

1 RESUME DU PROJET

1.1 Nom et prénom du porteur

Chaabane Djeraba, Pierre Boulet, Tanmoy Mondal

1.2 Axe de recherche de l'IRCICA dans lequel ce projet se positionne

Axe bio-inspiré

1.3 Intitulé du projet

Extraction de motifs dans un réseau de neurones à impulsion et implantation dans une carte FPGA

1.4 Résumé

Le projet vise à concevoir un système neuromorphique capable de détecter en temps réel des motifs spatio-temporels dans l'activité de réseaux de neurones impulsifs (SNN). Ces réseaux traitent l'information par des événements discrets (spikes), selon un codage temporel favorisant un calcul parcimonieux et économe en énergie. Un apprentissage auto-supervisé permettra au réseau de découvrir des régularités temporelles sans annotation. L'architecture sera implantée sur FPGA selon le protocole AER, combinant rapidité, parallélisme et faible consommation. La méthodologie inclut la simulation (Brian2, NEST), la détection de polychronies, puis la transposition matérielle optimisée (arithmétique fixe, pipelining, compression). Nous étudierons également le déploiement sur du matériel neuromorphique tel que **Loihi 2**^{1 2} d'Intel [1] et les processeurs **Speck** de **SynSense** [2]³, reconnus pour leur efficacité énergétique et leurs performances événementielles. Ce projet s'inscrit dans la stratégie de l'axe bio-inspiré de l'IRCICA, promouvant des architectures frugales et adaptatives inspirées du cerveau.

2 DESCRIPTIF DU PROJET

2.1 Sujet de recherche et contexte scientifique

Le projet « Extraction de motifs dans un réseau de neurones à impulsion et implantation sur FPGA » s'inscrit dans le champ du calcul neuromorphique, à la croisée des neurosciences computationnelles, de l'intelligence artificielle et du matériel reconfigurable. Ce domaine en plein essor vise à concevoir des systèmes inspirés du cerveau, capables de

1. <https://open-neuromorphic.org/neuromorphic-computing/hardware/loihi-2-intel/>

2. <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/research/neuromorphic-computing.html>

3. <https://www.synsense.ai/synsense-releases-the-speck-demo-kit-enabling-users-to-rapidly-deploy-and-validate-event-based-neuromorphic-vision-applications/>

traiter l'information de manière asynchrone, distribuée et économe en énergie, comme le montrent les architectures neuromorphiques Loihi (Intel), TrueNorth (IBM) et SpiNNaker (Manchester).

Les réseaux de neurones impulsionsnels (SNN) reposent sur la plasticité dépendante du temps d'impulsion (STDP), mécanisme permettant l'émergence spontanée de motifs spatio-temporels reflétant des régularités internes du réseau [8]. Ces structures, analogues à des formes élémentaires de mémoire, sont au cœur du lien entre apprentissage local et reconnaissance de motifs neuronaux.

Si les SNN ont d'abord été appliqués à la classification d'images, leur potentiel pour des tâches dynamiques – reconnaissance d'actions, flux optique ou imagerie médicale [3] – motive aujourd'hui l'étude de leur apprentissage auto-supervisé (SSL). Toutefois, la discontinuité des spikes rend difficile l'adaptation directe des méthodes SSL développées pour les réseaux artificiels. Des approches récentes, telles que celles de Qiu et al. [4] ou Singhal et al. [5], ont amorcé cette convergence, mais leurs performances restent limitées.

L'objectif du projet est de développer un cadre auto-supervisé pour SNN exploitant la dynamique temporelle des spikes afin d'extraire des motifs récurrents transférables à des tâches de vision (détection, segmentation). Ces motifs seront implantés sur FPGA pour démontrer une détection en temps réel et à faible consommation énergétique, prolongeant les travaux de Barchid [8] sur la représentation et l'exploitation matérielle de l'activité neuronale.

