

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Modèles neuronaux bio-inspirés pour l'intelligence artificielle et la vision par ordinateur

Référence : **TIS-DTIS-2025-07**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2025

Date limite de candidature : Mai 2025

Mots clés : Intelligence Artificielle, Vision par ordinateur, Réseaux de neurones biologiquement inspirés

Profil et compétences recherchées

Master 2 ou Grande école d'ingénieur, avec une spécialisation en intelligence artificielle, vision par ordinateur ou mathématiques appliquées.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Contexte : limitations des réseaux de neurones profonds

Les approches contemporaines d'Intelligence Artificielle (IA) sont dominées par l'apprentissage profond (« Deep Learning ») : elles reposent sur une architecture de réseaux de neurones dite « feed-forward » de très grande taille (plusieurs millions à milliards de paramètres), des grandes quantités de données et une optimisation par descente de gradient stochastique. Ces approches ont démontré une certaine efficacité sur un grand nombre de tâches d'IA, par exemple en vision par ordinateur ou traitement du langage naturel. Cependant, bien qu'inspirés originellement par le fonctionnement du cerveau — ce sont des « réseaux de neurones » — ils sont aussi caractérisés par un certain nombre de limitations lorsqu'on les compare aux systèmes biologiques :

- Capacité de généralisation difficile à cerner ou à garantir : distributions complexes dans espaces de grande dimension, phénomène de double descente ou de « grokking »
- Comportements délicats à contrôler ou anticiper : effet boîte noire, phénomènes d'hallucination, sensibilité aux attaques adverses, incertitudes mal calibrées, prédictions non crédibles en dehors des distributions d'apprentissage
- Évolutivité faible : apprentissage continu ou incrémental sujet à oubli, capacité limitée d'apprentissage à partir de quelques exemples.
- Énergivore: en apprentissage mais aussi en inférence (~3W.h par requête ChatGPT = 10x requête moteur de recherche).

On se propose dans cette thèse de se rapprocher des modèles inspirés de la biologie pour répondre à certaines des limitations des réseaux de neurones profonds actuels pour des tâches de vision par ordinateur (classification d'image, détection d'objet, segmentation, pistage vidéo).

Les réseaux de neurones bio-inspirés

Une première manière de prendre inspiration de la biologie est de reproduire ce que l'on connaît de la façon dont sont réalisés les calculs dans le cerveau (« Brain Inspired Computing » [1] [2]). Un exemple typique de ce type d'approche sont les réseaux de spike [3], [4] qui modélisent plus finement la dynamique de propagation des signaux électrochimiques dans les neurones.

Une autre stratégie, et c'est celle qui sera envisagée dans la thèse, est de prendre appui sur une interprétation biologique du fonctionnement du cerveau. L'une des approches les plus développées dans la littérature est le codage prédictif [5]: elle exploite une perspective bayésienne sur la façon dont le cerveau traite l'information, en mettant l'accent sur le rôle des modèles probabilistes et la minimisation des erreurs de prédiction en inférence et en apprentissage. Fondamentalement, le

codage prédictif - parfois référencé dans la littérature sous par l'expression *cerveau bayésien* - suggère que le cerveau génère continuellement des prédictions sur les entrées sensorielles et qu'il les actualise en fonction des données sensorielles reçues et des erreurs de prédiction [6]. L'objectif du réseau n'est pas de traiter des données (entrée/sortie), mais de maintenir un modèle capable de prédire ses expériences perceptives.

Un certain nombre de modèles de codage prédictif ont été proposés dans la littérature, soit inspirés directement de la biologie [7], [8], [9], [10], soit issus de considérations informationnelles comme le modèle JEPa [11]. Ils ont été utilisés pour des applications de vision par ordinateur [12], [13], [14] ou de planification [15]. Certains modèles de codage prédictif sont également présentés comme alternative à la rétro-propagation du gradient [16], [17], [18], le mécanisme algorithmique élémentaire utilisé par l'apprentissage profond. Quelques environnements de programmation sont disponibles [12], [13].

Directions de recherche envisagées

L'objectif de la thèse est de revisiter les tâches classiques de la vision par ordinateur, maintenant reposant fortement sur des modèles de fondation instanciés sous la forme d'architectures « feed-forward » ou autorégressives [19], [20], [21], et de proposer des alternatives fondées sur une approche inspirée des modèles biologiques, avec l'ambition de corriger certaines de leurs faiblesses.

On pourra s'intéresser aux questions scientifiques suivantes :

- Passage à l'échelle des réseaux biologiquement inspirés (données massives de grande dimension, tâches multiples numériques et sémantiques de vision par ordinateur) : est-ce faisable ?
- Apprentissage de représentation et approche end-to-end des réseaux profonds feed-forward: peut-on développer une même facilité de conception avec les réseaux biologiquement inspirés ?
- Apprentissage des réseaux biologiquement inspirés: quelles stratégies utiliser?
- Comment exploiter les deux types de signaux du codage prédictif, prédiction et erreur, pour un meilleur contrôle des réseaux ?
- Peut-on associer deux types d'architectures: par réseau feed-forward massif de représentation et/ou par minimisation itérative d'erreur de prédiction.
- Comment augmenter les capacités des réseaux d'inspiration biologique : apprentissage incrémental à partir de peu d'exemples.

Les travaux auront vocation à être publiés dans des conférences ou journaux d'intelligence artificielle ou de vision par ordinateur.

