

**Quelques projets de l'équipe Mnemosyne actifs en 2021-2022  
et ouverts au recrutement de stagiaires et de projets  
(voire plus si affinité)**

Mnemosyne est une équipe Inria associée au laboratoire d'informatique LaBRI (CNRS, Université de Bordeaux et Bordeaux INP) et hébergée au laboratoire de neurosciences IMN (Institut des Maladies Neurodégénératives). Nous travaillons sur la modélisation de fonctions cognitives supérieures en développant des modèles de réseaux de neurones qui rendent compte de nos différentes manières d'apprendre et mémoriser. Nous cherchons en particulier à comprendre comment dans ces fonctions cognitives nous développons à la fois des connaissances (mémoire explicite, savoir que) et des savoir faire (mémoire implicite).

Actuellement, nous travaillons sur les projets suivants :

- Contrôle d'une prothèse de bras (application biomédicale personne amputée)
- Etude du chant du canari (application pour le traitement du langage)
- Etude de l'activité d'un apprenant (en lien avec les sciences de l'éducation)
- Analyse du mouvement par 'Deep Learning' et corrélats neuronaux (expérimentation en neurosciences)
- Etude des rythmes d'interactions entre régions cérébrales (application biomédicale pour des neuroprothèses)

Ces projets sont détaillés dans les fiches suivantes.



## Contrôle Biomimétique de Prothèse

Contact : [Frederic.Alexandre@inria.fr](mailto:Frederic.Alexandre@inria.fr)

Ce projet se situe dans le cadre d'une collaboration entre la recherche académique et le monde biomédical, visant à pouvoir contrôler une prothèse de bras pour des sujets amputés au-dessus du coude. L'épaule reste commandée par le sujet et il faut contrôler les mouvements du coude et du poignet lors de tâches de saisies d'objets.

Des corpus ont été créés par expérimentation en réalité virtuelle. Des sujets (non amputés) apprennent à contrôler un bras virtuel à l'aide de leur propre bras et vont attraper successivement des séries d'objets présentés dans l'espace virtuel et perçus à travers un casque de réalité virtuelle et les reposer sur une plateforme orientée (un plateau).

Le but principal est d'entraîner un réseau de neurones à prédire les informations manquantes ; des tâches intermédiaires sont aussi considérées, comme l'apprentissage d'un modèle sensorimoteur direct et inverse dans différentes conditions ou la réalisation de prédictions au cours des trajectoires.

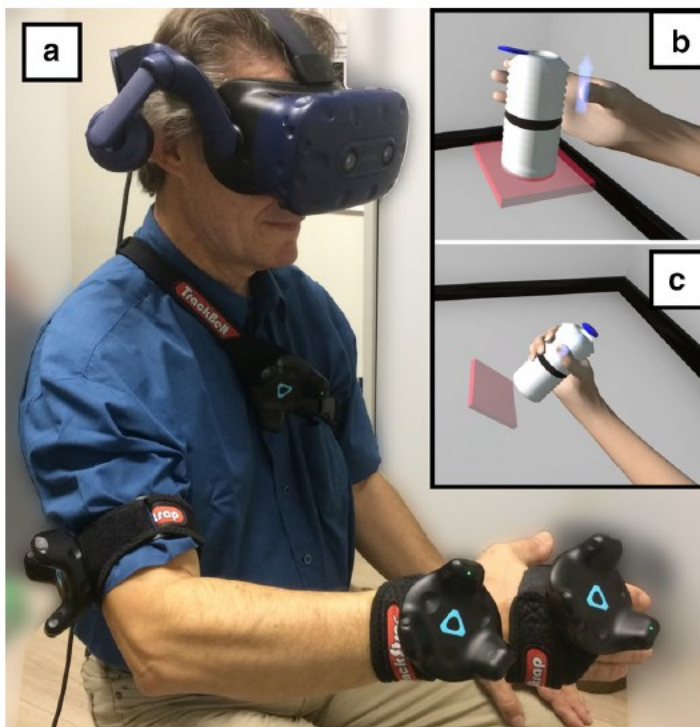


Fig 1 : Expérimentation en réalité virtuelle pour enregistrer les mouvements des sujets (a) pour saisir (b) et reposer (c) des objets cylindriques

