

Sujet : Intégration de capteurs neuro-inspirés à base d'oxyde de vanadium

Directeur : Etienne Puyoo (soutenance d'HDR prévue le 11 mars 2025 - taux d'encadrement : 40%, compétences : technologies salle blanche, micro-réflexivité optique, caractérisation électrique sous stress mécanique)

Co-encadrants :

- David Albertini (taux d'encadrement : 30%, compétences : microscopie thermique à balayage)
- Nicolas Baboux (taux d'encadrement : 40%, compétences : caractérisation électrique sous stress thermique, conception de l'oscillateur à relaxation)

Justification éventuelle (pour 3 encadrants) : Le comité d'encadrement comprend 3 membres en raison de leurs compétences diversifiées nécessaires au bon déroulement de la thèse.

Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s) (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)) (*) : Le(la) doctorant(e) sera affecté à 100% au sein de l'équipe électronique de l'INL. Il(elle) sera amené(e) à effectuer une à deux missions de 4 à 5 mois à l'étranger au sein de l'Australian National University à Canberra pour élaborer des dispositifs de test.

Mots clés : neurone artificiel, oxyde de vanadium, matériau à changement de phase, thermorécepteur, mécanorécepteur.

Résumé : Les dispositifs à résistance différentielle négative (NDR) représentent de bons candidats pour le développement d'oscillateurs à relaxation utilisés comme neurones artificiels (figure 1a) au sein d'architectures matérielles neuromorphiques [1,2]. Parmi les matériaux envisagés pour ce type d'application, l'oxyde de vanadium semble particulièrement intéressant car il présente sous ses différentes phases (VO_2 , V_3O_5 , V_4O_7) des transitions isolant/métal favorables à l'établissement du comportement NDR. L'idée directrice du projet consistera à élaborer des neurones artificiels à base d'oxyde de vanadium intégrés sur silicium et à étudier leur réponse à des stimuli externes (thermique et mécanique) afin d'évaluer leur capacité à imiter le comportement de neurones sensoriels (figure 1b) [3-6].

Points forts : Ce sujet de thèse consacré au développement de systèmes neuro-inspirés s'intègre dans le cadre d'un partenariat avec l'Australian National University (ANU) basée à Canberra. Un financement de type IRP (International Research Project) vient d'être alloué par le CNRS début 2024 pour une durée de 5 ans afin de renforcer cette collaboration sur une thématique scientifique qui est au cœur de la stratégie de développement de l'INL.

Collaboration/partenariats extérieurs éventuels : Australian National University.

Domaine et contexte scientifique : Dans le cadre d'une collaboration naissante avec l'équipe de Rob G. Elliman (<https://orcid.org/0000-0002-1304-4219>) de l'ANU, nous nous sommes intéressés ces trois dernières années à l'étude de l'origine physique du comportement NDR au sein de deux familles de dispositifs fonctionnels à base d'oxyde de Niobium et d'oxyde de Vanadium [7, 8]. Nous projetons aujourd'hui de renforcer cette collaboration en étendant notre étude au développement de capteurs imitant le comportement de cellules nerveuses du système sensoriel épidermique [3-6]. L'idée directrice du projet est d'étudier la réponse de neurones artificiels à base d'oxyde de vanadium à des stimuli externes mécaniques et thermiques afin d'évaluer leur capacité à imiter le comportement de neurones sensoriels. Le mode de fonctionnement particulier de ce nouveau type de capteur biomimétique (fréquence propre de l'oscillateur dépendante de l'intensité du stimulus externe) faciliterait et allègerait l'intégration d'éléments sensibles au sein d'architectures matérielles

neuromorphiques, ouvrant alors des perspectives dans les domaines de l'intelligence artificielle, de la robotique et des prothèses médicales [3-6].

Objectifs de la thèse : Nous souhaitons dans un premier temps intégrer des structures MOM (métal/oxyde/métal) planaires à base d'oxyde de vanadium sous différentes phase (VO_2 , V_3O_5 , V_4O_7) pour réaliser des oscillateurs à relaxation simulant le fonctionnement de neurones à impulsions. Par la suite, nous étendrons notre étude au développement de mécano- et thermo-récepteurs qui imitent le comportement de cellules nerveuses du système sensoriel épidermique [3-6]. Pour ce faire, les dispositifs élaborés en collaboration avec le partenaire australien seront analysés par des techniques de microscopie thermique à balayage et de micro-réflectivité optique, puis caractérisés électriquement sous stimuli thermique et mécanique. La finalité du projet est d'aboutir à la fabrication de neurones sensoriels avec une architecture basée sur l'effet Pearson-Anson [7]. Le mode de fonctionnement particulier de ce nouveau type de capteur biomimétique devrait faciliter l'intégration d'éléments sensibles au sein de réseaux de neurones.

