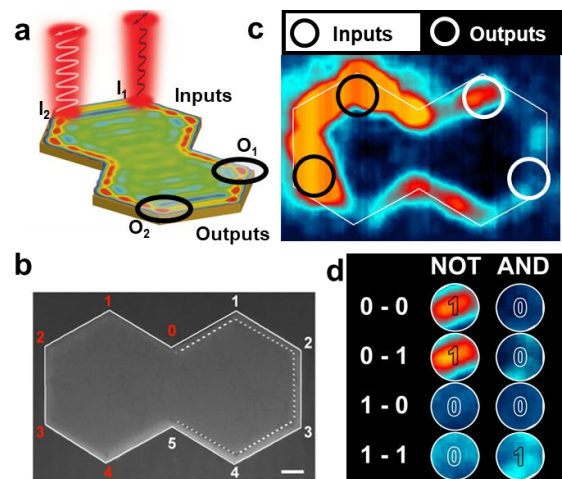
**This experimental (non linear photoluminescence, nanofabrication and data analysis) post-doctoral fellowship aims at studying the non-linear optical properties of plasmonic logic gate devices. The research work will consist in the optoelectronic characterization of the non-linear response and Boolean operation of the reconfigurable logic gates designed by artificial intelligence and in analyzing in detail the observed phenomena using existing codes based on the Green Dyadic method. Finally, the optical bench will be designed and upgraded to accommodate 4 excitation beams with controlled polarization and relative phase in order to test more complex arithmetic and logic units.**

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.<sup>1-4</sup>

This post-doctoral 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.<sup>5</sup> The main objective of the proposed research program 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 opto-electronic modulation of the ALU response.<sup>5,6</sup>

The candidate will characterize the logic devices 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** ( $f \sim 1\text{-}100\text{ kHz}$ ) the Boolean response of the modal plasmonic processors. The candidate will carry out an in-depth analysis of the data, including with **numerically simulated maps** using an existing codes based on the **Green Dyadic Method**. The candidate will **contribute to the design and implementation of the optical bench upgrade** in order to **accommodate 4 excitation beams while controlling their respective polarizations and relative phase to test more complex Boolean ALU designed by artificial intelligence.**

**Pre-requisites:** Demonstrated extensive skills in experimental optical setup (including microscopy) development and interfacing (C#) are required. A good background in data analysis 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.<sup>3</sup>

- 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. Cuche, 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 - F. Dell'Ova, Y. Brulé, D. Shakirova, N. Gros, J. Bizouard, A. Leray, A. Bertaux, O. Labbani Narsis, C. Nicolle, G. Colas des Francs, A. Bouhelier, E. Dujardin. *ACS Photon.*, 2024, 11, 752-761 ([Link](#))
- 5 - A. V. Uskov, J. B. Khurgin, M. Buret, A. Bouhelier, I. V. Smetanin, and I. E. Protsenko, *ACS Photonics*, 4, 1501-1505 (2017). ([Link](#))
- 6 - K. Malchow and A. Bouhelier, *J. Opt. Soc. Am. B*, 38, 576 (2021). ([Link](#))



- 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 - F. Dell'Ova, Y. Brulé, D. Shakirova, N. Gros, J. Bizouard, A. Leray, A. Bertaux, O. Labbani Narsis, C. Nicolle, G. Colas des Francs, A. Bouhelier, E. Dujardin. **ACS Photon.**, **2024**, 11, 752-761 ([Link](#))
- 5 - A. V. Uskov, J. B. Khurgin, M. Buret, A. Bouhelier, I. V. Smetanin, and I. E. Protsenko, **ACS Photonics**, 4, 1501-1505 (2017). ([Link](#))
- 6 - K. Malchow and A. Bouhelier, **J. Opt. Soc. Am. B**, 38, 576 (2021). ([Link](#))