## Etude de l'activité d'un apprenant

Contact : [Thierry.Vieville@inria.fr](mailto:Thierry.Vieville@inria.fr)

Collectivement fort-e-s de nos connaissances en neuroscience cognitive et computationnelle à partir du machine learning, nous souhaitons explorer dans quelle mesure des approches ou des méthodes issues de la représentation des connaissances, pourraient aider à mieux formaliser l'apprentissage humain tel qu'il est étudié en sciences de l'éducation. En d'autres termes : nous profitons de notre meilleure compréhension du fonctionnement de notre cerveau pour nous aider à mieux comprendre comment nos enfants apprennent. L'accent est mis ici sur l'apprentissage de la pensée informatique, c'est-à-dire sur ce qu'il faut partager en termes de compétences nécessaires pour maîtriser le monde numérique, pas seulement pour le consommer ou le supporter, compte tenu de la modélisation de tâches d'apprentissage spécifiques.

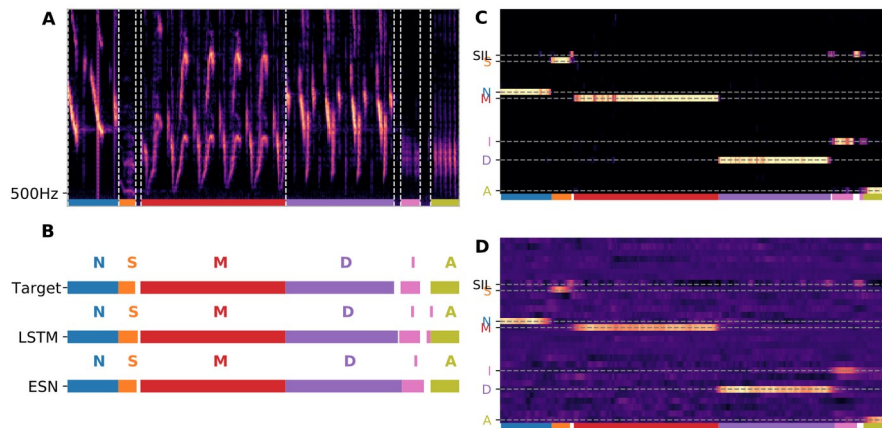
Dans ce cadre nous offrons des sujets à deux niveaux (i) utiliser de l'IA pour mesurer les traces d'apprentissage d'une personne engagée dans une activité éducative avec des objets tangibles ou en jouant avec d'autres (étude des meilleurs capteurs, analyse de mesures visuelles ou autres) avec la double idée d'adapter l'activité elle-même pour la rendre facilement observable et de se baser sur un modèle de la personne apprenante pour travailler avec les meilleures informations à priori lors de la mesure des ces observables; (ii) contribuer à un de nos axes de recherche plus fondamentaux, soit sur (iia) l'apprentissage renforcement en manipulant des variables d'état symbolique structurées et pas uniquement une valeur qualitative ou (iib) travailler sur comment implémenter de manière numérique dans des calculs distribués biologiquement plausibles des raisonnements symboliques soit exact soit avec un degré de vérité relié à une notion de nécessité et possibilité comme en logique modale.



Figure: Maquette d'un ensemble d'activités "robotisées" pendant lesquelles la personne apprenante apprend en jouant, par exemple à programmer un petit robot qui sort d'un labyrinthe, formaliser un problème de la vraie vie, jouer avec des pixels pour comprendre le codage d'une image ou s'attaquer à la résolution d'un problème ouvert, tandis que l'on mesure les traces de son apprentissage pour mieux comprendre.