Verrous scientifiques : Voici une liste non-exhaustive des verrous scientifiques et technologiques à lever dans le cadre de ce projet :

- caractérisation des coefficients de température et facteur de jauge quasi-statiques des dispositifs NDR à base d'oxyde de vanadium sous différentes phases ;
- imagerie thermique dynamique de neurones artificiels ;
- étude physique de la réponse électro-thermique et électromécanique de dispositifs NDR ;
- obtention de démonstrateurs de type thermo- et mécano-récepteur neuro-inspirés.

Figures :

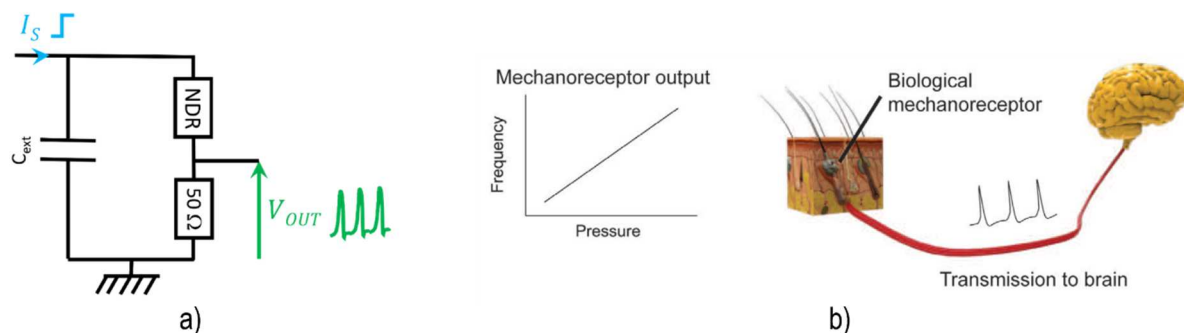


Figure 1 : a) Oscillateur à relaxation ; b) Illustration du fonctionnement d'un mécano-récepteur épidermique [6].

Contributions originales attendues : Plusieurs études récentes se sont intéressées au développement de neurones sensoriels artificiels [4-6]. Ces différentes études ont toutes utilisé une approche commune basée sur le couplage d'un capteur avec un circuit oscillateur externe (oscillateur en anneau ou circuit de conversion tension-fréquence). Contrairement aux approches précédentes, nous proposons ici d'utiliser l'élément principal de l'oscillateur à relaxation (la structure MOM à base d'oxyde de vanadium) comme élément sensible à la contrainte mécanique (mécano-récepteur) et à la température (thermo-récepteur). Cette nouvelle approche permettra d'aboutir à la fabrication de neurones sensoriels avec une architecture extrêmement simplifiée basée sur l'effet Pearson-Anson. Au travers de ce projet, nous visons également à développer des expériences in operando originales telles que de la micro-réflectivité sous contrainte mécanique et/ou thermique de dispositifs en fonctionnement. Ce type de développement expérimental présente à la fois une visée applicative en ouvrant des perspectives dans le développement d'architectures neuromorphiques interagissant plus

efficacement avec leur environnement, mais également un intérêt scientifique avec la compréhension de la physique de dispositifs NDR à base d'isolants de Mott.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

En première année, l'étudiant(e) recruté(e) ira effectuer un séjour de 4 à 5 mois à Canberra au sein de l'ANU pour élaborer des dispositifs de test à base d'oxyde de vanadium sous différentes phases. Cette première année sera également dédiée à une étude bibliographique approfondie et à la prise en main d'un microscope thermique à balayage et d'un banc de micro-réflexivité optique, tous deux disponibles à l'INL. La deuxième année sera consacrée au développement d'expériences d'imagerie thermique dynamique pour caractériser des dispositifs NDR en fonctionnement et à l'adaptation de platines de test permettant d'appliquer des stress thermiques et mécaniques sur les dispositifs analysés par micro-réflexivité optique. En parallèle, des mesures électriques macroscopiques sous contraintes mécanique et thermique seront développées sur les mêmes dispositifs élaborés à l'ANU. En fin de deuxième année l'étudiant pourra effectuer une deuxième mission en Australie pour développer un nouveau lot d'échantillons. Le début de la troisième année sera dédié à la conception d'oscillateurs à relaxation et au développement de démonstrateurs de type thermo- et mécano-récepteurs neuro-inspirés. Enfin, les six derniers mois du contrat seront consacrés à la rédaction du manuscrit et à la préparation de la soutenance de thèse.