Cette recherche, à l'intersection du SSL, du calcul événementiel et du FPGA, vise à jeter les bases de systèmes neuromorphiques embarqués, capables d'apprendre et de s'adapter sans supervision explicite, ouvrant ainsi la voie à une IA frugale et bio-inspirée.

2.2 Les objectifs visés, les résultats escomptés à court et long terme

2.2.1 Objectifs scientifiques et technologiques

L'objectif principal du projet est de concevoir, simuler et implanter un système neuromorphique capable de détecter en temps réel des motifs neuronaux dans un réseau de neurones à impulsion. Pour cela, plusieurs axes de travail sont définis :

- Modéliser et simuler des SNN réalistes à l'aide d'environnements tels que Brian2 ou NEST, afin de générer des flux d'impulsions représentatifs d'une activité neuronale biologique ou synthétique.
- Développer un algorithme de détection de motifs spatio-temporels, inspiré des approches statistiques comme SPADE (Spatio-Temporal Pattern Detection), reposant sur la recherche de coïncidences temporelles entre neurones.
- Intégrer un apprentissage auto-supervisé : au-delà de la STDP classique, le projet explorera des stratégies permettant au réseau d'utiliser ses propres signaux internes (corrélations, rythmes, récurrences) comme source d'apprentissage. L'objectif est de doter le système d'une capacité d'adaptation autonome, sans recours à des données labellisées.

- Implanter l’algorithme sur FPGA en adoptant une architecture événementielle basée sur le protocole AER (Address-Event Representation). Cette implantation nécessitera une adaptation matérielle des calculs (arithmétique à virgule fixe, pipelining, compression mémoire, parallélisation partielle).

L’ensemble du système sera validé selon une méthodologie rigoureuse :

- **Phase logicielle** : validation de la détection de motifs par simulation, évaluation quantitative (précision, rappel, F1-score).
- **Phase matérielle** : mesure des performances sur FPGA (latence, consommation énergétique, occupation logique). Une comparaison entre les deux versions permettra d’évaluer les gains d’efficacité et de rapidité apportés par l’implantation matérielle.

2.2.2 Résultats escomptés à court terme

À court terme, le projet vise la réalisation d’un prototype complet articulant les composantes suivantes :

- Un modèle fonctionnel de réseau de neurones à impulsion simulé sous Brian2 ou NEST ;
- Un algorithme de détection de motifs capable d’identifier des polychronies récurrentes dans les flux d’impulsions ;
- Une implémentation FPGA du pipeline de détection, comprenant la communication événementielle (AER), la gestion temporelle et la comparaison logique de motifs ;
- Une évaluation comparative entre les performances logicielles et matérielles, mettant en évidence les gains en rapidité et en consommation.

Ce prototype constituera une preuve de concept démontrant la faisabilité de la détection neuromorphique en temps réel sur matériel reconfigurable.

2.2.3 Résultats et perspectives à long terme

À long terme, le projet ambitionne de poser les bases d’architectures neuromorphiques adaptatives capables d’apprendre et de détecter des régularités complexes sans supervision. En intégrant des mécanismes d’apprentissage auto-supervisé, il ouvre la voie à une forme d’intelligence embarquée où le système ajuste ses paramètres en fonction de son propre flux d’activité, à la manière du cerveau.

Les perspectives de ce travail sont multiples :

- Scientifiques, avec une meilleure compréhension du lien entre dynamique neuronale, plasticité locale et émergence de motifs temporels.
- Technologiques, en démontrant la faisabilité d’un calcul événementiel temps réel à très faible consommation sur FPGA.
- Applicatives, notamment pour la robotique neuromorphique, le traitement sensoriel embarqué, la surveillance neuronale, ou encore la détection de régularités dans des flux biologiques ou industriels.