## Analyses de chants de canaris avec l'aide d'un décodeur de chants

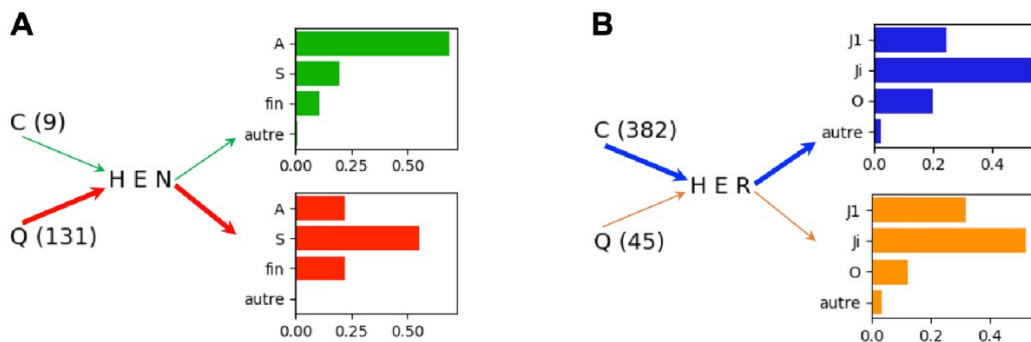
Contact : xavier.hinaut@inria.fr



Spectrogramme d'un chant de canari et reconnaissance par deux décodeurs (LSTM et ESN).

L'étude des oiseaux chanteurs est pertinente pour comprendre comment les enfants (humains) apprennent une langue, ou plus généralement pour comprendre comment notre cerveau apprend et traite des séquences sonores (e.g. musique, ...). Les chants, en particulier chez les canaris, sont organisés sous forme de "chunks" : un chunk est donc une "méta-briques" composée de briques élémentaires. Quelques exemples pour le langage humain : une phrase est composée de plusieurs mots, un mot est composé de syllabes, et les syllabes sont elles mêmes composées de phonèmes.

Cette organisation en chunks est une caractéristique intéressante du chant des oiseaux car elle est omniprésente (et à plusieurs niveaux de hiérarchie) dans le langage humain. Comprendre les processus cognitifs de segmentation et de traitement des chunks est une question fondamentale en neurosciences.



Analyse des dépendances à long terme dans le chant des canaris

L'analyse de la structure des chants, en plus d'améliorer la compréhension que l'on en a, permettra de créer de nouveaux outils pour analyser des expériences faites en neurosciences. Notamment pour l'analyse et le décodage de l'activité de neurones dans les régions cérébrales (chez l'oiseau) liés à l'apprentissage et la production du chant.

L'étudiant partira des méthodes et programmes d'analyses précédemment développés dans l'équipe pour en développer de nouvelles. Nous avons récemment développé un outil semi-automatique (basé sur des réseaux de neurones récurrents) de segmentation et

classification de chants de canaris (en partant de seulement quelques dizaines de chants étiquetés). Le Python sera utilisé pour le développement des programmes.

Le stage aura plusieurs axes principaux basés sur des travaux préliminaires de l'équipe : 0. Améliorer l'interface graphique existante du décodeur (transcripteur) de chants de canaris ; 1. définir différentes variantes d'heuristiques permettant de trouver automatiquement des "chunks" et autres caractéristiques des chants ; 2. mettre en place des outils de visualisation afin d'aider l'utilisateur à mieux cerner les particularités des chants de chaque canari (par ex: graphe intermédiaire entre "phrases" et "états" afin de mieux visualiser les chunks), par exemple en utilisant des outils récents comme UMAP, etc. ; 3 utiliser des réseaux de neurones récurrents artificiels (reservoir computing, LSTM, ...) pour tenter de mieux comprendre la syntaxe des canaris en regardant les prédictions des ces réseaux ; 4. (si le temps le permet) application des méthodes développées à l'analyse des enregistrements neuronaux d'une aire sensori-motrice de canaris par les collaborateurs au laboratoire NeuroPSI (Orsay)

#### ### Références

Markowitz JE, Ivie E, Kligler L, Gardner TJ (2013) Long-range Order in Canary Song. PLoS Comput Biol 9(5): e1003052.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003052>