Financement de la thèse : Contrat doctoral établissement INSA Lyon. L'IRP en collaboration avec l'Australie servira d'accompagnement de la thèse pour financer les missions du doctorant (séjours à Canberra pour la fabrication des échantillons, participation à des conférences et achat de petit matériel).

Profil du candidat recherché : Le candidat devra être issu d'une formation dans le(s) domaine(s) des micro-nanotechnologies silicium, de la physique des composants micro-nanoélectroniques et des micro-nanosystèmes. Une première expérience en salle blanche sur des équipements de croissance de couches minces et/ou de lithographie constituerait un plus.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche : L'originalité des recherches proposées devrait aboutir à la publication de plusieurs articles dans des revues internationales à comité de lecture et à la participation du(de la) doctorant(e) à des conférences dans les domaines de la physique des matériaux et de la micro-électronique. Concernant les aspects propriété intellectuelle, nous pensons que l'approche proposée qui vise à utiliser l'élément central de l'oscillateur comme élément sensible du neurone sensoriel pourrait faire l'objet d'un brevet. Nous nous rapprocherons des services compétents (SATT Pulsalys) pour une déclaration d'invention dès que la démonstration de concept aura été validée côté français à l'INL.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat : En micro-nanotechnologies silicium (lithographie optique, électronique, couches minces), microscopie (MEB, AFM), caractérisations multi-échelles et multi-physiques (tests électriques sous stress thermique et mécanique, SThM, micro-réflexivité optique) et en électronique (conception d'oscillateurs). Acquisition de compétences dans le domaine de la physique du transport électronique, des matériaux à changement de phase et des capteurs.

Perspectives professionnelles après le doctorat : Les perspectives professionnelles concernent préférentiellement le monde académique et l'industrie de la microélectronique et des microsystèmes.

Références bibliographiques :

[1] "Characterization and modeling of spiking and bursting in experimental NbO_x neuron"

M Drouhin, S Li, M Grelier, S Collin, F Godel, RG Elliman, B Dlubak, Juan Trastoy, Damien Querlioz, Julie Grollier

Neuromorphic Computing and Engineering 2 (4), 044008 (2022)

[2] "Direct Observation of the Electrically Triggered Insulator-Metal Transition in V_3O_5 Far below the Transition Temperature"

C Adda, MH Lee, Y Kalcheim, P Salev, R Rocco, N M. Vargas, N Ghazikhanian, C-P Li, G Albright, M Rozenberg, and I K. Schuller

Physical Review X, 12, 011025 (2022)

[3] "Flexible Artificial Sensory Systems Based on Neuromorphic Devices"

F Sun, Q Lu, S Feng, T Zhang

ACS Nano 15, 3, 3875–3899 (2021)

[4] "A bioinspired flexible organic artificial afferent nerve"

Y Kim, A Chortos, W Xu, Y Liu, JY Oh, D Son, J Kang

Science 360, 998–1003 (2018)

[5] "An artificial neuromorphic somatosensory system with spatio-temporal tactile perception and feedback functions"

F Sun, Q Lu, M Hao, Y Wu, Y Li, L Liu, L Li, Y Wang and T Zhang

npj Flexible Electronics volume 6, Article number: 72 (2022)

[6] "A skin-inspired organic digital mechanoreceptor"

BCK Tee, A Chortos, A Berndt, AK Nguyen, A Tom, A McGuire, Z Carter Lin, K Tien, W-G Bae, H Wang, P Mei, H-H Chou, B Cui, K Deisseroth, T Nga Ng, and Z Bao

Science, 350 (6258), 313-316 (2015)

[7] "Physical Origin of Negative Differential Resistance in V_3O_5 and Its Application as a Solid-state Oscillator"

SK Das, SK Nandi, CV Marquez, A Rúa, M Uenuma, E Puyoo, SK Nath, D Albertini, N Baboux, T Lu, Y Liu, T Haeger, R Heiderhoff, T Riedl, T Ratcliff, R G Elliman

Advanced Materials, 2208477 (2022)

[8] "High Spatial Resolution Thermal Mapping of Volatile Switching in NbOx-Based Memristor Using In Situ Scanning Thermal Microscopy"

SK Nandi, E Puyoo, SK Nath, D Albertini, N Baboux, SK Das, T Ratcliff, R G Elliman

ACS Applied Materials & Interfaces 14 (25), 29025-29031 (2022)