En combinant modélisation neuronale, apprentissage local et conception matérielle optimisée, le projet propose une approche intégrée du calcul inspiré du cerveau. Il contribue ainsi à rapprocher la neuroscience computationnelle et la microélectronique reconfigurable, dans la perspective d'une intelligence artificielle plus autonome, parcimonieuse et adaptative.

2.3 Détail du budget

- Nous sollicitons le financement d'un stage de 6 mois, niveau Master 2, à raison de 670 € par mois, soit un total de 4 020 €.
- Nous demandons également 980 € pour l'acquisition de matériel neuromorphique destiné à tester les modèles développés.
- Le montant total demandé pour ce projet s'élève donc à 5 000 €.

2.3.1 Les personnes impliquées et les collaborations prévues

Le travail se fera en collaboration entre les deux équipes FOX et EMERAUDE-3XS.

3 ARGUMENTAIRE

3.1 Quels sont les liens du projet avec les plateformes soutenues par l'IRCICA ?

Le travail se fera en lien avec la plateforme bio-inspirée de l'IRCICA, issue de la chaire industrielle ANVI.

3.2 En quoi le projet soutient-il les vision et stratégie recherche de l'axe de recherche concerné ?

Le projet soutient la stratégie de l'axe bio-inspiré de l'IRCICA, centrée sur des architectures bio-inspirées et frugales. En associant SNN et implémentation matérielle événementielle, il explore des formes d'apprentissage auto-supervisé proches des mécanismes biologiques, renforçant ainsi la recherche sur l'adaptativité et l'efficacité énergétique.

3.3 Quels sont les effets leviers espérés ?

Positionnement éventuel du projet participe au regard des programmes de recherche régionaux et/ou nationaux (CPER, PEPR, etc...)

Le projet permet un bon positionnement sur le CPER CONELIA.

Références

- [1] Mike Davies et al. Advancing neuromorphic computing with loihi : A survey of results and outlook. *Proceedings of the IEEE*, 109(5) :911–934, 2021.
- [2] Manish Darshan, Shih-Chii Zhang, and Shuang Liu. Speck : A general-purpose neuromorphic processor with multi-core on-chip learning support. In 2021 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1–5. IEEE, 2021. doi : 10.1109/ISCAS51556.2021.9401391.
- [3] Alex Vicente-Sola, Davide L. Manna, Paul Kirkland, Gaetano Di Caterina, and Trevor J. Bihl. *Spiking neural networks for event-based action recognition : A new task to understand their advantage*. Neurocomputing, 611 :128657, 2025. ISSN 0925-2312. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231224014280>.
- [4] Haonan Qiu, Zeyin Song, Yanqi Chen, Munan Ning, Wei Fang, Tao Sun, Zhengyu Ma, Li Yuan, and Yonghong Tian. *Temporal contrastive learning for spiking neural networks*. arXiv preprint arXiv :2305.13909, 2023
- [5] Raghav Singhal, Jan Finkbeiner, and Emre Neftci. *Self-supervised pre-training of spiking neural networks by contrasting events and frames*. In UniReps : 2nd Edition of the Workshop on Unifying Representations in Neural Models, 2024. URL <https://openreview.net/forum?id=DNopfn4hZf>.
- [6] Z. Zhou et al. *Spikformer v2 : Join the high accuracy club on imagenet with an snn ticket*. arXiv preprint arXiv :2401.02020, 2024b.
- [7] Jason K Eshraghian, Max Ward, Emre O Neftci, Xinxin Wang, Gregor Lenz, Girish Dwivedi, Mohammed Bennamoun, Doo Seok Jeong, and Wei D Lu. *Training spiking neural networks using lessons from deep learning*. Proceedings of the IEEE, 111(9) :1016–1054, 2023. doi :10.1109/JPROC.2023.3308088.
- [8] S. Barchid, *Avancées en vision neuromorphique : représentation événementielle, réseaux de neurones impulsions supervisés et pré-entraînement auto-supervisé*, Thèse de doctorat, Université de Lille, 2023.