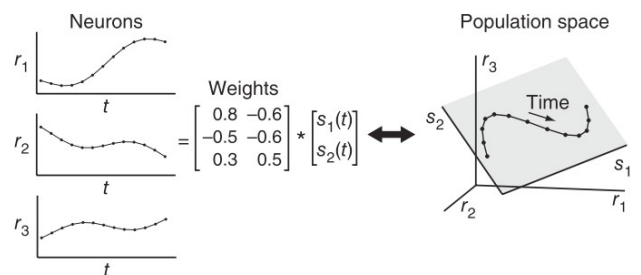
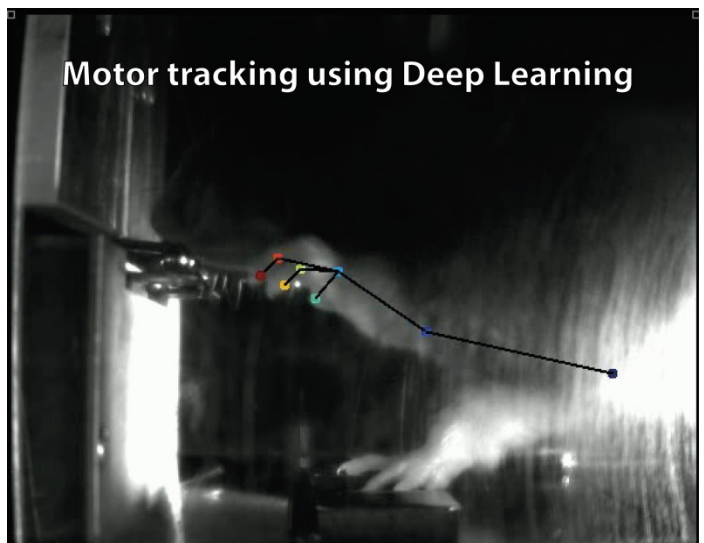
## Analyse du mouvement par 'Deep Learning' et corrélats neuronaux

**Contact :** Nicolas Mallet, IMN

**Background :** Notre équipe de recherche a pour but d'étudier les mécanismes neuronaux fondamentaux qui contrôlent nos actions motrices en situations normales et comment ces circuits sont altérés dans des situations pathologiques comme la maladie de Parkinson. Nous sommes spécialisés dans l'enregistrement (activité électrophysiologique in vivo) et la manipulation (perturbations optogénétiques) des réseaux de neurones lors de l'exécution d'un mouvement de préhension chez le rongeur.

**Projet :** Notre projet de stage consiste aux développements de routines d'analyse du signal digital permettant de mieux caractériser la relation entre les activités électrophysiologiques et la dynamique du mouvement. Nous chercherons en particulier à :

**1/** Mettre en place et entrainer un réseau de neurones profond (algorithme de deep learning) permettant d'analyser automatique la cinétique des mouvements et de quantifier les différences entre des mouvements exécutés en situations normales vs. pathologiques dans un modèle rongeur de la maladie de Parkinson.



**2/** Développer des analyses permettant de réduire la dimensionnalité (analyse en composantes principales) de l'activité des réseaux de neurones afin d'extraire de nouvelles informations liées à l'encodage du mouvement.