Références

- [1] J. Tang *et al.*, « Bridging Biological and Artificial Neural Networks with Emerging Neuromorphic Devices: Fundamentals, Progress, and Challenges », *Advanced Materials*, vol. 31, n° 49, p. 1902761, déc. 2019, doi: 10.1002/adma.201902761.
- [2] G. Li *et al.*, « Brain-Inspired Computing: A Systematic Survey and Future Trends », *Proceedings of the IEEE*, p. 1-41, 2024, doi: 10.1109/JPROC.2024.3429360.
- [3] A. Tavanaei, M. Ghodrati, S. R. Kheradpisheh, T. Masquelier, et A. Maida, « Deep learning in spiking neural networks », *Neural Networks*, vol. 111, p. 47-63, mars 2019, doi: 10.1016/j.neunet.2018.12.002.
- [4] M. Pfeiffer et T. Pfeil, « Deep Learning With Spiking Neurons: Opportunities and Challenges », *Front. Neurosci.*, vol. 12, oct. 2018, doi: 10.3389/fnins.2018.00774.
- [5] R. P. Rao et D. H. Ballard, « Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects », *Nature neuroscience*, vol. 2, n° 1, p. 79, 1999.
- [6] K. Friston, « The free-energy principle: a unified brain theory? », *Nature reviews neuroscience*, vol. 11, n° 2, p. 127, 2010.
- [7] B. Millidge, A. Seth, et C. L. Buckley, « Predictive Coding: a Theoretical and Experimental Review », 12 juillet 2022, *arXiv*: arXiv:2107.12979. doi: 10.48550/arXiv.2107.12979.
- [8] B. van Zwol, R. Jefferson, et E. L. van den Broek, « Predictive Coding Networks and Inference Learning: Tutorial and Survey », 22 juillet 2024, *arXiv*: arXiv:2407.04117. doi: 10.48550/arXiv.2407.04117.

- [9] T. Salvatori *et al.*, « Brain-Inspired Computational Intelligence via Predictive Coding », 15 août 2023, *arXiv*: arXiv:2308.07870. doi: 10.48550/arXiv.2308.07870.
- [10] A. Ororbia, A. Mali, A. Kohan, B. Millidge, et T. Salvatori, « A Review of Neuroscience-Inspired Machine Learning », 16 février 2024, *arXiv*: arXiv:2403.18929. doi: 10.48550/arXiv.2403.18929.
- [11] Y. LeCun, « A Path Towards Autonomous Machine Intelligence Version 0.9. 2, 2022-06-27 », 2022.
- [12] W. Lotter, G. Kreiman, et D. Cox, « Deep predictive coding networks for video prediction and unsupervised learning », in *ICLR*, 2017.
- [13] M. W. Spratling, « A hierarchical predictive coding model of object recognition in natural images », *Cognitive computation*, vol. 9, n° 2, p. 151-167, 2017.
- [14] H. Wen, K. Han, J. Shi, Y. Zhang, E. Culurciello, et Z. Liu, « Deep Predictive Coding Network for Object Recognition », in *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning*, J. Dy et A. Krause, Éd., in *Proceedings of Machine Learning Research*, vol. 80. Stockholm: PMLR, juill. 2018, p. 5266-5275. [En ligne]. Disponible sur: <http://proceedings.mlr.press/v80/wen18a.html>
- [15] R. P. N. Rao, D. C. Gklezacos, et V. Sathish, « Active Predictive Coding: A Unifying Neural Model for Active Perception, Compositional Learning, and Hierarchical Planning », *Neural Computation*, vol. 36, n° 1, p. 1-32, déc. 2023, doi: 10.1162/neco_a_01627.
- [16] B. Millidge, A. Tschantz, et C. L. Buckley, « Predictive Coding Approximates Backprop Along Arbitrary Computation Graphs », *Neural Computation*, vol. 34, n° 6, p. 1329-1368, mai 2022, doi: 10.1162/neco_a_01497.
- [17] R. Rosenbaum, « On the relationship between predictive coding and backpropagation », *PLOS ONE*, vol. 17, n° 3, p. e0266102, mars 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0266102.
- [18] U. Zahid, Q. Guo, et Z. Fountas, « Predictive Coding as a Neuromorphic Alternative to Backpropagation: A Critical Evaluation », *Neural Computation*, vol. 35, n° 12, p. 1881-1909, nov. 2023, doi: 10.1162/neco_a_01620.
- [19] M. Awais *et al.*, « Foundational Models Defining a New Era in Vision: A Survey and Outlook », 25 juillet 2023, *arXiv*: arXiv:2307.13721. doi: 10.48550/arXiv.2307.13721.
- [20] R. Bommasani *et al.*, « On the Opportunities and Risks of Foundation Models », 12 juillet 2022, *arXiv*: arXiv:2108.07258. doi: 10.48550/arXiv.2108.07258.
- [21] J. Zhang, J. Huang, S. Jin, et S. Lu, « Vision-Language Models for Vision Tasks: A Survey », 2 avril 2023, *arXiv*: arXiv:2304.00685. doi: 10.48550/arXiv.2304.00685.

Collaborations envisagées

A définir.

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Stéphane Herbin

Tél. : 01 80 38 65 69 Email : stephane.herbin@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Stéphane Herbin

Laboratoire : ONERA-DTIS

Tél. : 01 80 38 65 69

Email : stephane.herbin@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>