

Réseaux de Hopfield impulsionnels : vers une mémoire attentionnelle événementielle

Durée : 4 à 6 mois

Début : Début 2026

Contexte scientifique

Les mécanismes d'attention ont profondément transformé l'intelligence artificielle moderne (Vaswani et al., 2017). Les architectures de type *Transformer* reposent sur une mémoire dense et différentiable, à l'origine de remarquables capacités de généralisation. Des travaux récents (Ramsauer et al., 2020) ont montré que ces mécanismes sont **mathématiquement équivalents à des réseaux de Hopfield modernes**, gouvernés par une fonction d'énergie dont les minima représentent des états attracteurs — autrement dit, des mémoires stables.

Ce rapprochement entre *attention* et *modèle à base d'énergie* clarifie le fonctionnement des modèles actuels, mais il souligne aussi un contraste frappant avec les systèmes biologiques. Le cerveau traite l'information par **impulsions discrètes et asynchrones**, avec une consommation d'à peine **0,5 kWh par jour**, alors que l'entraînement d'un grand modèle de langage moderne requiert typiquement **100 à 1000 MWh** d'énergie — l'équivalent de **plusieurs millénaires** d'activité cérébrale.

Les *Spiking Neural Networks* (SNNs) incarnent la troisième génération de modèles neuronaux (Maass, 1997), plus proche du cortex où le codage repose sur le temps des impulsions plutôt que sur leur amplitude. Ce paradigme inspire aussi les processeurs neuromorphiques, tels que *Loihi 2* d'Intel, qui intègrent plus d'un million de neurones impulsionnels et environ 120 millions de synapses sur la surface d'une carte bancaire, permettant un calcul événementiel à très faible consommation (Davies et al., 2021).

Ce stage explore la jonction entre ces deux paradigmes. Il s'appuie sur un **prototype de modèle de réseau de Hopfield impulsif bayésien déjà développé au laboratoire**, combinant la dynamique fondée sur la fonction d'énergie des réseaux de Hopfield modernes et le calcul événementiel des neurones impulsif.

Objectif scientifique

Le stage vise à étudier comment la dynamique d'un réseau de Hopfield impulsif influence ses propriétés de mémoire et d'attention. Selon le profil du/de la stagiaire, l'accent pourra être mis soit sur l'analyse théorique (régimes dynamiques, attracteurs, stabilité), soit sur l'évaluation pratique (performances, robustesse, efficacité et comparaison avec des modèles attentionnels).

Tâches principales

- Réaliser un **état de l'art** sur les mécanismes attentionnels.
- Simuler le modèle et analyser ses **régimes dynamiques**.
- Évaluer la **capacité de mémoire spatio-temporelle** et la **robustesse au bruit**.
- Comparer les performances et l'efficacité énergétique avec des mécanismes attentionnels.

Résultats attendus et portée scientifique

Le projet vise à mieux comprendre comment la temporalité des impulsions transforme la dynamique d'attraction et permet une **mémoire attentionnelle plus frugale et interprétable**. Les résultats attendus concernent :

- l'identification de régimes dynamiques propres au traitement par impulsions ;
- une meilleure compréhension des compromis entre stabilité, plasticité et efficacité énergétique ;
- des perspectives pour la modélisation bio-inspirée de la mémoire et de l'attention.

Ce stage s'inscrit dans le cadre du programme national **PEPR Émergences**, dédié aux modèles bio-inspirés, événementiels et proches de la physique pour une IA frugale et embarquée. Il s'appuie sur l'héritage des travaux pionniers de John Hopfield — *prix Nobel de physique 2024* — dont les modèles à base d'énergie ont profondément influencé la compréhension contemporaine des dynamiques neuronales et des mécanismes attentionnels. Ce stage s'inscrit dans une perspective de convergence entre intelligence artificielle et neurosciences computationnelles. Une **publication scientifique** est envisagée à l'issue du stage.

Profil recherché

Étudiant·e de master ou d'école d'ingénieur (Machine Learning, Physique statistique, Neurosciences computationnelles, Mathématiques appliquées), très motivé·e et disposant de bonnes bases en probabilités et en apprentissage automatique. Un intérêt pour les systèmes dynamiques, les modèles à base énergie ou les mécanismes attentionnels sera apprécié. **Compétences souhaitées** : Python, PyTorch.

Encadrement scientifique : Pierre Boulet (pierre.boulet@univ-lille.fr), Adrien Fois (adrien.fois@univ-lille.fr)

Lieu : Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille (CRISAL)

Début : Début 2026 **Durée** : 4–6 mois **Gratification** : environ 600 euros / mois

Références

- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., and Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 30.
- Ramsauer, H., Schäfl, B., Lehner, J., Seidl, P., Widrich, M., Adler, T., Grill, M., Heusel, M., Hopfield, J. J., Kreil, D., Klambauer, G., Hochreiter, S. (2020). Hopfield Networks is All You Need. *arXiv preprint arXiv :2008.02217*.
- Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 79(8) :2554–2558.
- Maass, W. (1997). Networks of spiking neurons : The third generation of neural network models. *Neural Networks*, 10(9) :1659–1671.
- Davies, M., Wild, A., Orchard, G., Sandamirskaya, Y., Guerra, G. A., Joshi, P., Plank, P., and Risbud, S. R. (2021). Loihi 2 : A neuromorphic chip with generalized spike-based learning and programmable plasticity. *IEEE Micro*, 41(5) :82–93. doi :10.1109/MM.2021.3101715.