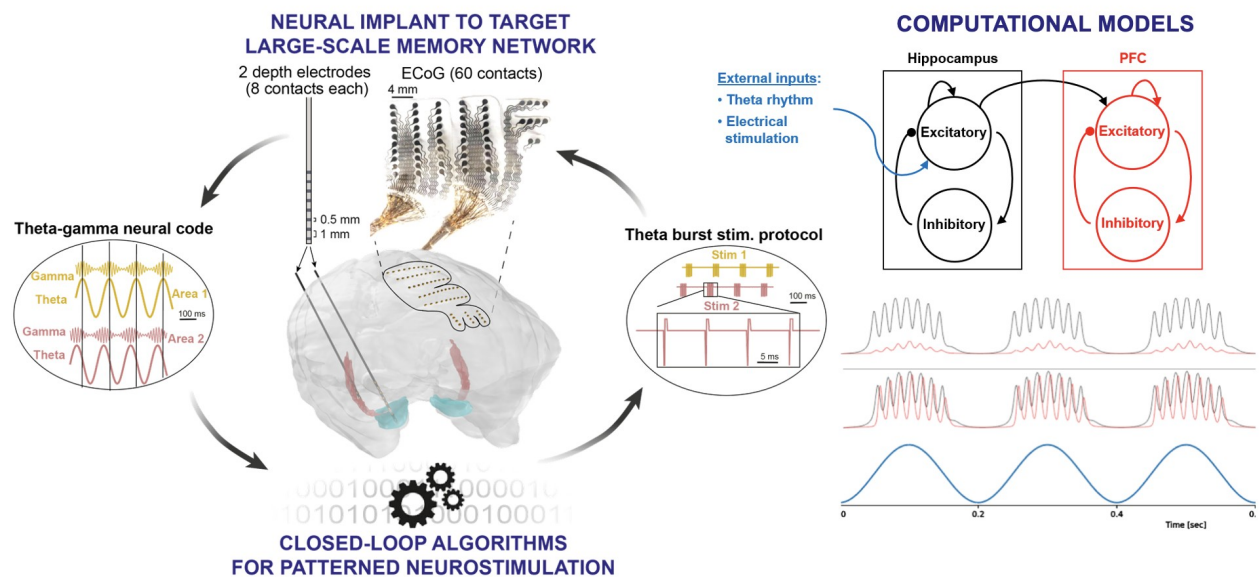
L'ensemble de ces routines d'analyse devra utiliser le langage Python.

# A Computational Approach to Cognitive Neuroprosthetics

## Modelling the effects of Deep Brain Stimulation for memory

Contact: Fabien Wagner & Nicolas Rougier, IMN

This project falls within the overall scope of creating a cognitive neuroprosthesis to palliate memory deficits that involve the hippocampus - prefrontal cortex circuit. The functional interactions between these two structures are known to underlie several cognitive processes, including memory encoding and retrieval. Damage to their reciprocal connections after traumatic brain injury or neurodegenerative diseases can cause severe and chronic memory deficits. Our group aims at developing neurostimulation paradigms to enhance or restore the communication between these areas after an injury, working with non-human primates as a preclinical model and computational models to understand the underlying mechanisms.



Electrical stimulation of the entorhinal cortex has been previously shown to enhance memory in humans (Suthana et al. 2012; Suthana and Fried 2014; Titiz et al. 2017). Two main phenomena that have been observed in memory processes are phase-amplitude modulation of different brain rhythms (Sirota et al. 2008; Tort et al. 2010; Segneri et al. 2020), mainly involving interactions between slower theta (Fujisawa and Buzsáki 2011) oscillations with faster gamma (Bragin et al. 1995), and theta phase reset (Mormann et al. 2005; McCartney et al. 2004).

To this end, we are currently using a biologically accurate computational model of the hippocampus and entorhinal cortex that exhibits theta-gamma phase-amplitude coupling (Aussel et al. 2018). The model has been modified to simulate the effects of electrical stimulation when applied in different areas of the memory network. It has also been modified to simulate the effects of stimulation-induced phase reset through the interplay of the network with coupled Kuramoto oscillators that generate theta oscillations (simulating the medial septum). The model was developed using the Brian2 simulator and is based on Python.

The current project revolves around investigating how electrical stimulation of the hippocampus and the entorhinal cortex can affect theta-gamma phase-amplitude coupling and overall episodic memory. The goal will be to run simulations with the finalized model and investigate how the stimulation parameters (i.e. shape of the stimulation waveform,

stimulation amplitude, electrode location, etc) can affect the predicted behavior of the memory network.

**Keywords:** neurostimulation, memory, neural oscillations, python, brian2

## References

- Aussel, Amélie, Laure Buhry, Louise Tyvaert, and Radu Ranta. 2018. "A Detailed Anatomical and Mathematical Model of the Hippocampal Formation for the Generation of Sharp-Wave Ripples and Theta-Nested Gamma Oscillations." *Journal of Computational Neuroscience* 45 (3): 207–21.
- Bragin, A, G Jando, Z Nadasdy, J Hetke, K Wise, and G Buzsáki. 1995. "Gamma (40-100 Hz) Oscillation in the Hippocampus of the Behaving Rat." *The Journal of Neuroscience* 15 (1): 47–60. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.15-01-00047.1995>.
- Fujisawa, Shigeyoshi, and György Buzsáki. 2011. "A 4 Hz Oscillation Adaptively Synchronizes Prefrontal, VTA, and Hippocampal Activities." *Neuron* 72 (1): 153–65. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.08.018>.
- McCartney, Holly, Andrew D. Johnson, Zachary M. Weil, and Bennet Givens. 2004. "Theta Reset Produces Optimal Conditions for Long-Term Potentiation." *Hippocampus* 14 (6): 684–87. <https://doi.org/10.1002/hipo.20019>.
- Mormann, Florian, Juergen Fell, Nikolai Axmacher, Bernd Weber, Klaus Lehnertz, Christian E. Elger, and Guillén Fernández. 2005. "Phase/Amplitude Reset and Theta-Gamma Interaction in the Human Medial Temporal Lobe during a Continuous Word Recognition Memory Task." *Hippocampus* 15 (7): 890–900. <https://doi.org/10.1002/hipo.20117>.
- Segneri, Marco, Hongjie Bi, Simona Olmi, and Alessandro Torcini. 2020. "Theta-Nested Gamma Oscillations in Next Generation Neural Mass Models." *Frontiers in Computational Neuroscience* 14. <https://doi.org/10.3389/fncom.2020.00047>.
- Sirota, Anton, Sean Montgomery, Shigeyoshi Fujisawa, Yoshikazu Isomura, Michael Zugaro, and György Buzsáki. 2008. "Entrainment of Neocortical Neurons and Gamma Oscillations by the Hippocampal Theta Rhythm." *Neuron* 60 (4): 683–97. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.09.014>.
- Suthana, Nanthia, and Itzhak Fried. 2014. "Deep Brain Stimulation for Enhancement of Learning and Memory." *NeuroImage* 85 Pt 3 (January): 996–1002. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.07.066>.
- Suthana, Nanthia, Zulfi Haneef, John Stern, Roy Mukamel, Eric Behnke, Barbara Knowlton, and Itzhak Fried. 2012. "Memory Enhancement and Deep-Brain Stimulation of the Entorhinal Area." *New England Journal of Medicine* 366 (6): 502–10. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1107212>.
- Titiz, Ali S, Michael R H Hill, Emily A Mankin, Zahra M Aghajan, Dawn Eliashiv, Natalia Tchemodanov, Uri Maoz, et al. 2017. "Theta-Burst Microstimulation in the Human Entorhinal Area Improves Memory Specificity." Edited by Inna Slutsky. *eLife* 6 (October): e29515. <https://doi.org/10.7554/eLife.29515>.
- Tort, Adriano B. L., Robert Komorowski, Howard Eichenbaum, and Nancy Kopell. 2010. "Measuring Phase-Amplitude Coupling Between Neuronal Oscillations of Different Frequencies." *Journal of Neurophysiology* 104 (2): 1195–1210. <https://doi.org/10.1152/jn.00106.2010>.



# BrocaBird : Modélisation de mécanismes d'action-perception avec des réseaux de neurones récurrents

Contact : xavier.hinaut@inria.fr

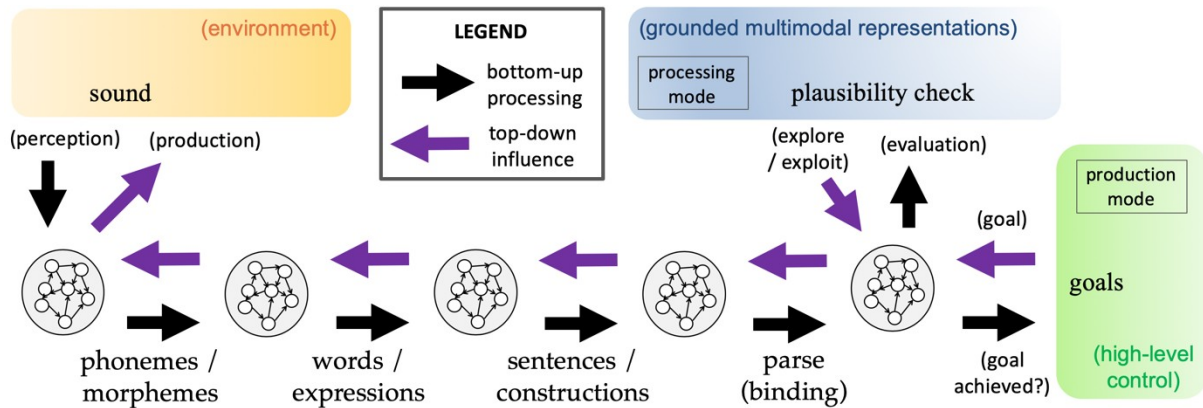


Figure 1: Objectif du projet à long terme pour modéliser la compréhension et la production de la parole avec un ensemble de modèles sensori-moteurs hiérarchiques.

## Introduction et contexte scientifique

Lorsque nous écoutons une chanson ou la radio, notre cerveau doit analyser ces stimuli sonores à la volée. Si nous voulons apprendre une chanson entendue à la radio ou des mouvements de danse que nous avons vus sur Youtube, notre cerveau devra les apprendre de manière incrémentale. Notre cerveau ne peut pas "déplier" le temps comme le font les algorithmes d'apprentissage profond tels que la rétropropagation du gradient dans le temps ("Back-Propagation Through Time" - BPTT) : cela équivaudrait à avoir des copies virtuelles de notre cerveau pour chaque instant donné. Cependant, c'est ainsi que procèdent les réseaux neuronaux récurrents (RNN) les plus connus : Les LSTM (Long-Short Term Memory networks) peuvent utiliser des centaines de copies virtuelles du cerveau pour apprendre les dépendances à long terme qui sont présentes dans les chansons, le langage ou les danses. Pour comprendre comment le cerveau traite et apprend des séquences, nous avons besoin de modèles utilisant des processus de développement et des mécanismes neurobiologiquement plausibles sans BPTT.

Quand on apprend une chanson, on apprend à imiter ce qu'on entend. Par essais et erreurs, nous essayons de reproduire les sons que nous entendons. Il existe des preuves convergentes que la production et la perception (de chants, du langage ou de gestes) ne sont pas des processus séparés dans le cerveau, mais qu'ils sont plutôt entrelacés. C'est cette imbrication qui permet par exemple aux gens de se prédire eux-mêmes et de se prédire les uns les autres [6]. Le couplage de l'action et de la perception est important car il permet à un agent apprenant (e.g. un bébé, un oiseau ou un modèle) d'apprendre de ses propres actions : par exemple, en apprenant les conséquences perceptuelles (e.g. les sons entendus) de ses propres actions (e.g. les productions vocales) pendant le babillage. Ainsi, l'agent apprendra de manière auto-supervisée. Ce type d'apprentissage est biologiquement plus plausible que l'apprentissage supervisé qui suppose la disponibilité de signaux étiquetés qui doivent être conçus par le modélisateur. L'apprentissage auto-supervisé est fondamental pour les processus de développement tels que le babillage. Schwartz et al. [11] proposent

que la perception et l'action sont co-structurées au cours du développement de la parole : les gestes sont façonnés perceptuellement, ils forment une unité perceptuo-motrice. Nous manquons de modèles neuronaux explicitant les mécanismes qui façonnent ces unités perceptuo-motrices au cours du développement de l'enfant.

## Objectifs

Nous souhaitons obtenir des nouveaux mécanismes d'apprentissage par imitation avec des réseaux de neurones récurrent pour de la modélisation en neurosciences. Ces mécanismes permettront d'apprendre en "auto-supervision" c'est-à-dire en combinant de l'apprentissage non-supervisé (i.e. données non-étiquetées) grâce à la capacité du modèle à générer des données (i.e. modèle génératif). Autrement dit, c'est similaire à ce qui peut être fait avec des Réseaux Antagonistes Génératifs (Generative Adversarial Networks - GANs) et de l'apprentissage actif ("active learning"), mais plus centré sur un agent apprenant qui a ses propres objectifs ("goals") en cherchant à imiter certains stimuli.

Du point de vue des neurosciences, ces nouveaux mécanismes "d'action-perception" vont permettre de mieux comprendre comment notre cerveau fait pour percevoir "activement" des stimuli, c'est-à-dire le fait pour un agent d'être capable de catégoriser les stimuli en utilisant sa capacité à imiter ces stimuli.

## Méthodes

Nous utiliserons des réseaux de neurones récurrents (RNN) du type Reservoir Computing. Nous combinerons différentes méthodes récemment développées pour ce type de RNN, notamment celles liés à de l'apprentissage faiblement supervisé et de l'apprentissage par renforcement. Nous les combinerons avec d'autres méthodes d'apprentissage non-supervisés du type carte auto-organisatrices (SOM). Enfin, nous nous inspirerons des Réseaux Génératifs Adversaires (GAN) pour l'architecture globale des modèles.

L'étudiant pourra choisir d'appliquer les modèles développés aux chants d'oiseaux, à la parole humaine ou aux gestes (e.g. danse). Le projet sera réalisé en utilisant le langage Python à la vue du nombre important de bibliothèques existantes dans le domaine et pour profiter de l'expertise de l'équipe dans ce langage.

## Références bibliographiques

- [1] M. H. Christiansen, N. Chater, P. W. Culicover. *Creating language: Integrating evolution, acquisition, and processing*. MIT Press, 2016.
- [2] X. Hinaut, P.F. Dominey. Real-Time Parallel Processing of Grammatical Structure in the Fronto-Striatal System: A Recurrent Network Simulation Study Using Reservoir Computing. *PloS ONE* 8(2): e52946. 2013. doi:10.1371/journal.pone.0052946
- [3] H. Jaeger, H. Haas (2004). Harnessing nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication. *science*, 304(5667), 78-80.
- [4] A. Juven, X. Hinaut. Cross-Situational Learning with Reservoir Computing for Language Acquisition Modelling. *International Joint Conference on Neural Networks*, Glasgow, UK. July 2020. (IN PRESS)
- [5] F. Pulvermüller, L. Fadiga. Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(5):351–360, Apr. 2010.
- [6] M. Pickering, S. Garrod. An integrated theory of language production and comprehension. *Behavioral and brain sciences*, 36(4):329–347, 2013.
- [7] A. Pitti et al. Gated spiking neural network using iterative free-energy optimization and rank-order coding for structure learning in memory sequences. *Neural Networks*, 121:242–258, Jan. 2020.
- [8] S. Pagliarini, A. Leblois, and X. Hinaut. Vocal imitation in sensorimotor learning models: a comparative review. *IEEE Journal of Transaction in Cognitive Developmental Systems*. 2020. (IN PRESS)
- [9] Rougier, N., & Boniface, Y. (2011). Dynamic self-organising map. *Neurocomputing*, 74(11), 1840-1847.

- [10] N. Rougier (2019) Pourquoi votre chat est nul aux échecs et pourtant plus intelligent qu'une IA. The Conversation. (hal-02322085) <https://theconversation.com/pourquoi-votre-chat-est-nul-aux-echecs-et-pourtant-plus-intelligent-quune-ia-123584>
- [11] J.-L. Schwartz, A. Basirat, L. Ménard, and M. Sato. The perception-for-action-control theory (PACT): A perceptuomotor theory of speech perception. *J. of Neuroling.*, 25(5):336–354, Sept. 2012.
- [12] A. Strock, X. Hinaut, N. Rougier. A Robust Model of Gated Working Memory. *Neural Computation*, Massachusetts Institute of Technology Press (MIT Press), 2019, pp.1-29.